

Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat  
Warmte en Ondergrond  
t.a.v. [REDACTED]  
Postbus 20401  
2500 EK DEN HAAG



**Onderwerp**  
Advies instemming winningsplan geothermie Andijk

Geachte [REDACTED],

Naar aanleiding van uw adviesverzoek van 4 juni 2019 (per email) ter ondersteuning van het te nemen instemmingsbesluit betreffende het winningsplan aardwarmte Andijk van 11 maart 2019 en aangevuld op 6 mei 2019 door ECW Geo Andijk B.V. (hierna: vergunninghouder), stuur ik u hierbij ons advies.

De vereisten en weigeringsgronden verwoord in de mijnbouwwet (art. 34 t/m 36) zijn leidend bij de evaluatie van de aanvraag.

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat heeft TNO-AGE gevraagd om advies uit te brengen en controleberekeningen uit te voeren op het aangevraagde winningsplan Andijk op de volgende onderwerpen:

- a) Veiligheid van omwonenden, schade aan gebouwen of infrastructurele werken als gevolg van bodembeweging:
  - Bodemtrillingen: controle op SHRA berekeningen;
  - Bodemdaling/stijging: controle bodemdaling/stijging prognoses;
- b) Planmatig gebruik en beheer van de ondergrond:
  - Wijze van winning, operationeel ontwerp en productiestrategie van het aardwarmtesysteem;
  - Drukbeïnvloeding en ondergrondse interferentie met aanpalende winningsactiviteiten;
  - Duur en hoeveelheden van de winning;
  - Bijvangst van delfstoffen.

### Beschrijving winning

In het gebied dat is gedefinieerd als de winningsvergunning voor aardwarmte Andijk (ca. 4,6 km<sup>2</sup>) liggen twee doubletten die elk afzonderlijk van elkaar produceren: het eerste doublet (Andijk Geothermie 1/2, hierna: Andijk I), bestaande uit een productieput (ADK-GT-01-S1) en een injectieput (ADK-GT-02), en het tweede doublet (Andijk Geothermie 3/4, hierna: Andijk II), bestaande uit een productieput

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

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

T +31 88 866 42 56

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Contactpersoon**  
[REDACTED]

**E-mail**  
[REDACTED]@tno.nl

**Bijlage(n)**  
4

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponeerd bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op [www.tno.nl](http://www.tno.nl).  
Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
2/43

(ADK-GT-03) en een injectieput (ADK-GT-04). Beide systemen zijn sinds begin 2019 in productie en zijn gericht op de watervoerende lagen van de Slochteren Formatie, die zich bevindt op een diepte van ca. 1800 m. De temperatuur van het productiewater in beide doubletten is ongeveer 82°C en van het injectiewater ongeveer 30°C. De stroming van warm water naar de productieput en injectie van afgekoeld water vindt plaats door en in de poreuze gesteentematrix van deze formatie. De winningsvergunning Andijk is bij beschikking, met kenmerk DGKE-WO/19125675, op 23 mei 2019 verleend aan ECW Geoholding B.V. en verloopt in mei 2054. Daarmee is de totale duur van de vergunde warmteproductie ruim 35 jaar.

De gewonnen warmte wordt gebruikt door glastuinbouwbedrijven. Uit analyse van de Mijnewettelijk aangeleverde productiedata aan TNO-AGE blijkt dat beide systemen tot op heden een gemiddeld debiet van respectievelijk 263 m<sup>3</sup>/uur (Andijk I) en 315 m<sup>3</sup>/uur (Andijk II) hebben gerealiseerd. De totale energie opbrengst sinds de start van productie is voor beide systemen afzonderlijk ca. 0,036 PJ.

De vergunninghouder voorziet in de nabije toekomst geen uitbreiding van de winningsinstallatie in de zin van het boren van extra putten. Ook stimuleringsmaatregelen en extra afkoeling van het water zijn op korte termijn niet voorzien.

## **1. Planmatig gebruik van de ondergrond**

Vergunninghouder vraagt met het winningsplan [1] een jaarlijks debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur plus of min 20% (Tabel 10 van [1]) aan voor beide doubletten. Op pagina 3 van [1] wordt gesteld dat de duur van de winning (conform beschikking winningsvergunning) 35 jaar zal zijn. Daarentegen worden de resultaten van de modellering in DoubletCalc2D al gegeven na 30 jaar productie. Uit Tabel 17 van [1] is op te maken dat beide doubletten jaarrond zullen produceren met 8760 vollasturen en een debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur; elk vijfde jaar wordt een lager aantal vollasturen voorzien: 8000, voor onderhoud (pagina 3 van [1]). Het geproduceerde formatiewater bevat ca. 0,4 m<sup>3</sup> opgelost gas per m<sup>3</sup> water [1]. Vergunninghouder geeft aan dat het mee geproduceerde gas na behandeling nuttig aangewend wordt in de stookinstallatie.

TNO-AGE heeft de inputparameters en de daaruit voortvloeiende injectiedrukken en afkoelingscontouren geëvalueerd en vervolgens eigenstandig nagerekend met de softwarepakketten DoubletCalc1D en -2D. Bijlage 2 toont de druk- en temperatuurdistributie in de ondergrond aan het einde van de winningsvergunning in 2054.

Uit analyse van de productiecijfers van Andijk I en Andijk II blijkt dat beide systemen momenteel onder de grens van het SodM protocol voor de maximale injectiedruk [12] opereren. De maximale injectiedruk op reservoirdiepte volgens het SodM protocol voor Andijk I is 44 bar en voor Andijk II 47 bar. Op basis van de modelmatige analyse van TNO-AGE is het beoogde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur in doublet Andijk I haalbaar binnen de grenzen gesteld in het injectieprotocol. Uit de modellering blijkt dat Andijk II met het voorgestelde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur na 2 jaar

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
3/43

de maximale injectiedruk volgens [12] overschrijdt. In DoubletCalc2D neemt de injectiedruk na verloop van tijd toe vanwege de toenemende mate en verbreiding van afkoeling van het reservoir. De relatie tussen debiet en injectiedruk is echter afhankelijk van meerdere factoren, zoals de skin. Het is lastig te voorspellen hoe de skin zich in verloop van tijd ontwikkelt. Een verbetering van de skin, die reeds wordt waargenomen bij andere langer producerende geothermieprojecten met het Rotliegend als doelreservoir, zou een verbetering van de injectiviteit betekenen, waardoor het voorgestelde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur mogelijk wel gehaald kan worden.

TNO-AGE merkt op dat de doubletconfiguratie zoals gepresenteerd in het winningsplan [1] afwijkt van de doubletconfiguratie zoals die in de aanvraag [2] van de winningsvergunning voor aardwarmte Andijk staat vermeld. In de aanvraag van de winningsvergunning worden putten ADK-GT-01-S1 en ADK-GT-03 aangeduid als injectieput en de putten ADK-GT-02 en ADK-GT-04 als productieput. In het Winningsplan [1] zijn de injectie- en productieputten van beide doubletten omgedraaid. Dus ADK-GT-01-S1 en ADK-GT-03 zijn productieputten en ADK-GT-02 en ADK-GT-04 zijn injectieputten. Deze configuratie wordt ook bevestigd door de productiedata die aangeleverd wordt door de vergunninghouder aan TNO-AGE. Daarnaast is het geprognoseerde debiet hoger dan oorspronkelijk aangegeven in de aanvraag van de winningsvergunning, namelijk 350 m<sup>3</sup>/uur i.p.v. 317 m<sup>3</sup>/uur.

De DoubletCalc2D modelresultaten tonen aan dat het omwisselen van de injectie- en productieputten en het hogere debiet tot gevolg hebben dat het moment van overschrijding van de vergunningsgrens eerder plaatsvindt dan bepaald in het kader van de winningsvergunningaanvraag. De koudwaterbel van Andijk II overschrijdt naar verwachting de vergunningsgrens al na 25 jaar i.p.v. 36 jaar. Ook de doorbraaktijd van koud water in de productieputten zal naar verwachting korter zijn in beide doubletten. De verwachte doorbraaktijd voor Andijk I is nu na 38 jaar i.p.v. 39 jaar en voor Andijk II na 32 jaar i.p.v. 33 jaar. De berekeningen laten zien dat de invloed van het hogere debiet erg klein is in vergelijking met de invloed die de nieuwe putconfiguratie heeft op de verwachte doorbraaktijden en duur tot overschrijding van de vergunningsgrens.

Volgens de modelberekeningen is de hoeveelheid water die vanaf 1 januari 2019 is geproduceerd en tot vergunningsgrens overschrijding (na 25 jaar productie) wordt geproduceerd, uitgaande van een gemiddeld debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur, 75 miljoen m<sup>3</sup> per doublet en totaal voor beide doubletten 150 miljoen m<sup>3</sup>. In het geval productie doorgaat tot einde vergunningsduur (tot 4 juli 2054) wordt er per doublet 107 miljoen m<sup>3</sup> water geproduceerd en een totaal voor beide doubletten 214 miljoen m<sup>3</sup> water.

Seismiek en de interferentietesten tonen aan dat een breuk aanwezig is tussen beide doubletten. Op basis van de interferentietest blijkt dat deze breuk niet volledig afsluitend is en dat beide doubletten elkaar druktechnisch zien. Echter, dit effect is in vergelijking met de drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput van elk doublet erg klein.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
4/43

*Er zijn momenteel geen mijnbouwactiviteiten in de nabijheid van de geothermische installaties, daarom wordt er nu geen ondergrondse interferentie verwacht.*

*TNO-AGE acht de winning van aardwarmte bij Andijk I, zoals voorgesteld in het winningsplan, in overeenstemming met de principes van planmatig gebruik van de ondergrond in de genoemde geologische setting. Op basis van de historische productiegegevens is de winning van aardwarmte bij Andijk II vooralsnog in overeenstemming met de principes van planmatig gebruik van de ondergrond. Echter, de modelresultaten met het geprognoseerde debiet suggereren na enkele jaren een overschrijding van de maximale injectiedruk op reservoirdiepte. Of dit werkelijk het geval zal zijn hangt grotendeels af van de ontwikkeling van skin gedurende de tijd.*

*Daarnaast geven de modelresultaten, op basis van de gerealiseerde doubletconfiguraties, aan dat er al na 25 jaar 1°C afkoeling is op de vergunningsgrens. Dit is 10 jaar eerder dan de vergunde winningstermijn. Dit wordt veroorzaakt doordat de vergunninghouder de injectie- en productieputten heeft omgewisseld ten opzichte van de configuratie aangegeven in de winningsvergunningaanvraag.*

## **2. Bodemdaling**

TNO-AGE heeft de bodemdalingsprognose van de vergunninghouder geëvalueerd en eigenstandig nagerekend. Uitgaande van de huidige situatie komt TNO-AGE uit op een maximale bodemdaling van ca. 9 mm bij 1°C afkoeling op de vergunningsgrens (na 25 jaar) en ca. 13 mm aan het einde van de huidige winningsvergunning in 2054. Dit is enkel het gevolg van de krimp van het reservoir door afkoeling van het gesteente. Deze resulterende bodemdaling is iets groter dan het modelresultaat van de vergunninghouder (9 mm). Dit is zoals verwacht, aangezien TNO-AGE andere invoerparameters van het DoubletCalc2D model gebruikt dan de vergunninghouder, en vergunninghouder het resultaat al na 30 jaar presenteert i.p.v. 35 jaar.

De mate van bodemdaling neemt af naarmate de afstand tot de injectieputten groter wordt (Figuur 11, Bijlage 2). De verwachte bodemdaling ten gevolge van de aardwarmtewinning voor het dichtstbijzijnde natuurgebied (IJsselmeer) is maximaal ca. 3 mm na 25 jaar productie en 4 mm na 35 jaar productie (einde winningsvergunning).

*TNO-AGE concludeert dat de modelmatig berekende bodemdaling ten gevolge van de winning van aardwarmte ca. 9 mm is na 25 jaar productie en 13 mm na 35 jaar productie. Dit is in lijn met het modelresultaat van de vergunninghouder.*

## **3. Bodemtrilling**

Op basis van de KNMI-database concludeert zowel de vergunninghouder als TNO-AGE dat er geen historische (natuurlijke dan wel geïnduceerde) bevingen gemeten zijn in de nabije omgeving van de winningsvergunning voor aardwarmte Andijk.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
5/43

Vergunninghouder heeft conform de leidraad<sup>1,2</sup> een seismische hazard-risicoanalyse (SHRA) uitgevoerd voor de twee doubletten van Andijk als ware het één geothermisch systeem. Vergunninghouder komt uit op een genormaliseerde seismisch potentieel score van 0,31, en komt daarmee uit op een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit.

TNO-AGE heeft de analyse van de vergunninghouder geëvalueerd en eigenstandig nagerekend conform de leidraad<sup>1,2</sup>. TNO-AGE is van mening dat de systematiek [10] van de leidraad<sup>1,2</sup> niet bedoeld is om twee systemen (doubletten) samen te scoren, zoals de vergunninghouder gedaan heeft. Daarom heeft TNO-AGE de beide systemen apart geëvalueerd. Echter, om de uitkomst van de vergunninghouder te evalueren en vergelijken heeft TNO-AGE ook beide doubletten gezamenlijk gescoord en komt daarbij uit op een genormaliseerde score van 0,37. Deze score is hoger dan die van de vergunninghouder en resulteert in een gemiddeld potentieel voor het induceren van seismiciteit. Het resultaat van TNO-AGE wijkt af van de uitkomst van de vergunninghouder doordat TNO-AGE een hogere score geeft aan de categorieën “breukoriëntatie in huidig spanningsveld” (10 i.p.v. 7) en “Debiet” (10 i.p.v. 7).

Daarnaast heeft TNO-AGE voor beide systemen (Andijk I en Andijk II) de leidraad<sup>1,2</sup> individueel ingevuld en geëvalueerd. Dit resulteert in een genormaliseerde seismisch potentieel score van 0,33 voor Andijk I en 0,34 voor Andijk II. Het verschil tussen beide systemen wordt verklaard doordat Andijk II een hogere injectiedruk nodig heeft om het geprognostiseerde debiet te realiseren en omdat Andijk II het maximale debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur zeer waarschijnlijk niet kan halen. Daarmee valt Andijk I in de categorie met een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit. De score van Andijk II (0,34) resulteert in een seismische dreiging die de grens tussen laag en gemiddeld net overschrijdt.

Breuken kunnen (deels) minder stabiel worden als gevolg van spanningsafname door afkoeling. De modelresultaten suggereren dat na 25 jaar (moment van 1°C afkoeling op de vergunningsgrens) de mate van afkoeling op de dichtstbijzijnde breuken naar verwachting ca. 10°C voor Andijk I en 27°C voor Andijk II is. In het geval productie doorloopt tot einde van de huidige winningsvergunning (35 jaar) is de mate van afkoeling op dichtstbijzijnde breuken ca. 14°C voor Andijk I en 51°C voor Andijk II.

*TNO-AGE komt uit op een lage seismische dreiging voor Andijk I, en voor Andijk II een seismische dreiging die de grens tussen laag en gemiddeld net overschrijdt. Dit wijkt af van het resultaat van de vergunninghouder, die uitkomt op een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit voor beide systemen gezamenlijk.*

---

<sup>1</sup> Q-Con en IF Technology, 2016. Defining the framework for Seismic Hazard Assessment in Geothermal Projects. Kennisagenda project.

<sup>2</sup> TNO-AGE ziet de leidraad<sup>1</sup> als een goede eerste stap om tot een bruikbare SHRA voor geothermie te komen, maar is van mening dat deze in de huidige vorm sub-optimaal is om een eenduidige en adequate inschatting van de seismische dreiging van een geothermische operatie te geven. De audit resultaten dienen derhalve met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
6/43

*Conform de leidraad<sup>1,2</sup> zou de vergunninghouder daarom een evaluatie van de locatie specifieke seismische dreiging uit moeten voeren voor het systeem Andijk II.*

### **Conclusie en aanbevelingen**

Resumerend ziet TNO-AGE geen geotechnische belemmeringen betreffende de berekening van de verwachte bodemdaling.

Voor wat betreft de planmatige en efficiënte winning van aardwarmte ziet TNO-AGE momenteel geen geotechnische belemmeringen. Echter, voor Andijk II ziet TNO-AGE in de toekomst mogelijk wel belemmeringen omdat de modelresultaten suggereren dat na enkele jaren van productie een overschrijding van de maximale injectiedruk op reservoirdiepte optreedt. Het is echter wel mogelijk dat de injectiviteit gedurende de tijd verbetert, waardoor het voorgestelde debiet mogelijk wel gehaald kan worden. TNO-AGE suggereert daarom om de maximale injectiedruk als leidend te beschouwen en geen verlaging van het debiet op te leggen. Hierdoor houdt de vergunninghouder de mogelijkheid om, indien de injectiviteit inderdaad verbetert, in de toekomst met het voorgestelde debiet te blijven produceren.

Modelmatig ziet TNO-AGE bij Andijk II een grensoverschrijding van 1°C na 25 jaar productie. Dit is eerder dan de vergunde 35 jaar. TNO-AGE geeft daarom drie opties ter overweging mee:

- 1) Vergroting van het oppervlak van de winningsvergunning zodat de 1°C afkoelingscontour na 35 jaar productie binnen de vergunningsgrens blijft;
- 2) Beperking van de duur van de winningsvergunning tot 25 jaar, maar dit lijkt niet doelmatig voor Andijk I omdat deze na 25 jaar nog geen grensoverschrijding heeft volgens het model;
- 3) De vergunninghouder verzoeken om binnen een redelijke termijn, maar tenminste voordat er 75 miljoen m<sup>3</sup> water (25 jaar productie met 350 m<sup>3</sup>/uur) geproduceerd is door het doublet Andijk II, een evaluatie aan te leveren met de modellering van de verbreiding van de koudwaterbel op dat moment. Hieruit moet blijken of de injectie van koud water bij Andijk II al dan niet gestaakt moet worden.

De SHRA methodiek zoals geïmplementeerd<sup>1,2</sup> resulteert in een lage seismische dreiging voor Andijk I, en voor Andijk II een seismische dreiging die de grens tussen laag en gemiddeld net overschrijdt. Conform de leidraad<sup>1,2</sup> zou de vergunninghouder daarom een evaluatie van de locatie specifieke seismische dreiging uit moeten voeren voor het systeem Andijk II. TNO-AGE geeft ter overweging mee om in te stemmen met het winningsplan onder de voorwaarde dat de injectiedruk van Andijk II verlaagd wordt tot onder de 4 MPa. Deze verlaging zorgt ervoor dat Andijk II, conform de leidraad<sup>1,2</sup>, in de categorie met een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit valt. Indien de vergunninghouder een hogere (>4 MPa) injectiedruk wenst, valt Andijk II in de categorie met een gemiddeld potentieel voor het induceren van seismiciteit. De vergunninghouder wordt dan verzocht om, conform de leidraad<sup>1,2</sup>, een evaluatie van de locatie specifieke seismische dreiging aan te leveren voor Andijk II. Daarbij dient extra aandacht gegeven te worden aan de effecten van afkoeling op de maximaal op te leggen injectiedruk en op de dichtstbijzijnde breuken.

Ik verwacht u hiermee van dienst te zijn geweest.

Met vriendelijke groet,



  
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken en Klimaat

Bijlage 1: geotechnische evaluatie winningsplan geothermie Andijk  
Bijlage 2: resultaten DoubletCalc modelberekeningen  
Bijlage 3: SHRA evaluatie kaarten  
Bijlage 4: erratalijst

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
7/43

## **Bijlage 1: geotechnische evaluatie winningsplan geothermie Andijk**

Ter ondersteuning van het door het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) te nemen instemmingsbesluit betreffende het winningsplan voor de twee geothermiesystemen bij Andijk [1], heeft TNO-AGE een geotechnische evaluatie uitgevoerd van het aangeleverde winningsplan [1]. In deze rapportage worden de resultaten en bevindingen van de door TNO-AGE uitgevoerde evaluatie beschreven.

### **1. Configuratie aardwarmtesysteem**

In het gebied dat is gedefinieerd als de winningsvergunning voor aardwarmte Andijk (ca. 4,6 km<sup>2</sup>) liggen twee doubletten die elk afzonderlijk van elkaar produceren. Beide systemen zijn sinds begin 2019 in productie en zijn gericht op de watervoerende lagen van de Slochteren Formatie, die zich bevindt op een diepte van ca. 1800 m. De stroming van warm water naar de productieput en injectie van afgekoeld water vindt plaats door en in de poreuze gesteentematrix van deze formatie. De winningsvergunning Andijk is bij beschikking, met kenmerk DGKE-WO/19125675, op 23 mei 2019 verleend aan ECW Geoholding B.V. en verloopt in mei 2054. Daarmee is de totale duur van de vergunde warmteproductie ruim 35 jaar. De gewonnen warmte wordt gebruikt door glastuinbouwbedrijven.

Andijk Geothermie 1/2 (hierna: Andijk I) is het eerste doublet dat gerealiseerd is en bestaat uit een productieput (ADK-GT-01-S1) en een injectieput (ADK-GT-02). Het tweede doublet Andijk Geothermie 3/4 (hierna: Andijk II) bestaat uit een productieput (ADK-GT-03) en een injectieput (ADK-GT-04). Een schematisch overzicht van de putten wordt gepresenteerd in Figuur 9, 10, 11 en 12 van [1].

De vergunninghouder geeft in Figuur 7 van [1] een principeschets van de aardwarmtesystemen Andijk I en II. Uit deze schets is echter niet eenduidig op te maken of beide doubletten gescheiden zijn of één systeem vormen. In supplement Z [4] van de winningsvergunningsaanvraag [2] wordt een ander principeschema gegeven. Dit schema suggereert dat beide doubletten gescheiden van elkaar produceren, dus twee afzonderlijke systemen zijn. Uit de maandelijks aangeleverde productiedata blijkt ook dat beide systemen onafhankelijk van elkaar produceren.

Op basis van de productiedata en het principeschema in [4] neemt TNO-AGE aan dat beide systemen een gescheiden zoutwatercirculatie hebben en afzonderlijk van elkaar warmte produceren. Echter de twee aardwarmtesystemen leveren de geproduceerde warmte wel aan hetzelfde warmtenet.

### **2. Toekomstige uitbreidingen**

De vergunninghouder heeft vooralsnog geen plannen om de aardwarmtesystemen uit te breiden met additionele putten. Ook stimuleringsmaatregelen op bestaande putten zijn op korte termijn niet voorzien. Wel geeft vergunninghouder op pagina 2



van [1] aan dat de productie mogelijk verbeterd kan worden door verdere uitkoeling van het productiewater en/of hogere debieten te gebruiken. Deze opties zijn echter niet gepresenteerd in het winningsplan [1] en zullen ook niet geëvalueerd worden door TNO-AGE.

### **3. Evaluatie put-, reservoir- en productiegegevens**

TNO-AGE heeft een evaluatie uitgevoerd van de in het winningsplan [1] beschreven put-, reservoir- en productiegegevens die als invoer dienen voor de reservoir modellering. Indien tot andere inzichten is gekomen wordt dat in deze paragraaf beschreven.

#### *3.1 Putgegevens*

De door de aanvrager in paragraaf 4.3 [1] gerapporteerde putgegevens, m.b.t. locaties en putconfiguraties, komen overeen met die in de End Of Well Reports (EOWR) van de vier putten. TNO-AGE heeft deze gegevens overgenomen voor de modelberekeningen. In de aangeleverde putschema's (Figuur 9 t/m 12 van [1]) ziet TNO-AGE dat put ADK-GT-01 niet volledig gecementeerd is. Het niet volledig gecementeerde interval is tussen de 1217 en 1373 mAH [13]. Dit interval komt stratigrafisch overeen met de Landen en de Ommelanden Formaties.

#### *3.2 Reservoirgegevens*

In paragraaf 4.4 van [1] worden de reservoir eigenschappen beschreven. Tabel 6 [1] geeft de reservoir parameterwaarden zoals die op basis van putgegevens van de vier putten van Andijk zijn bepaald. Tabel 7 [1] geeft de gemiddelde reservoir parameterwaarden, met spreiding, voor het vergunningsgebied en voor de reservoirmodellering. Deze waarden zijn door TNO-AGE geëvalueerd, en zo nodig aangepast o.b.v. eigen analyses, alvorens ze gebruikt zijn voor de reservoirmodellering. De reservoir parameterwaarden per put, zoals door TNO-AGE gebruikt voor de reservoirmodellering, zijn gegeven in Tabel 2 en 3.

#### Diepte en bruto dikte

De vergunninghouder presenteert in het winningsplan een top reservoir dieptekaart (Figuur 13 [1]) en bruto diktekaart (Figuur 17 [1]) uit 2017. Deze kaarten, die waarschijnlijk pre-drill zijn gemaakt, zijn aangepast o.b.v. de diepte en dikte van het reservoir zoals aangetroffen in de putten.

TNO-AGE heeft op basis van logmetingen de diepte van de top van het reservoir en de bruto dikte bepaald. Deze wijken licht af van de door vergunninghouder opgegeven waarden.

#### Netto/bruto verhouding

De vergunninghouder geeft in Tabel 6 van [1] een netto-bruto waarde van 98% voor alle vier de putten. TNO-AGE heeft de netto-bruto verhouding bepaald o.b.v. logmetingen in de putten en komt op een vergelijkbare waarde.

#### Porositeit

In Tabel 6 van [1] geeft de vergunninghouder een porositeit van 21,5% tot 22%. Voor de modelberekeningen is TNO-AGE uitgegaan van de porositeitswaarde van

20%, die gebruikt is in de geotechnische evaluatie [3] van het TNO-AGE advies voor de winningsvergunningaanvraag. Deze waarde is bepaald door de uit de puttest resulterende permeabiliteit om te zetten naar een porositeitwaarde, gebruikmakend van een door TNO-AGE bepaalde porositeit-permeabiliteit relatie.

#### Permeabiliteit

In Tabel 6 [1] worden verschillende waarden voor de permeabiliteit gegeven o.b.v. petrofysische-, puttest- en interferentietest analyses. Daarnaast geeft aanvrager een porositeits- en permeabiliteitskaart uit 2010 (Figuur 20 en 21). De petrofysische permeabiliteit van 200 – 1000 mD is waarschijnlijk gebaseerd op een petrofysische analyse uitgevoerd door PanTerra Geoconsultants B.V. (hierna: PanTerra) voor de aanvraag van SDE+ subsidie in 2014 [5] en is dus niet gebaseerd op directe data uit de vier geothermische putten.

De vergunninghouder geeft in Tabel 6 van [1], op basis van meerdere puttesten, een permeabiliteit voor elke put. De interpretatie van de puttest in ADK-GT-01-S1 [6] is door TNO-AGE gecontroleerd en geeft een permeabiliteit van 128 mD en een skin van -2,5.

In [9] geeft vergunninghouder de evaluatie van de ADK-GT-02, -03 en -04 puttesten. Tijdens deze puttesten zijn ook interferentietesten uitgevoerd tussen de verschillende putten [8]. De permeabiliteit die uit deze drie puttesten volgt is respectievelijk 270, 229 en 266 mD voor ADK-GT-02, -03 en -04.

De vergunninghouder rapporteert een permeabiliteit van 300 – 400 mD resulterend uit de interferentietesten tussen ADK-GT-01-S1 en -02 en 320 mD tussen ADK-GT-01-S1, -03 en -04. Voor de analyse van de puttesten zijn een aantal aannames gebruikt, die met name de interpretatie van de interferentietesten onzeker maken (porositeit en compressibiliteit). Om die reden houdt TNO-AGE de permeabiliteit aan die uit de puttesten volgt. Deze permeabiliteitswaarden wijken in zeer beperkte mate af van die van de vergunninghouder omdat TNO-AGE een eigen inschatting van de netto-dikte gebruikt om de uit de puttest resulterende permeabiliteitsdikte (permeabiliteit \* netto dikte) om te rekenen naar een permeabiliteit. Voor de modellering in DoubletCalc2D zal TNO-AGE een permeabiliteitsgrid gebruiken.

#### Saliniteit formatiewater

De vergunninghouder geeft in Tabel 8 van [1] een formatiewatersamenstelling met een concentratie (TDS NaCl - Total Dissolved Solids NaCl equivalent) van 189.000 ppm. Deze waarde is afkomstig uit de analyse van de puttest van ADK-GT-01-S1 [6]. In deze puttest wordt vermeld dat de saliniteit van het formatiewater gecorrigeerd moet worden voor temperatuur- en drukveranderingen en dat hieruit blijkt dat de saliniteit 189 kg/m<sup>3</sup> NaCl equivalent is. In Tabel 8 van [1] wordt ook de dichtheid van het water gegeven, respectievelijk 1,12 g/l voor ADK-GT-01-S1 en 1,11 g/l voor de overige 3 putten. Er is niet aangegeven bij welke temperatuur deze waarden zijn bepaald.

De vergunninghouder geeft in Tabel 9 van [1] een wateranalyse van de put ADK-GT-02. TNO-AGE beschikt daarnaast ook over een wateranalyse [7] van de put

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
11/43

ADK-GT-01-S1. Op basis van deze samenstellingen berekent TNO-AGE een TDS van ca. 150.300 ppm en een dichtheid van 1,12 g/l bij 25°C. De concentratie NaCl equivalent, overeenkomstig met een TDS van ca. 150.300 ppm, is ca. 147.000 ppm.

Uit de analyse van TNO-AGE van de watersamenstellingen blijkt dat beide monsters, ADK-GT-01 [7] en ADK-GT-02 (Tabel 9 in [1]), ionisch niet in balans zijn. Hierdoor is deze concentratie waarschijnlijk te laag en niet representatief. Om deze reden zal TNO-AGE een TDS NaCl van 189.000 ppm afkomstig van de puttest [6] gebruiken voor de modelberekeningen.

### Temperatuur

In Tabel 7 van [1] stelt de vergunninghouder dat de geothermische gradiënt een spreiding heeft van 3,4 tot 3,6°C per 100 meter. Echter, op basis van Tabel 6 van [1] berekent TNO-AGE een gemiddelde geothermische gradiënt van 3,7°C per 100 meter.

De maandelijks maximaal gerapporteerde productietemperatuur is ca. 82°C voor Andijk I en ca. 81°C voor Andijk II, maar aangezien deze aan de oppervlakte wordt gemeten heeft er al enige afkoeling plaatsgevonden van het reservoir naar de oppervlakte. De geothermische gradiënt die hoort bij een temperatuur van ca. 81°C aan de oppervlakte is volgens DoubletCalc1D 3,67°C per 100 m. TNO-AGE gebruikt een temperatuur van 82°C voor de reservoirmodellering in DoubletCalc2D en een geothermische gradiënt van 3,69°C per 100 m voor de modellering in DoubletCalc1D.

### Reservoirdruk

In Tabel 1 staat een overzicht van de reservoirdruk per put aan de hand van verschillende beschikbare bronnen.

*Tabel 1: Overzicht van de reservoirdruk per put aan de hand van verschillende bronnen.*

| Reservoirdruk [bar] |               |               |                      |                                      |      |
|---------------------|---------------|---------------|----------------------|--------------------------------------|------|
| Put                 | Winningsplan  |               | Puttest ADK-GT-01-S1 | Interferentie-/puttest mid-reservoir | DC1D |
|                     | Top reservoir | Mid reservoir |                      |                                      |      |
| Andijk-GT-01-S1     | 205,2         | 212           | 205,2                | -                                    | 195  |
| Andijk-GT-02        | 194           | 205           | -                    | 197,7                                | 186  |
| Andijk-GT-03        | 205,2         | 212           | -                    | 205,5                                | 196  |
| Andijk-GT-04        | 195           | 203           | -                    | 196                                  | 188  |

De reservoirdruk van ADK-GT-01-S1 [6] is gemeten op een diepte van 1900 mTVD in het reservoir. De bepaling van de reservoirdrukken bij de interferentietesten [8] en puttest analyses in [9] zijn nog met een bepaalde onzekerheid omgeven omdat er geen drukmetingen op reservoirniveau zijn uitgevoerd. De opgegeven reservoirdrukken zijn extrapolaties van drukmetingen hoog in het boorgat (b.v. nabij de ESP).

In DoubletCalc1D word op basis van de ingevoerde parameters een reservoirdruk berekend. De reservoirdruk in DoubletCalc1D wijkt af van de drukken die

**Datum**  
13 december 2019

gemeten/bepaald zijn in de puttest en interferentietesten. Dit komt doordat DoubletCalc1D standaard uitgaat van hydrostatische druk in het reservoir.

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

Voor de modelberekeningen zal TNO-AGE gebruik maken van de reservoirdrukken die gemeten zijn tijdens de puttest [6] van ADK-GT-01-S1 en bepaald zijn tijdens de interferentietest analyse in [8] en puttestanalyses van ADK-GT-01, -02, -03 & -04 in [9].

**Blad**  
12/43

*Tabel 2: Overzicht van reservoir eigenschappen van Andijk I zoals gegeven door de vergunninghouder in het winningsplan [1] en zoals bepaald door TNO-AGE.*

| Reservoir eigenschap                          | Vergunninghouder |           | TNO-AGE   |           | Opmerkingen                                                                  |
|-----------------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------------------------------------------------------|
|                                               | ADK-GT-01        | ADK-GT-02 | ADK-GT-01 | ADK-GT-02 |                                                                              |
| Diepte top reservoir (mTVD)                   | 1869             | 1783      | 1870      | 1785      | Diepte en bruto dikte TNO-AGE o.b.v. log interpretatie                       |
| Bruto dikte (m)                               | 181              | 204       | 174       | 204       |                                                                              |
| Netto dikte (m)                               | 177              | 200       | 171       | 200       | -                                                                            |
| Netto-bruto (%)                               | 98               | 98        | 98        | 98        |                                                                              |
| Porositeit (%)                                | 21,5             | 22        | 20        | 20        | Gelijk aan de evaluatie van winningsvergunning aanvraag [3].                 |
| Permeabiliteit puttest/interferentietest (mD) | 128              | 270       | 131       | 270       | Permeabiliteitsdikte en netto dikte gebruikt om permeabiliteit te berekenen. |
| Saliniteit ppm (TDS NaCl equivl.)             | 189.000          | 189.000   | 189.000   | 189.000   |                                                                              |
| Reservoirdruk top reservoir [bar]             | 205,2            | 194       | 205,2     | 197,7     | Overgenomen uit [6] en [9].                                                  |

*Tabel 3: Overzicht van reservoir eigenschappen van Andijk II zoals gegeven door de vergunninghouder in het winningsplan [1] en zoals bepaald door TNO-AGE.*

| Reservoir eigenschap                          | Vergunninghouder |           | TNO-AGE   |           | Opmerkingen                                                                  |
|-----------------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------------------------------------------------------|
|                                               | ADK-GT-03        | ADK-GT-04 | ADK-GT-03 | ADK-GT-04 |                                                                              |
| Diepte top reservoir (mTVD)                   | 1876             | 1802      | 1878      | 1805      | Diepte en bruto dikte TNO-AGE o.b.v. log interpretatie                       |
| Bruto dikte (m)                               | 164              | 130       | 163       | 128       |                                                                              |
| Netto dikte (m)                               | 161              | 127       | 160       | 125       | -                                                                            |
| Netto-bruto (%)                               | 98               | 98        | 98        | 98        |                                                                              |
| Porositeit (%)                                | 21,5             | 22        | 20        | 20        | Gelijk aan de evaluatie van winningsvergunning aanvraag [3].                 |
| Permeabiliteit puttest/interferentietest (mD) | 229              | 266       | 229       | 269       | Permeabiliteitsdikte en netto dikte gebruikt om permeabiliteit te berekenen. |
| Saliniteit ppm (TDS NaCl equivl.)             | 189.000          | 189.000   | 189.000   | 189.000   |                                                                              |
| Reservoirdruk top reservoir [bar]             | 205,2            | 195       | 205,5     | 196       | Overgenomen uit [6] en [9].                                                  |

### 3.3 Productiegegevens en productieprognose

De gegevens die de vergunninghouder in Tabellen 13 t/m 16 [1] geeft karakteriseren de productie van beide geothermische systemen, onder beoogde standaard operationele condities. De getallen genoemd in Tabellen 13 t/m 16 [1] komen overeen met de productieprognose in de overige figuren en tabellen in deze paragraaf.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
13/43

Uit de geprognostiseerde productiedata (Tabel 10 en 17 in [1]) blijkt dat de vergunninghouder, voor beide doubletten, een “flat rate debiet” hanteert van 350 m<sup>3</sup>/uur en 8760 vollasturen gedurende een jaar. De vergunninghouder geeft aan (Tabel 10 [1]) dat de maandelijkse debieten 20% kunnen afwijken in een bepaald jaar, naar gelang de voortgang van de productie en onderhoud van het systeem. Dit betekent dat het maximale debiet mogelijk 420 m<sup>3</sup>/uur is.

Daarnaast geeft de vergunninghouder aan rekening te houden met een gepland onderhoud van het systeem om de vijf jaar. In het jaar van onderhoud stelt de vergunninghouder het aantal vollasturen op ~92% van het maximale aantal uren per jaar.

De geprognostiseerde debieten zijn hoger dan de tot nu toe gerealiseerde debieten. Het maximaal behaalde debiet in Andijk I is ca. 296 m<sup>3</sup>/uur en voor Andijk II 326 m<sup>3</sup>/uur, zoals blijkt uit Mijnwettelijk aangeleverde maandelijkse productiedata.

In Tabel 13 t/m 16 van [1] geeft de vergunninghouder aan 0,01 l/m<sup>3</sup> inhibitorvloeistof in te brengen. Dit komt overeen met de hoeveelheid ingebrachte inhibitor zoals gerapporteerd in Tabel 17 [1] en met wat maandelijks gerapporteerd wordt door vergunninghouder aan TNO-AGE.

Gedurende het productieproces vindt bijvangst van opgelost aardgas plaats. De vergunninghouder vermeldt in het winningsplan [1] dat deze bijvangst ca. 0,42 m<sup>3</sup> gas per m<sup>3</sup> water is. Hetgeen in lijn is met de gerapporteerde productiedata waaruit blijkt dat de verhouding tussen geproduceerd gas en water 0,41 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> is. Vergunninghouder geeft aan dat het mee geproduceerde gas na behandeling nuttig aangewend wordt in de stookinstallatie.

#### **4. Modelleren aardwarmteproductie**

De vergunninghouder presenteert in Figuur 29, 30 en 31 van [1] het resultaat van een reservoirmodelleren van de twee geothermische systemen bij Andijk o.b.v. DoubletCalc2D. De modelleren is uitgevoerd voor beide systemen samen.

TNO-AGE heeft beide systemen gemodelleerd in DoubletCalc1D. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de huidige gerealiseerde productie, zoals bekend uit de productiecijfers (Figuur 2 en 3 in Bijlage 2), en de geprognostiseerde productie, zoals gegeven in het winningsplan (Figuur 4 en 5 in Bijlage 2). Daarnaast zijn beide systemen gezamenlijk gemodelleerd in DoubletCalc2D (Figuur 6 t/m 8 in Bijlage 2). De invoerwaarden zijn deels overgenomen van de in het winningsplan [1] gerapporteerde put- en reservoirgegevens. Echter, op basis van een evaluatie van deze gegevens, zoals hierboven beschreven, komt TNO-AGE voor bepaalde parameters tot andere inzichten en heeft daarvoor afwijkende waarden (zie Tabel 2 en 3) gebruikt in de modelleren. De uitkomsten van de modelberekeningen zijn vergeleken met de reeds beschikbare productiedata.

#### 4.1 DoubletCalc1D

##### Andijk I & Andijk II – huidige productie

Als eerste heeft TNO-AGE voor zowel Andijk I als Andijk II een DoubletCalc1D scenario opgesteld dat de huidige productie representeert, voor de maanden dat het systeem actief is. De uitvoer van deze scenario's is gegeven in Figuur 2 en 3 in Bijlage 2. Het pompdrukverschil is zo gekozen dat een debiet van 296 en 326 m<sup>3</sup>/uur wordt berekend voor respectievelijk Andijk I en Andijk II. Deze debieten komen overeen met het hoogst behaalde debiet sinds start productie. De resultaten, in termen van vermogen en druk, sluiten goed aan bij de aangeleverde productiedata en ook de ingevoerde skin waarden komen goed overeen met de skin waarden die volgen uit een analyse van de productiedata door TNO-AGE.

##### Andijk I & Andijk II – geprognostiseerde productie

TNO-AGE heeft voor zowel Andijk I als Andijk II ook het geprognostiseerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur gemodelleerd in DoubletCalc1D (Figuur 4 en 5 in Bijlage 2). Dit met als doel om een inschatting te kunnen maken van het verwachte vermogen bij een gemiddeld debiet van ca. 350 m<sup>3</sup>/uur en een indicatie van de injectiedruk op reservoirdiepte te verkrijgen. Het vermogen dat resulteert uit beide scenario's is ca. 19 MW. De injectiedruk op reservoirdiepte die daarvoor nodig is verschilt echter tussen beide systemen: 27 en 53 bar voor respectievelijk Andijk I en Andijk II.

#### 4.2 DoubletCalc2D

Bij het opstellen van een DoubletCalc2D model is TNO-AGE uitgegaan van één scenario waarin beide doubletten meegenomen worden. TNO-AGE gebruikt net als de vergunninghouder zowel grids als constante waarden als invoer voor DoubletCalc2D. De keuze van TNO-AGE voor de constante invoerwaarden is grotendeels gelijk aan die gegeven door vergunninghouder in Tabel 6 en 7 van [1], op de bruto dikte en saliniteit na.

De door de vergunninghouder ingevoerde waarde in DoubletCalc2D voor de bruto dikte komt niet overeen met de gemiddelde bruto dikte die berekend kan worden met de waarden die in Tabel 6 [1] staan, het is niet duidelijk waar deze dikte op gebaseerd is. Wat betreft de saliniteit, gebruikt vergunninghouder de TDS NaCl equivalent die volgt uit Tabel 9 van [1]. Terwijl vergunninghouder in Tabel 8 van [1] de saliniteit geeft die volgt uit de puttest van ADK-GT-01-S1. Verder geeft vergunninghouder in Figuur 28 van [1] aan dat de injectietemperatuur in het DoubletCalc2D model 35°C is, terwijl in de productieprognoses in Tabel 15 en 16 [1] een gemiddelde injectietemperatuur van 30°C gegeven wordt. TNO-AGE gebruikt in haar modelberekeningen een injectietemperatuur van 30°C zoals gegeven is in Tabel 15 en 16 van [1].

De vergunninghouder heeft een temperatuur, top reservoir en permeabiliteitskaart gebruikt voor de invoer van het model (Figuur 26 van [1]). TNO-AGE gebruikt daarentegen de top reservoir-, reservoirdikte- en permeabiliteitskaart, welke gemaakt zijn door interpolatie van de putwaarden zoals gegeven in Tabel 1 en 2.

De totale productietijd van productiestart tot het einde van de winningsvergunningstermijn is 35 jaar. In Figuur 29, 30 en 31 in [1] presenteert de

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
15/43

vergunninghouder het resultaat van zijn reservoirmodel na 30 jaar productie. TNO-AGE presenteert in Figuur 6 t/m 8 in Bijlage 2 het resultaat na 35 jaar productie en dus aan het werkelijke eind van de huidige winningsvergunningstermijn.

TNO-AGE neemt aan, op basis van de interferentietesten [8], dat de breuken in het gebied, zoals geïnterpreteerd in Figuur 13 in [1], deels afsluitend zijn. De interferentietest [8] laat zien dat er drukcommunicatie is tussen Andijk I en Andijk II en dat de breuk niet volledig afsluitend is. Voor de breuken tussen ADK-GT-01-S1 & -03 en ADK-GT-01-S1 & -04 zijn breukpermeabiliteiten van respectievelijk 0,03 mD en 0,33 mD afgeleid. Om deze reden heeft TNO-AGE in de simulatie een gemiddelde breukpermeabiliteit van 0,1 mD aangehouden. De vergunninghouder heeft geen breuken meegenomen in haar DoubletCalc2D model.

#### *Maximum Tubing Head Pressure en Injectiedruk*

De maximale Tubing Head Pressure (hierna: maximum THP) wordt bepaald door het protocol ter bepaling van de maximale injectiedruk opgesteld door SodM [12]. TNO-AGE berekent volgens dat protocol een maximum THP van 46 bar voor Andijk I en 47 bar voor Andijk II. Deze waarden wijken af van wat de vergunninghouder opgeeft in Figuur 23 en 24. Dit verschil wordt veroorzaakt omdat TNO-AGE een andere reservoirdruk aanneemt bij de injectieputten ten opzichte van de vergunninghouder.

Op pagina 41 van [1] geeft vergunninghouder aan dat de maximale THP die gebaseerd is op het huidige SodM protocol te conservatief is. Er wordt volgens vergunninghouder geen rekening gehouden met de dynamische drukval over de verbuizing. Omdat het drukverlies door wrijving (dynamische drukval) langs de verbuizing bij hogere debieten substantieel kan zijn, heeft de vergunninghouder deze drukval uitgerekend voor beide injectieputten. Vervolgens telt vergunninghouder de dynamische drukval op bij de maximale THP volgens het SodM protocol. Hieruit volgt dat de maximale THP voor Andijk I met 4,4 bar verhoogd kan worden en met 4,3 bar voor Andijk II.

TNO-AGE berekent in haar eigen analyse een dynamische drukval die min of meer gelijk is aan de dynamische drukval die berekend is door de vergunninghouder.

TNO-AGE wil opmerken dat het SodM protocol is opgesteld om de maximale injectiedruk bij aardwarmtewinning te bepalen. Zolang de vergunninghouder geen ontheffing heeft gekregen van SodM om met een hogere injectiedruk te injecteren dan volgens het SodM protocol, moet de vergunninghouder zich houden aan dit protocol.

#### *Te produceren hoeveelheid water volgens productieprognose*

TNO-AGE heeft een DoubletCalc2D scenario opgesteld waarin de historische productie alsmede een productieprognose o.b.v. een gemiddeld debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur per doublet is gemodelleerd. De vergunninghouder geeft aan om de vijf jaar onderhoud te plegen aan het systeem, waardoor het gemiddelde debiet in dat jaar lager is. De skin waarden zijn zo afgestemd dat de resulterende verschildruk overeenkomt met de verschildruk afgeleid van de productiedata.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
16/43

Volgens de modelberekeningen is de hoeveelheid water die vanaf 1 januari 2019 is geproduceerd en gedurende de resterende vergunningsduur (tot 4 juli 2054) wordt geproduceerd, uitgaande van een gemiddelde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur, 107 miljoen m<sup>3</sup> per doublet en totaal voor beide doubletten 214 miljoen m<sup>3</sup>. Vanaf 1 januari 2020 betekent dit een jaarlijks geproduceerd watervolume van 3,1 miljoen m<sup>3</sup> per doublet en totaal voor beide doubletten 6,2 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.

#### *Afkoeling reservoir*

In Bijlage 2 wordt het resulterende beïnvloedingsgebied m.b.t. temperatuur gepresenteerd. Het modelresultaat toont aan dat bij Andijk II na 25 jaar er 1°C afkoeling op de vergunningsgrens optreedt (Figuur 8). Daarnaast is uit de modelresultaten op te maken dat productieput ADK-GT-01-S1 na 38 jaar 1°C afkoeling ziet en productieput ADK-GT-03 na 33 jaar 1°C afkoeling ziet. Figuur 10 toont de reservoirtemperatuur aan het eind van de huidige winningsvergunning, na 35 jaar productie.

Het modelresultaat komt niet geheel overeen met de uitkomsten van het DoubletCalc2D model t.b.v. het advies [3] voor de winningsvergunningaanvraag (na 36 jaar afkoeling van 1°C op de vergunningsgrens). Dit komt voornamelijk doordat de gerealiseerde systeemconfiguratie anders is dan aangegeven in de winningsvergunningaanvraag. In de aanvraag van de winningsvergunning worden putten ADK-GT-01-S1 en ADK-GT-03 aangeduid als injectieput en de putten ADK-GT-02 en ADK-GT04 als productieput. In het Winningsplan [1] zijn de injectie- en productieputten omgedraaid. Daarnaast is in de DoubletCalc2D evaluatie van de winningsvergunning aanvraag een debiet van 317 m<sup>3</sup>/uur gebruikt. De invloed van dit verschil in debiet (350 m<sup>3</sup>/uur i.p.v. 317 m<sup>3</sup>/uur) op de grensoverschrijding is echter erg klein.

Breuken kunnen (deels) minder stabiel worden door een verandering van de verhouding tussen de normaal- en schuifspanning als gevolg van thermisch geïnduceerde spanningsafname. Dit zogenaamde thermo-elastische effect op breuken is momenteel ook nog niet meegenomen in de SHRA-methode van Qcon en IF [10] en dient in het algemeen nader te worden onderzocht. TNO-AGE wil wel opmerken dat de modelresultaten (Figuur 9 in Bijlage 2) aantonen dat bij vergunningsgrens overschrijding (na 25 jaar) de mate van afkoeling op de dichtstbijzijnde breuken naar verwachting ca. 10°C voor Andijk I en 27°C voor Andijk II is. In het geval productie door loopt tot einde van de huidige winningsvergunning (35 jaar) is de mate van afkoeling op dichtstbijzijnde breuken ca. 14°C voor Andijk I en 51°C voor Andijk II (Figuur 10). Het is aan te raden dat de vergunninghouder het effect van temperatuur op de lokale breuken nader laat onderzoeken.

#### *Drukinvloed op reservoir*

De beïnvloeding van de reservoirdruk door het productieproces na 25 jaar is weergegeven in Figuur 10 in Bijlage 2. Hieruit valt op te maken dat het verschil ten opzichte van de statische reservoirdruk na 25 jaar productie buiten de huidige vergunningsgrens maximaal ca. 5 bar is. Het effect van de injectieput ADK-GT-02 op de dichtstbijzijnde breuken is ca. 6 bar t.o.v. de statische reservoirdruk en voor



**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
17/43

de injectieput ADK-GT-04 ca. 5 bar. De drukinvloed van de productieput ADK-GT-01-S1 op de dichtstbijzijnde breuk is ca. 8 bar en van ADK-GT-03 ca. 5 bar. Echter, in zijn algemeenheid lijkt een hoger drukverschil opgelegd door de productieput breuken stabiel te maken.

In het geval de productie doorloopt tot einde winningsvergunning wordt de beïnvloeding van de reservoirdruk door het productieproces weergegeven in Figuur 9 in Bijlage. Hieruit valt op te maken dat het verschil ten opzichte van de statische reservoirdruk na 35 jaar productie buiten de huidige vergunningsgrens maximaal ca. 5 bar is. Het effect van de injectieput ADK-GT-02 op de dichtstbijzijnde breuken is ca. 7 bar t.o.v. de statische reservoirdruk en voor de injectieput ADK-GT-04 ca. 5 bar. De drukinvloed van de productieput ADK-GT-01-S1 op de dichtstbijzijnde breuk is ca. 8 bar en van ADK-GT-03 ca. 5 bar. Echter, in zijn algemeenheid lijkt een hoger drukverschil opgelegd door de productieput breuken stabiel te maken.

#### *Injectiedruk*

Op basis van de ingevoerde modelparameters en productieprognoses berekent DoubletCalc2D de verschillendruk per tijdstap van de injectieputten op reservoirdiepte voor de gehele productieperiode. De maximale verschillendruk op reservoirdiepte volgens TNO-AGE op basis van het SodM protocol is 44 bar voor Andijk I en 47 bar voor Andijk II.

Modelmatig is na 35 jaar productie de verschillendruk bij injectieput ADK-GT-02 (Andijk I) op reservoirdiepte 30 bar en is dus ruim onder het maximum volgens het SodM protocol. Voor injectieput ADK-GT-04 van het tweede doublet (Andijk II) is de modelmatige verschillendruk na 35 jaar productie 61 bar. Een overschrijding van ruim 14 bar t.o.v. de maximale verschillendruk op reservoirdiepte volgens het SodM protocol [12].

Het modelresultaat in DoubletCalc2D laat zien dat de verschillendruk vanaf start productie toeneemt met elke tijdstap. Dit effect wordt modelmatig veroorzaakt door een toenemende mate en verbreiding van afkoeling in het reservoir, waardoor de viscositeit van het formatiewater toeneemt. Een hogere viscositeit van het formatiewater betekent dat er een hogere injectiedruk nodig is om het geproduceerde water terug te injecteren. Over de gehele productieperiode neemt de verschillendruk op reservoirdiepte van ADK-GT-04 toe van 41 naar 61 bar.

Dit is echter niet wat TNO-AGE observeert in de praktijk en berekent o.b.v. de productiegegevens. Op basis van de productiegegevens (van andere aardwarmtesystemen in het Rotliegend) ziet TNO-AGE eerder een verbetering van de injectiviteit over tijd. Op dit moment heeft de vergunninghouder het geprognostiseerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur voor Andijk II niet gerealiseerd. Het tot nu toe hoogst behaalde debiet van 326 m<sup>3</sup>/uur en de bijbehorende verschillendruk op reservoirdiepte is 39 bar. Lineaire extrapolatie van de tot nu toe berekende verschillendrukken van Andijk II op basis van de aangeleverde productiedata, suggereren dat de verschillendruk bij 350 m<sup>3</sup>/uur lager is dan wat DoubletCalc2D modelleert.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
18/43

Of de vergunninghouder het geprognostiseerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur werkelijk kan injecteren bij Andijk II zal moeten blijken, zolang de opgelegde injectiedruk lager blijft dan de maximale injectiedruk zoals bepaald middels het SodM protocol.

De vergunninghouder geeft aan dat per maand het debiet 20% hoger of lager kan zijn, naar gelang voortgang van productie en onderhoud. Dit houdt in dat het debiet 420 m<sup>3</sup>/uur kan worden. Hierdoor wordt de verschildruk op reservoirdiepte bij de injectieput ook hoger. Bij Andijk I is deze verschildruk op reservoirdiepte lager dan de maximale verschildruk volgens het SodM protocol. TNO-AGE geeft aan dat voor Andijk II op basis van huidige modelberekeningen een debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur niet gehaald lijkt te kunnen worden onder de geldende maximale injectiedruk [12].

## 5. Bodemdaling

In paragraaf 6.1 van [1] stelt de vergunninghouder dat er geen netto onttrekking van water uit het reservoir is, waardoor de druk in het reservoir gelijk blijft. Rondom de productieputten zal een plaatselijke drukdaling plaatsvinden door de productie van water, en rondom de injectieputten een plaatselijke drukstijging door de injectie van water. Daarnaast geeft vergunninghouder aan dat afkoeling van het reservoir kan leiden tot compactie. Het effect hiervan zal daarom het grootst zijn in de nabijheid van de injectieput. De vergunninghouder heeft het resultaat van het DoubletCalc2D model aangeleverd waarin te zien is dat een bodemdaling van ca. 9 mm kan worden verwacht na 30 jaar productie. Hierbij is uitgegaan van 30 jaar productie met een debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur per doublet.

De theorie onderliggend aan de compactieberekeningen in DoubletCalc2D lijkt vooralsnog adequaat te zijn. Voor een aantal parameters dienen aannames te worden gedaan omdat weinig tot geen data beschikbaar is om die locatie-specifiek te bepalen. Echter, de onzekerheid in deze parameters is naar verwachting niet dusdanig groot dat dit kan leiden tot een significant verschillend resultaat. Op basis hiervan gebruikt TNO-AGE ook DoubletCalc2D om een inschatting van de verwachte bodemdaling te geven.

Bij afkoeling van 1°C op de vergunningsgrens na 25 jaar modelleert TNO-AGE een verwachte maximale bodemdaling van 9 mm (Figuur 7 in Bijlage 2). Indien het eind van de huidige winningsvergunning wordt aangehouden verwacht TNO-AGE een maximale bodemdaling van 13 mm (Figuur 11 in Bijlage 2).

Het resultaat is iets groter dan het modelresultaat van de vergunninghouder. Dit is zoals verwacht omdat vergunninghouder het resultaat na 30 jaar presenteert en de invoerparameters van het DoubletCalc2D model van TNO-AGE verschillend zijn. TNO-AGE concludeert, o.b.v. de modelresultaten, dat de verwachte mate van bodemdaling zeer beperkt zal zijn.

## 6. Interferentie

De vergunninghouder beschrijft in paragraaf 5.4 in [1] dat er binnen de winningsvergunning Andijk geen interferentie plaatsvindt met andere mijnbouwactiviteiten. Vergunninghouder geeft aan dat het dichtstbijzijnde

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
19/43

Natura2000 gebied het IJsselmeer is, op een afstand van ca. 2 km. Dit wordt ondersteund door Figuur 44 van [1]. Daarnaast geeft vergunninghouder in Figuur 45 van [1] een overzicht van de dichtstbijzijnde Natuur Netwerk Nederland- en Natura2000 gebieden. Hierop is te zien dat op ongeveer 800 meter van de winningslocatie zich een ecologische verbindingszone bevindt. In Figuur 47 van [1] laat vergunninghouder zien dat de winningslocatie niet in een drinkwater- en grondwaterbeschermingsgebied ligt.

TNO-AGE kan zich vinden in deze conclusie van de vergunninghouder. Er zijn inderdaad geen mijnbouwactiviteiten in of nabij het winningsvergunningsgebied die interfereren met de geothermische activiteiten van de twee geothermie systemen bij Andijk.

Er is geen overlap van het winningsvergunningsgebied met beschermde gebieden als Natura2000 gebieden, grondwaterbeschermingszones en/of waterwingebieden, zoals de vergunninghouder toont in Figuur 47 [1]. Het dichtstbijzijnde Natura2000 gebied bevindt zich ca. 2 km van de projectlocatie. De verwachte bodemdaling ten gevolge van de aardwarmtewinning (zie paragraaf 5) voor dit gebied is maximaal ca. 3 mm na 25 jaar en ca.4 mm na 35 jaar productie (einde winningsvergunning).

## 7. Seismische Hazard en Risico Analyse (SHRA)

Ten behoeve van het Winningsplan voor de twee geothermiesystemen bij Andijk [1] heeft de vergunninghouder een quickscan Seismische Hazard en Risico Analyse (SHRA) uitgevoerd. Het uitgangspunt voor deze analyse is de tijdelijke leidraad zoals opgesteld door Qcon en IF [10] en de door DAGO gepubliceerde toevoeging hierop [11]. De resultaten van deze quickscan zijn beschreven in het winningsplan [1].

De door de vergunninghouder aangeleverde SHRA is door TNO-AGE geëvalueerd. De resultaten van deze evaluatie worden in dit hoofdstuk beschreven.

### 7.1 Eerste drie vragen beslisboom

De antwoorden van zowel de vergunninghouder als TNO-AGE op de eerste drie vragen van de beslisboom in de SHRA methodiek van Qcon en IF [9] worden gegeven in Tabel 4, alsmede een korte argumentatie.

*Tabel 4: Beantwoording eerste drie vragen beslisboom Qcon en IF SHRA methodiek [10].*

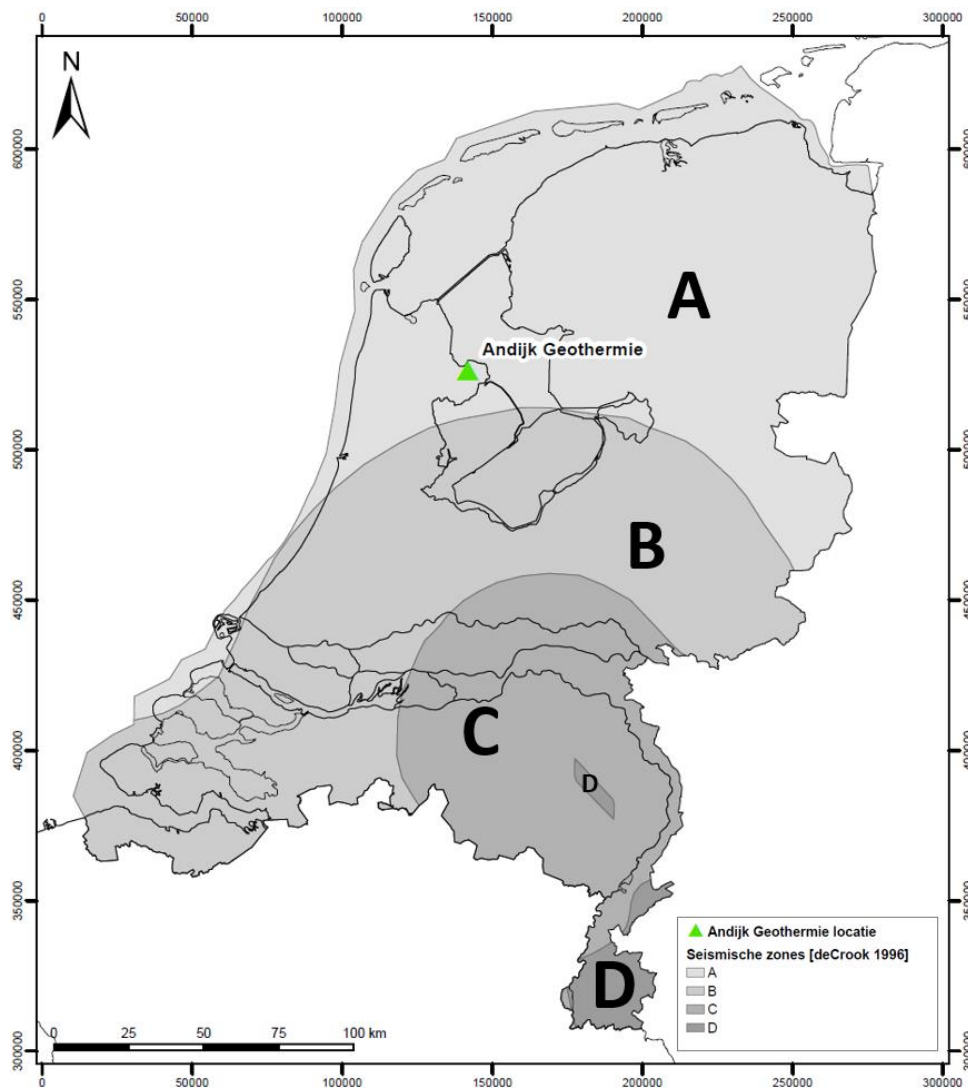
| Eerste drie vragen beslisboom                                                                                                           | Antwoord         |         | Argumentatie & opmerkingen TNO-AGE                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                         | Vergunninghouder | TNO-AGE |                                                                                                                                                                        |
| Is de afstand van het project tot een majeure breukzone <100 m of is het stromingsconcept gebaseerd op productie uit bestaande breuken? | nee              | nee     | Play type is "Hot sedimentary aquifer" en richt zich op matrix gedomineerde stroming. Figuur 13 van [1] toont dat project niet binnen 100m van majeure breukzone ligt. |
| Ligt het project in de tektonisch actieve Roerdalslenk?                                                                                 | nee              | nee     | Projectlocatie ligt in zone A volgens De Crook (1996), zie Figuur 1.                                                                                                   |
| Wordt het project beïnvloed door het Groningen gasveld?                                                                                 | nee              | nee     | Project ligt meer dan 100 km verwijderd van Groningen gasveld.                                                                                                         |

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
20/43

Op basis van bovenstaande bevindingen is TNO-AGE het eens met de vergunninghouder dat het antwoord op de eerste drie vragen van de beslisboom **nee** is.



Figuur 1: Locatie winningsvergunning Andijk t.o.v. seismische zones De Crook (1996).

## 7.2 Quickscan tabel

De bepaling van de score voor de 9 categorieën in de Quickscan tabel van de SHRA methodiek van Qcon en IF [10], door zowel de vergunninghouder als TNO-AGE, wordt gegeven in de volgende sectie, alsmede een korte argumentatie. De vergunninghouder heeft beide systemen in één Quickscan behandeld.

TNO-AGE is van mening dat de systematiek [10] van de leidraad<sup>1,2</sup> niet bedoeld is om twee systemen (doubletten) samen te scoren, zoals de vergunninghouder doet. TNO-AGE scoort daarom beide systemen apart. Echter om een vergelijking te maken van het resultaat van de vergunninghouder heeft TNO-AGE ook beide

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
21/43

systemen als één systeem gescoord, ook al is TNO-AGE van mening dat deze apart gescoord moeten worden. TNO-AGE geeft daarom naast de gezamenlijke score ook de individuele scores van Andijk I en Andijk II.

#### *Hydraulische connectie met het kristallijne basement*

##### Beantwoording vergunninghouder

Vergunninghouder verwijst naar een kaart van de top van het pre-Silesian (Vroeg Carboon) in Figuur 36 in [1]. Die laat zien dat de top op ongeveer 6,5 km ligt. Daarnaast stelt vergunninghouder dat er geen verbinding via breuken is met de kristallijne basis en dat daarmee een score van 0 moet worden toegewezen.

##### Bevindingen TNO-AGE

Figuur 36 in [1] laat de top van het pre-Silesian zien, welke op locatie Andijk op ongeveer 6,5 kilometer diepte ligt. Tussen de top van het pre-Silesian en de kristallijne basis ligt hoogstwaarschijnlijk een dik pakket van: Devoon, Siluur, Ordovicium en Cambrium. In Duitsland is het Devoon 5 km dik en in België is het Siluur-Cambrium ca. 13 km dik. In put O18-01 is het Dinantien, Devoon en deels Siluur aangeboord met dikte 1,5 km.

*Aangezien het voor beide doubletten zeer aannemelijk is dat het kristallijne basement zich dieper bevindt dan 3 kilometer vindt TNO-AGE het gerechtvaardigd om een score 0 toe te kennen voor zowel Andijk I als Andijk II.*

#### *Drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput*

##### Beantwoording vergunninghouder

Op basis van interferentietesten en seismiek stelt vergunninghouder dat er drukcommunicatie is tussen doubletten (ADK-GT-01, -02 en ADK-GT-03, -04). Uit deze interferentietest is wel voortgekomen dat er een barrière (breuk) aanwezig is tussen beide doubletten, maar dat deze niet geheel afsluitend is. Op basis hiervan kent de vergunninghouder een score 0 toe.

##### Bevindingen TNO-AGE

De methodiek van Qcon en IF [10] gebruikt drie toetsingselementen om de score te bepalen. Dit betreft de verticale separatie tussen beide putten, de laterale afstand tussen de putten en productie/injectie in hetzelfde laagpakket. Tabel 5 geeft een overzicht van deze toetsingselementen voor beide aardwarmtesystemen. Vergunninghouder heeft meerdere interferentietesten uitgevoerd waaruit blijkt dat er goede drukcommunicatie is tussen ADK-GT-01-S1 & ADK-GT-02 (Andijk I) en ADK-GT-03 & ADK-GT-04 (Andijk II). Productiedata bevestigen ook dat er drukcommunicatie is tussen de putten.

*TNO-AGE kent op basis van bovenstaand, voor zowel Andijk I als Andijk II, 0 punten toe.*

Datum  
13 december 2019

Onze referentie  
AGE 19-10.074

Blad  
22/43

Tabel 5: Overzicht van de uitkomst per toetsingselement, voor de evaluatie van de drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput.

| Toetsingselement                      | Andijk I        | Andijk II       |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Afstand lateraal [m]                  | 975             | 986             |
| Afstand verticaal [m]                 | 67              | 91              |
| Injectie/productie zelfde laagpakket? | Ja (Rotliegend) | Ja (Rotliegend) |

#### Debiet

##### Beantwoording vergunninghouder

Vergunninghouder gebruikt het jaardebiet van 350 m<sup>3</sup>/uur voor de score. Dit resulteert in een score van 7 punten.

##### Bevindingen TNO-AGE

In tabel 10 wordt door aanvrager een productieprognose gegeven. Hierin stelt aanvrager dat de maanddebieten eventueel ook 20% lager of hoger kunnen zijn (afhankelijk van jaarlijkse voortgang van productie en onderhoud). In geval dat het hoger is, zou dit dus een maximaal debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur zijn. Op basis van de modellering in DoubletCalc2D blijkt dat Andijk I, binnen de grenzen van het SodM injectieprotocol [12], het maximale debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur kan halen. Dit geldt echter niet voor Andijk II. Modelresultaten laten zien dat bij een debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur het injectieprotocol van SodM [12] door Andijk II wordt overschreden. Uit de modellering blijkt dat ook het debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur in de toekomst wellicht niet meer haalbaar is voor Andijk II. Het maximum debiet dat door Andijk II tot nu toe is gerealiseerd is 326 m<sup>3</sup>/uur. Dit debiet valt in dezelfde scoringscategorie als het geprognostiseerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur.

*Voor de bepaling van de score gebruikt TNO-AGE, op basis van bovenstaand, een debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur voor Andijk I en een debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur voor Andijk II. Dit resulteert in een score van 10 punten voor Andijk I en 7 punten voor Andijk II.*

#### Injectiedruk

##### Beantwoording vergunninghouder

Op pagina 62 van [1] gaat vergunninghouder uit van een injectiedruk lager dan 20 bar, die pre-drill bepaald is. Op basis daarvan heeft de vergunninghouder een score van 3 bepaald voor deze categorie (p55 in [1]). In Tabel 20 van [1] is echter af te lezen dat aanvrager zichzelf een score van 7 toekent, dus dat de verschildruk tussen de 4 en 7 MPa uitkomt. Hiervoor wordt geen argumentatie gegeven.

##### Bevindingen TNO-AGE

Voor de bepaling van de injectiedruk op reservoirdiepte wordt uitgegaan van het geprognostiseerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur, welke mogelijk 20% hoger kan zijn (420 m<sup>3</sup>/uur). De bepaling van de injectiedruk is onzeker door extrapolatie van bepalende parameters. Daarnaast produceert vergunninghouder nog niet met het geprognostiseerde debiet. De resultaten in DoubletCalc1D tonen de injectiedruk (bij 350 m<sup>3</sup>/uur) op reservoirdiepte van 2,7 MPa voor Andijk I en 5,3 voor Andijk II. DoubletCalc2D toont een injectiedruk op reservoirdiepte na 35 jaar productie (met een debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur) van 3,0 MPa voor Andijk I en 6,1 MPa voor Andijk II. Op

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
23/43

de momenten dat een debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur nodig is loopt modelmatig de injectiedruk bij Andijk I op tot 3,3 MPa en bij Andijk II tot 6,9 MPa.

De injectiedruk bij Andijk I blijft modelmatig onder het injectieprotocol van SodM, welke 4,4 MPa (44 bar) is. De maximale injectiedruk volgens het SodM protocol van Andijk II is 4,7 MPa (47 bar). Modelmatig stijgt bij Andijk II de injectiedruk, die nodig is voor een debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur, van 41 bar in het eerste jaar naar 61 bar in het 35<sup>ste</sup> productie jaar. De modelresultaten in DoubletCalc2D laten zien dat Andijk II de maximale injectiedruk volgens het SodM protocol al na 2 jaar overschrijdt. Op basis van de maandelijks aangeleverde productiedata van Andijk II berekent TNO-AGE een injectiedruk op reservoirdiepte die lager is dan de maximum toegestane verschildruk op reservoirdiepte. Voor de score van Andijk II in de Quickscan tabel gaat TNO-AGE uit van de maximaal toegestane verschildruk op reservoirdiepte volgens het SodM protocol, welke 47 bar is.

*Op basis van bovenstaand is TNO-AGE van mening dat de injectiedruk die gebruikt moet worden voor het invullen van de Quickscan tabel voor Andijk I 3,3 MPa (horende bij een debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur) is en voor Andijk 4,7 MPa (o.b.v. het SodM protocol). De bijbehorende score resulteert in 3 punten voor Andijk I (1 – 4 MPa) en 7 punten voor Andijk II (4 – 7 MPa).*

*Afstand tot natuurlijke bevingen*  
Beantwoording vergunninghouder

Voor de afstand tot natuurlijke bevingen wordt door aanvrager een score van 0 gegeven.

Bevindingen TNO-AGE

TNO-AGE gebruikt de tektonische aardbevingscatalogus van het KNMI, zoals deze te downloaden is van de desbetreffende website. Hieruit blijkt dat de meest nabije natuurlijke beving, voor zowel Andijk I als Andijk II, bij IJmuiden was, op ca. 48 kilometer afstand.

*Op basis van deze gegevens is TNO-AGE het eens met de vergunninghouder dat de score voor deze categorie 0 moet zijn.*

*Afstand tot geïnduceerde bevingen*  
Beantwoording vergunninghouder

Voor de afstand tot natuurlijke bevingen wordt door aanvrager een score van 0 gegeven.

Bevindingen TNO-AGE

TNO-AGE gebruikt de geïnduceerde aardbevingscatalogus van het KNMI. Hieruit blijkt dat de dichtstbijzijnde geïnduceerde aardbeving (Warder, 2018) op ca. 21 kilometer afstand van zowel Andijk I als Andijk II heeft plaatsgevonden.

*Op basis van deze gegevens is TNO-AGE het eens met de vergunninghouder dat de score voor deze categorie 0 moet zijn.*

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
24/43

#### *Afstand tot breuken*

##### Beantwoording vergunninghouder

Vergunninghouder geeft aan dat het gebied Andijk alleen in kaart gebracht is met 2D seismiek en dat er geen 3D seismiek beschikbaar is. Op basis van 2D seismiek en de resulterende breukinterpretatie in Figuur 13 van [1] concludeert de vergunninghouder dat de afstand tot breuken tussen de 0,35 en 0,45 kilometer is en scoort daarmee 7 punten.

##### Bevindingen TNO-AGE

TNO-AGE onderschrijft dat er voor het gebied Andijk alleen 2D seismiek beschikbaar is. In Figuur 35 van [1] wordt door aanvrager een top Slochteren kaart gepresenteerd, met tevens de geïnterpreteerde breuken. TNO-AGE heeft deze breukinterpretatie gecontroleerd en overgenomen bij de behandeling van de winningsvergunning. In het gebied liggen enkel 2D seismische lijnen. De afstand tussen deze lijnen is ongeveer 1 kilometer. In de putttest van ADK-GT-01 zijn 2 breuken op een afstand van 415 en 450 meter herkend door Panterra. Uit de interferentietesten zijn geen andere breuken geïnterpreteerd dan die zijn waargenomen op seismiek.

Er wordt gesteld dat de putten ADK-GT-03 en -04 op ongeveer 450 meter van een breuk liggen. ADK-GT-01 ligt op ongeveer 370m van een breuk, ADK-GT-02 op 390 meter. TNO-AGE heeft deze afstanden (uitgaande van de einddiepte locaties van de putten) gecontroleerd: ADK-GT-03 lijkt op 380 meter van een breuk te liggen, ADK-GT-04 op meer dan 600 meter, ADK-GT-01 op 360 meter en ADK-GT-02 op 280 meter. Ondanks de verschillen met aanvrager, vallen alle afstanden binnen de categorie van 7 punten.

*TNO-AGE is het met aanvrager eens dat op basis van bovenstaande observaties een score van 7 toegekend dient te worden voor zowel Andijk I als Andijk II.*

#### *Breukoriëntatie in het huidige spanningsveld*

##### Beantwoording vergunninghouder

Voor de beantwoording van deze stap heeft de vergunninghouder de oriëntatie van het stressveld afgeleid uit de Dutch Stress Map van Mechelse (2017) en gebaseerd op de dichtstbijzijnde meting ten zuiden van Andijk. Volgens vergunninghouder is de oriëntatie van de maximale horizontale stress NW-ZO. Vergunninghouder stelt daarna dat de meerderheid van de breuken in dit gebied een vergelijkbare oriëntatie hebben, echter lijkt de hoek, volgens vergunninghouder, lichtelijk af te wijken. Aanvrager stelt daarom dat bezwijken mogelijk wordt geacht, en gaat uit van een score van 7.

##### Bevindingen TNO-AGE

De methodiek van Qcon en IF [10] schrijft voor dat voor de bepaling van de score voor deze categorie de breuk met de hoogste score te dient te worden genomen (totaal van de “afstand tot breuken” en “breukoriëntatie in het huidige spanningsveld”). Een nadere analyse van de breuken in het gebied toont dat de breuk ten noordoosten van Andijk I met een lengte van meer dan 1 kilometer en een afstand tot de injectieput van ca. 280 meter, een oriëntatie heeft van gemiddeld 328°



**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
25/43

N. De breuk ten zuidwesten van Andijk II met een lengte van meer dan 1 kilometer en een afstand van 380 meter van de productieput ADK-GT-03, een oriëntatie heeft van gemiddeld 325° N.

Volgens Mechelse (2017) is de oriëntatie van het spanningsveld voor het Rotliegend 324°(± 20°). De hoek met de oriëntatie van het spanningsveld is daardoor slechts 4° voor Andijk I en 1° voor Andijk II. Op basis van een analytische methode [14], uitgewerkt door TNO, is bepaald dat dergelijke breuken kansrijk zijn voor breukreactivatie. Omdat de methodiek van Qcon en IF [10] enkel de breukoriëntatie in beschouwing neemt als een benadering voor de potentie op breukreactivatie, krijgt dit project volgens deze methodiek een score van 10 voor deze categorie.

Dit is een vrij eenvoudige benadering van de kans op breukreactivatie. De kans op reactivatie van een breuk is naast de oriëntatie in het stressveld ook afhankelijk van de combinatie van een aantal effecten zoals "direct pressure", poro-elastische en thermo-elastische mechanismes die qua grootte afhankelijk zijn van de hoogte van het opgelegde drukverschil en afkoeling die de breuk bereiken. Het samenspel van deze effecten is nog niet meegenomen in de huidige SHRA methodiek. Het resultaat van het DoubletCalc2D model laat zien dat de koudwaterbel binnen 25 jaar de dichtstbijzijnde breuk bereikt.

*Op basis van bovenstaand is TNO-AGE van mening dat een score 10 van toepassing is voor zowel Andijk I als Andijk II.*

#### Netto geïnjecteerd volume

##### Beantwoording vergunninghouder

Aanvrager stelt dat de doubletten in Andijk gebaseerd zijn op massa gebalanceerde vloeistofcirculatie. Het netto geïnjecteerde volume is nul en daarom score 0.

#### Bevindingen TNO-AGE

Er wordt bij beide doubletten in Andijk een even grote hoeveelheid water geïnjecteerd als uit de ondergrond geproduceerd is. Er is sprake van een zogeheten gesloten massabalans. Dit is ook op te maken uit de tot nu toe aangeleverde productiedata. Daarnaast is de injectie van inhibitor (0,01 l/m<sup>3</sup>) verwaarloosbaar.

*TNO-AGE is op basis van bovenstaand van mening dat een score van 0 van toepassing is voor zowel Andijk I als Andijk II.*

*Tabel 6: Antwoord op vraag in beslisboom in SRA methodiek van Qcon en IF [10].*

| Vraag in beslisboom m.b.t. opgetreden seismiciteit.                                           | Antwoord         |         | Argumentatie en opmerkingen TNO-AGE                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                               | Vergunninghouder | TNO-AGE |                                                                                                                                                                           |
| Hebben bevingen (natuurlijk of geïnduceerd) plaatsgevonden in het geothermisch projectgebied? | nee              | nee     | Binnen het beïnvloedingsgebied van het geothermisch project hebben geen bevingen plaatsgevonden. Dichtstbijzijnde beving is geïnduceerde beving ca. 21 km ten zuidwesten. |

### 7.3 Resultaat Quickscan scoretabel

#### Resultaat vergunninghouder

De vergunninghouder heeft één keer de Quickscan scoretabel ingevuld voor beide systemen (Andijk I en Andijk II) samen en komt daarbij tot een genormaliseerde score van 0,31 (Tabel 7). Dit leidt tot een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit.

#### Resultaat TNO-AGE

Ter vergelijking van het resultaat van de vergunninghouder heeft TNO-AGE de Quickscan scoretabel ingevuld voor beide systemen (Andijk I en Andijk II) samen, dus als ware het één geothermisch systeem. Daarbij is uitgegaan van de resultaten van de eigen evaluatie. De resulterende genormaliseerde seismisch potentieel score van TNO-AGE is 0,37. Deze uitkomst wijkt af van die van de vergunninghouder omdat TNO-AGE een hogere score toekent voor de categorieën “debiet” en “breukoriëntatie in huidig stressveld” (Tabel 7). Dit zou dus resulteren in een gemiddeld potentieel voor het induceren van seismiciteit. Volgens de leidraad van Qcon en IF [10] zou de vergunninghouder met deze uitkomst een evaluatie van de locatie specifieke seismische dreiging moeten uitvoeren voor beide systemen samen.

Echter, uit de SHRA methodiek van Qcon en IF [10] lijkt te volgen dat de Quickscan tabel moet worden ingevuld per individueel systeem. Dat betekent dat voor zowel Andijk I als Andijk II de tabel moet worden ingevuld en een individuele score moet worden bepaald. Daarom heeft TNO-AGE ook voor zowel Andijk I als Andijk II afzonderlijk de Quickscan scoretabel ingevuld. Dit resulteert in een genormaliseerde seismisch potentieel score van 0,33 voor Andijk I en 0,34 voor Andijk II (Tabel 7). Het verschil tussen beide systemen wordt verklaard doordat Andijk II een hogere injectiedruk nodig heeft om het geprognostiseerde debiet te realiseren en omdat Andijk II het maximale debiet van 420 m<sup>3</sup>/uur zeer waarschijnlijk niet kan halen. Daarmee valt Andijk I in de categorie met een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit. De score van Andijk II (0,34) resulteert in een seismische dreiging die de grens tussen laag en gemiddeld net overschrijdt. Op basis van deze uitkomsten zou de vergunninghouder, conform de leidraad van Qcon en IF [10], alleen voor Andijk II een evaluatie van de locatie specifieke seismische dreiging moeten uitvoeren.

Het resultaat van de Quickscan tabel, ingevuld per individueel systeem, lijkt aan te sluiten bij de overige uitkomsten van de geotechnische evaluatie van beide systemen. Daaruit bleek namelijk dat het onzeker is of Andijk II het geprognostiseerde debiet werkelijk kan realiseren zonder de maximale injectiedruk volgens het SodM protocol te overschrijden, en het voorstel om het effect op het seismisch risico van de relatief hoge mate van afkoeling op de breuk in de nabijheid van het systeem Andijk II nader te onderzoeken. Andijk I lijkt geen problemen te hebben met het realiseren van het geprognostiseerde debiet en ook de mate van afkoeling op de meest nabije breuk is een stuk minder volgens de modelresultaten.

Datum  
13 december 2019

Tabel 7: Resultaat Quicksan scoretabel voor de twee Andijk doubletten.

Onze referentie  
AGE 10.10.074

| Score                                     | Connectie met basement | Drukcommunicatie tussen productie- en injectieput | Injectiedruk [MPa] | Debiet [m <sup>3</sup> /uur] | Afstand tot natuurlijke aardbevingen [km] | Afstand tot geïnduceerde aardbevingen [km] | Afstand tot breuken [km] | Breukoriëntatie in huidig spanningsveld | Netto geïnjecteerd Volume [1000 m <sup>3</sup> ] |        |                       |
|-------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|--------|-----------------------|
| 10                                        | Yes                    | No                                                | >7                 | >360                         | <1                                        | <1                                         | <0,1                     | Favourable                              | >20                                              |        |                       |
| 7                                         | Possible               | Unlikely                                          | 4-7                | 180-360                      | 1-5                                       | 1-5                                        | 0,1-0,5                  | Shearing possible                       | 5-20                                             |        |                       |
| 3                                         | Unlikely               | Likely                                            | 1-4                | 50-180                       | 5-10                                      | 5-10                                       | 0,5-1,5                  | Shearing unlikely                       | 0,1-5                                            |        |                       |
| 0                                         | No                     | Yes                                               | <1                 | <50                          | >10                                       | >10                                        | >1,5                     | Locked                                  | <0,1                                             |        |                       |
|                                           |                        |                                                   |                    |                              |                                           |                                            |                          |                                         |                                                  | Totaal | Genormaliseerde score |
| Vergunninghouder (Andijk als één systeem) | 0                      | 0                                                 | 7                  | 7                            | 0                                         | 0                                          | 7                        | 7                                       | 0                                                | 28     | 0,31                  |
| TNO-AGE – Andijk I                        | 0                      | 0                                                 | 3                  | 10                           | 0                                         | 0                                          | 7                        | 10                                      | 0                                                | 30     | 0,33                  |
| TNO-AGE – Andijk II                       | 0                      | 0                                                 | 7                  | 7                            | 0                                         | 0                                          | 7                        | 10                                      | 0                                                | 31     | 0,34                  |
| TNO-AGE (Andijk als één systeem)          | 0                      | 0                                                 | 7                  | 10                           | 0                                         | 0                                          | 7                        | 10                                      | 0                                                | 34     | 0,37                  |

## 8. Conclusies

De belangrijkste conclusies van de in deze rapportage beschreven evaluatieresultaten kunnen als volgt worden samengevat:

- De uitkomsten van de DoubletCalc2D modellering door TNO-AGE kunnen als volgt worden samengevat:
  - Vanaf de productiestart tot het einde van de huidige winningsvergunning berekent TNO-AGE, op basis van de productieprognoses van de vergunninghouder, dat er een totaal volume van 107 miljoen m<sup>3</sup> water per doublet wordt geproduceerd.
  - De koudwaterbel bereikt de vergunningsgrens al na 25 jaar i.p.v. 36 jaar. Dit valt binnen de vergunde tijd van de winningsvergunning. De oorzaak hiervan is met name de wijziging van de productie- en injectieput voor beide doubletten en in beperkte mate doordat het in het winningsplan geprognostiseerde debiet hoger is dan door de vergunninghouder opgegeven in de winningsvergunningaanvraag.
  - Doorbraak van de koudwaterbel in de productieput is na 38 jaar i.p.v. 39 vanaf de productiestart voor Andijk I en 32 jaar i.p.v. 33 jaar voor Andijk II.
  - Na 25 jaar productie (grensoverschrijding van de koudwaterbel) is de afkoeling bij dichtstbijzijnde breuken 10°C voor Andijk I en 27°C voor Andijk II. Indien productie door gaat tot einde winningsvergunning (na 35 jaar) is de afkoeling bij dichtstbijzijnde breuken 14°C voor Andijk I en 51°C voor Andijk II. Breuken kunnen

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
28/43

- (deels) minder stabiel worden als gevolg van spanningsafname door afkoeling. Het is aan te raden dat de vergunninghouder het effect van temperatuur op de lokale breuken nader laat onderzoeken.
- Drukverandering op de vergunningsgrens is ca. 5 bar en bij de dichtstbijzijnde breuken is dat beperkt tot ca. 8 bar na zowel 25 als 35 jaar.
  - Bij grensoverschrijding van de koudwaterbel van Andijk II (na 25 jaar) is de maximaal te verwachten bodemdaling 9 mm. Aan het einde van de winningsvergunning is de maximaal verwachte bodemdaling 13 mm.
  - De maximale injectiedruk op reservoirdiepte volgens het SodM protocol voor Andijk I is 44 bar en voor Andijk II 47 bar. Andijk I blijft ruim onder dit maximum. Andijk II overschrijdt de injectiedruk op reservoirdiepte na 2 jaar productie. TNO-AGE plaatst hierbij wel de kanttekening dat uit observaties van andere geothermische systemen in het Rotliegend blijkt dat na verloop van tijd juist een verbetering van de injectiviteit optreedt.
  - Op basis van interferentietesten blijkt dat de breuk tussen Andijk I en Andijk II niet volledig afsluitend is en dat beide doubletten elkaar druktechnisch zien. Dit effect is erg klein in vergelijking met de drukcommunicatie tussen de beide putten van elk doublet.
- Er zijn geen mijnbouwactiviteiten in de nabijheid van de geothermische installatie, daarom wordt ook geen ondergrondse interferentie verwacht. Het dichtstbijzijnde Natura2000 gebied ligt op 2 km afstand en is het IJsselmeer. Op basis van de DoubletCalc2D berekeningen is de verwachte bodemdaling ten gevolge van de aardwarmteproductie voor dit gebied maximaal ca. 3 mm na 25 jaar productie en 4 mm na 35 jaar productie (einde winningsvergunning).
  - De vergunninghouder heeft een SHRA evaluatie uitgevoerd voor beide geothermiesystemen (Andijk I en Andijk II) samen, wat resulteerde in een genormaliseerde seismisch potentieel score van 0,31 en daarmee dus een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit. TNO-AGE heeft, ter vergelijking, ook beide systemen samen geëvalueerd en komt tot een hogere genormaliseerde score van 0,37. Het resultaat van TNO-AGE wijkt af van de uitkomst van de vergunninghouder (0,31) doordat TNO-AGE een hogere score geeft aan de volgende categorieën: “breukoriëntatie in huidige spanningsveld” (10 i.p.v. 7) en “debiet” (10 i.p.v. 7). Conform de leidraad van Qcon en IF [10] zou de vergunninghouder een locatie specifieke evaluatie van de seismische dreiging moeten uitvoeren.
  - TNO-AGE heeft de Quickscan tabel ook ingevuld per individueel systeem omdat die aanpak lijkt te volgen uit de methodiek van Qcon en IF [1]. In dat geval komt de score voor Andijk I uit op 0,33 en voor Andijk II 0,34, welke respectievelijk resulteren in een laag (Andijk I) en gemiddeld (Andijk II) potentieel voor het induceren van seismiciteit.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
29/43

## **9. Aanbevelingen**

TNO-AGE geeft ter overweging mee om in te stemmen met het winningsplan onder de voorwaarde dat de injectiedruk van Andijk II verlaagd wordt tot onder de 4 MPa. Deze verlaging zorgt ervoor dat Andijk II, conform de leidraad<sup>1,2</sup>, in de categorie met een laag potentieel voor het induceren van seismiciteit valt. Indien de vergunninghouder een hogere (>4 MPa) injectiedruk wenst, valt Andijk II in de categorie met een gemiddeld potentieel voor het induceren van seismiciteit. De vergunninghouder wordt dan verzocht om, conform de leidraad<sup>1,2</sup>, een evaluatie van de locatie specifieke seismische dreiging aan leveren voor Andijk II. Daarbij wordt aanbevolen om extra aandacht te geven aan de effecten van afkoeling op de dichtstbijzijnde breuken en het effect van de mate van uitkoeling op de maximaal toegestane injectiedruk.

Daarnaast ziet TNO-AGE modelmatig een afkoeling van 1°C op de vergunningsgrens na 25 jaar productie. Dit is eerder dan de vergunde 35 jaar. TNO-AGE geeft daarom drie opties ter overweging mee:

- 1) Vergroting van het oppervlak van de winningsvergunning zodat de 1°C afkoelingscontour na 35 jaar productie binnen de vergunningsgrens blijft;
- 2) Beperking van de duur van de winningsvergunning tot 25 jaar, maar dit lijkt niet doelmatig voor Andijk I omdat deze na 25 jaar nog geen grensoverschrijding heeft volgens het model;
- 3) De vergunninghouder verzoeken om binnen een redelijke termijn, maar tenminste voordat er 75 miljoen m<sup>3</sup> water (25 jaar productie met 350 m<sup>3</sup>/uur) geproduceerd is door het doublet Andijk II, een evaluatie aan te leveren met de modellering van de verbreiding van de koudwaterbel op dat moment. Hieruit moet blijken of de injectie van koud water bij Andijk II al dan niet gestaakt moet worden.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
30/43

## Referenties

- [1] ECW Geo Andijk B.V., 18 juli 2019 (V2). Ontwikkelingsplan aardwarmte Andijk. Bijlage bij Winningsplan: geotechnische onderbouwing.
- [2] ECW Geo Andijk B.V., 20 maart 2018. Bijlage 1 – Aanvraag Winningsvergunning Mijnbouwwet.
- [3] TNO-AGE, 4 december 2018. Geotechnische evaluatie winningsvergunning aardwarmte Andijk. Referentie: AGE 18-10.092.
- [4] Principeschema Geocentrale ECW GEO Andijk. Supplement Z van de winningsvergunning: ANN\_W\_A\_Operatorscherm.pdf
- [5] PanTerra Geoconsultants B.V., mei 2014. Resultaten geologisch onderzoek: Aardwarmte Andijk (G1097).
- [6] PanTerra Geoconsultants B.V., januari 2018. Analysis of Welltest ADK-GT-01 (G1251b\_19).
- [7] PanTerra Geoconsultants B.V., februari 2018. PVT Analysis Report ECW Geo Andijk. Well ADK-GT-01, Andijk (project 18001).
- [8] PanTerra Geoconsultants B.V., September 2018. Andijk Wells interference test. Well Test ADK-GT-01, 02, 03 en 04. (project 1251).
- [9] PanTerra Geoconsultants B.V., november 2018. Andijk Well Test analysis. Well Test ADK-GT-01, 02, 03 & 04 (project 1251).
- [10] Qcon GmbH & IF Technology B.V., 5 oktober 2016. Defining the Framework for seismic Hazard Assessment in Geothermal Projects V0.1.
- [11] DAGO, 2018. "SHRA Richtlijn richtinggevende suggesties".
- [12] SodM, 2013. Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning, Versie 2.
- [13] Well Engineering Partners (WEP), januari 2018. End of Well Report- Drilling ADK-GT-01 & ADK-GT-01-S1.
- [14] Levandowski, W., Weingarten, M., Walsh, R., 2018. Geomechanical sensitivities of injection-induced earthquakes. Geophysical Research Letters, Vol. 45, Issue 17, p. 8958 – 8965.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
31/43

## Bijlage 2: resultaten DoubletCalc modelberekeningen

In deze bijlage worden de resultaten van de modelberekeningen in DoubletCalc1D en DoubletCalc2D, uitgevoerd door TNO-AGE, gepresenteerd.

### DoubletCalc1D uitvoer – Andijk I

Geotechnics (Input)

| Property                        | min      | median   | max      |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| aquifer permeability (mD)       | 131.0    | 188.0    | 270.0    |
| aquifer net to gross (-)        | 0.96     | 0.98     | 1.0      |
| aquifer gross thickness (m)     | 174.0    | 189.0    | 204.0    |
| aquifer top at producer (m TVD) | 1683.0   | 1870.0   | 2057.0   |
| aquifer top at injector (m TVD) | 1607.0   | 1785.0   | 1964.0   |
| aquifer water salinity (ppm)    | 140000.0 | 189000.0 | 199000.0 |

| Property                                       | value                      |
|------------------------------------------------|----------------------------|
| number of simulation runs (-)                  | 10.0                       |
| aquifer kh/kv ratio (-)                        | 1.0                        |
| surface temperature (°C)                       | 10.0                       |
| geothermal gradient (°C/m)                     | 0.0367                     |
| [ mid aquifer temperature producer (°C) ]      | 82.0                       |
| initial aquifer pressure at producer (bar)     | 205.0                      |
| [ initial aquifer pressure at injector (bar) ] | 197.0                      |
| exit temperature heat exchanger (°C)           | 30.0                       |
| distance wells at aquifer level (m)            | 975.0                      |
| pump system efficiency (-)                     | 0.7                        |
| production pump depth (m)                      | 697.0                      |
| pump pressure difference (bar)                 | 39.0                       |
| outer diameter producer (inch)                 | 8.5                        |
| skin producer (-)                              | -1.7                       |
| skin due to penetration angle p (-)            | -0.58                      |
| pipe segment sections p (m AH)                 | 731.0,1217.0,2060.0,2115.0 |
| pipe segment depth p (m TVD)                   | 719.0,1179.0,1828.0,1870.0 |
| pipe inner diameter p (inch)                   | 7.72,12.35,8.53,6.18       |
| pipe roughness p (milli-inch)                  | 1.19,1.19,1.19,1.19        |
| outer diameter injector (inch)                 | 8.5                        |
| skin injector (-)                              | -4.2                       |
| skin due to penetration angle i (-)            | -0.73                      |
| pipe segment sections i (m AH)                 | 58.0,1207.0,1896.0,1963.0  |
| pipe segment depth i (m TVD)                   | 51.0,1176.0,1734.0,1785.0  |
| pipe inner diameter i (inch)                   | 7.72,12.35,8.53,6.18       |
| pipe roughness i (milli-inch)                  | 1.19,1.19,1.19,1.19        |

Geotechnics (Output)

| Monte Carlo cases (stochastic inputs) | P90   | P50   | P10    |
|---------------------------------------|-------|-------|--------|
| aquifer kH net (Dm)                   | 28.93 | 34.51 | 46.63  |
| mass flow (kg/s)                      | 63.98 | 86.47 | 141.01 |
| pump volume flow (m³/h)               | 211.8 | 284.0 | 460.8  |
| required pump power (kW)              | 327.8 | 439.6 | 713.2  |
| geothermal power (MW)                 | 11.2  | 14.07 | 27.2   |
| COP (kW/kW)                           | 31.7  | 34.6  | 38.1   |

|                                        |       |       |       |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.0 | 205.0 | 205.0 |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 197.0 | 197.0 | 197.0 |
| pressure difference at producer (bar)  | 11.79 | 17.43 | 21.03 |
| pressure difference at injector (bar)  | 12.85 | 20.38 | 25.43 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 78.22 | 82.17 | 86.71 |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 76.53 | 80.79 | 85.96 |

| base case (median value inputs) | value |
|---------------------------------|-------|
| aquifer kH net (Dm)             | 34.82 |
| mass flow (kg/s)                | 91.97 |
| pump volume flow (m³/h)         | 297.6 |
| required pump power (kW)        | 460.6 |
| geothermal power (MW)           | 15.97 |
| COP (kW/kW)                     | 34.7  |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.0 |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 197.0 |
| pressure difference at producer (bar)  | 16.19 |
| pressure difference at injector (bar)  | 19.29 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 82.0  |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 80.96 |
| pressure at heat exchanger (bar)       | 19.33 |

\* @ mid aquifer depth

Figuur 2: DoubletCalc1D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor Andijk I.

## DoubletCalc1D uitvoer – Andijk II

### Geotechnics (Input)

| Property                        | min      | median   | max      |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| aquifer permeability (mD)       | 229.0    | 248.0    | 269.0    |
| aquifer net to gross (-)        | 0.96     | 0.98     | 1.0      |
| aquifer gross thickness (m)     | 128.0    | 145.0    | 163.0    |
| aquifer top at producer (m TVD) | 1690.0   | 1878.0   | 2066.0   |
| aquifer top at injector (m TVD) | 1625.0   | 1805.0   | 1986.0   |
| aquifer water salinity (ppm)    | 140000.0 | 189000.0 | 199000.0 |

| Property                                     | value                      |
|----------------------------------------------|----------------------------|
| number of simulation runs (-)                | 10.0                       |
| aquifer kh/iv ratio (-)                      | 1.0                        |
| surface temperature (°C)                     | 10.0                       |
| geothermal gradient (°C/m)                   | 0.0369                     |
| [mid aquifer temperature producer (°C)]      | 82.0                       |
| initial aquifer pressure at producer (bar)   | 205.5                      |
| [initial aquifer pressure at injector (bar)] | 196.0                      |
| exit temperature heat exchanger (°C)         | 30.0                       |
| distance wells at aquifer level (m)          | 987.0                      |
| pump system efficiency (-)                   | 0.7                        |
| production pump depth (m)                    | 800.0                      |
| pump pressure difference (bar)               | 60.5                       |
| outer diameter producer (inch)               | 8.5                        |
| skin producer (-)                            | -1.6                       |
| skin due to penetration angle p (-)          | -0.43                      |
| pipe segment sections p (m AH)               | 835.0,1217.0,1951.0,2056.0 |
| pipe segment depth p (m TVD)                 | 822.0,1187.0,1794.0,1878.0 |
| pipe inner diameter p (inch)                 | 7.72,12.35,8.53,6.18       |
| pipe roughness p (milli-inch)                | 1.19,1.19,1.19,1.19        |
| outer diameter injector (inch)               | 8.5                        |
| skin injector (-)                            | -0.65                      |
| skin due to penetration angle i (-)          | -0.43                      |
| pipe segment sections i (m AH)               | 59.0,1212.0,1929.0,1990.0  |
| pipe segment depth i (m TVD)                 | 52.0,1177.0,1757.0,1806.0  |
| pipe inner diameter i (inch)                 | 7.72,12.35,8.53,6.18       |
| pipe roughness i (milli-inch)                | 1.19,1.19,1.19,1.19        |

### Geotechnics (Output)

| Monte Carlo cases (stochastic inputs) | P90   | P50    | P10    |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|
| aquifer kH net (Dm)                   | 32.97 | 35.73  | 39.14  |
| mass flow (kg/s)                      | 79.86 | 100.13 | 143.43 |
| pump volume flow (m³/h)               | 258.1 | 326.6  | 476.3  |
| required pump power (kW)              | 619.6 | 784.2  | 1143.4 |
| geothermal power (MW)                 | 13.2  | 18.44  | 28.45  |
| COP (kW/kW)                           | 21.2  | 22.4   | 24.9   |

|                                        |       |       |       |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.5 | 205.5 | 205.5 |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 196.0 | 196.0 | 196.0 |
| pressure difference at producer (bar)  | 14.49 | 19.21 | 22.82 |
| pressure difference at injector (bar)  | 31.3  | 41.45 | 51.76 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 79.17 | 82.41 | 86.83 |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 78.21 | 81.2  | 86.13 |

| base case (median value inputs) | value  |
|---------------------------------|--------|
| aquifer kH net (Dm)             | 35.24  |
| mass flow (kg/s)                | 100.75 |
| pump volume flow (m³/h)         | 325.9  |
| required pump power (kW)        | 782.3  |
| geothermal power (MW)           | 17.54  |
| COP (kW/kW)                     | 22.4   |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.5 |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 196.0 |
| pressure difference at producer (bar)  | 18.03 |
| pressure difference at injector (bar)  | 40.17 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 82.0  |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 81.08 |
| pressure at heat exchanger (bar)       | 37.09 |

\* @ mid aquifer depth

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
32/43

Figuur 3: DoubletCalc1D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor Andijk II.



**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
33/43

## DoubletCalc1D uitvoer – Prognose 350 m<sup>3</sup>/uur Andijk I

### Geotechnics (Input)

| Property                                   | min                        | median   | max      |
|--------------------------------------------|----------------------------|----------|----------|
| aquifer permeability (mD)                  | 131.0                      | 188.0    | 270.0    |
| aquifer net to gross (-)                   | 0.96                       | 0.98     | 1.0      |
| aquifer gross thickness (m)                | 174.0                      | 189.0    | 204.0    |
| aquifer top at producer (m TVD)            | 1683.0                     | 1870.0   | 2057.0   |
| aquifer top at injector (m TVD)            | 1607.0                     | 1785.0   | 1964.0   |
| aquifer water salinity (ppm)               | 140000.0                   | 189000.0 | 199000.0 |
| Property                                   | value                      |          |          |
| number of simulation runs (-)              | 10.0                       |          |          |
| aquifer kh/kv ratio (-)                    | 1.0                        |          |          |
| surface temperature (°C)                   | 10.0                       |          |          |
| geothermal gradient (°C/m)                 | 0.0367                     |          |          |
| mid aquifer temperature producer (°C)      | 82.0                       |          |          |
| initial aquifer pressure at producer (bar) | 205.0                      |          |          |
| initial aquifer pressure at injector (bar) | 197.0                      |          |          |
| exit temperature heat exchanger (°C)       | 30.0                       |          |          |
| distance wells at aquifer level (m)        | 975.0                      |          |          |
| pump system efficiency (-)                 | 0.7                        |          |          |
| production pump depth (m)                  | 697.0                      |          |          |
| pump pressure difference (bar)             | 53.0                       |          |          |
| outer diameter producer (inch)             | 8.5                        |          |          |
| skin producer (-)                          | -1.4                       |          |          |
| skin due to penetration angle p (-)        | -0.58                      |          |          |
| pipe segment sections p (m AH)             | 731.0,1217.0,2060.0,2115.0 |          |          |
| pipe segment depth p (m TVD)               | 719.0,1179.0,1828.0,1870.0 |          |          |
| pipe inner diameter p (inch)               | 7.72,12.35,8.53,6.18       |          |          |
| pipe roughness p (milli-inch)              | 1.19,1.19,1.19,1.19        |          |          |
| outer diameter injector (inch)             | 8.5                        |          |          |
| skin injector (-)                          | -3.4                       |          |          |
| skin due to penetration angle i (-)        | -0.73                      |          |          |
| pipe segment sections i (m AH)             | 58.0,1207.0,1896.0,1963.0  |          |          |
| pipe segment depth i (m TVD)               | 51.0,1176.0,1734.0,1785.0  |          |          |
| pipe inner diameter i (inch)               | 7.72,12.35,8.53,6.18       |          |          |
| pipe roughness i (milli-inch)              | 1.19,1.19,1.19,1.19        |          |          |

### Geotechnics (Output)

| Monte Carlo cases (stochastic inputs)  | P90    | P50    | P10    |
|----------------------------------------|--------|--------|--------|
| aquifer kH net (Dm)                    | 28.53  | 35.88  | 44.49  |
| mass flow (kg/s)                       | 77.86  | 119.06 | 149.39 |
| pump volume flow (m³/h)                | 251.6  | 384.8  | 482.9  |
| required pump power (kW)               | 529.1  | 809.4  | 1015.6 |
| geothermal power (MW)                  | 13.51  | 21.89  | 27.19  |
| COP (kW/kW)                            | 24.2   | 25.9   | 27.5   |
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.0  | 205.0  | 205.0  |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 197.0  | 197.0  | 197.0  |
| pressure difference at producer (bar)  | 14.63  | 21.02  | 24.96  |
| pressure difference at injector (bar)  | 19.03  | 27.97  | 36.04  |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 79.08  | 82.24  | 86.12  |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 78.19  | 81.16  | 85.09  |
| base case (median value inputs)        | value  |        |        |
| aquifer kH net (Dm)                    | 34.82  |        |        |
| mass flow (kg/s)                       | 108.43 |        |        |
| pump volume flow (m³/h)                | 350.9  |        |        |
| required pump power (kW)               | 738.0  |        |        |
| geothermal power (MW)                  | 18.89  |        |        |
| COP (kW/kW)                            | 25.6   |        |        |
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.0  |        |        |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 197.0  |        |        |
| pressure difference at producer (bar)  | 19.92  |        |        |
| pressure difference at injector (bar)  | 27.12  |        |        |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 82.0   |        |        |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 81.12  |        |        |
| pressure at heat exchanger (bar)       | 27.98  |        |        |

\* @ mid aquifer depth

**Figuur 4:** DoubletCalc1D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor het geprognoteerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur van Andijk I.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
34/43

## DoubletCalc1D uitvoer – Prognose 350 m<sup>3</sup>/uur Andijk II

### Geotechnics (Input)

| Property                        | min      | median   | max      |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| aquifer permeability (mD)       | 229.0    | 248.0    | 269.0    |
| aquifer net to gross (-)        | 0.96     | 0.98     | 1.0      |
| aquifer gross thickness (m)     | 128.0    | 145.0    | 163.0    |
| aquifer top at producer (m TVD) | 1690.0   | 1878.0   | 2066.0   |
| aquifer top at injector (m TVD) | 1625.0   | 1805.0   | 1986.0   |
| aquifer water salinity (ppm)    | 140000.0 | 189000.0 | 199000.0 |

| Property                                       | value                         |
|------------------------------------------------|-------------------------------|
| number of simulation runs (-)                  | 10.0                          |
| aquifer kh/kv ratio (-)                        | 1.0                           |
| surface temperature (°C)                       | 10.0                          |
| geothermal gradient (°C/m)                     | 0.0369                        |
| [ mid aquifer temperature producer (°C) ]      | 82.0                          |
| initial aquifer pressure at producer (bar) ]   | 205.5                         |
| [ initial aquifer pressure at injector (bar) ] | 196.0                         |
| exit temperature heat exchanger (°C)           | 30.0                          |
| distance wells at aquifer level (m)            | 987.0                         |
| pump system efficiency (-)                     | 0.7                           |
| production pump depth (m)                      | 800.0                         |
| pump pressure difference (bar)                 | 76.2                          |
| outer diameter producer (inch)                 | 8.5                           |
| skin producer (-)                              | -1.6                          |
| skin due to penetration angle p (-)            | -0.43                         |
| pipe segment sections p (m AH)                 | 835.0, 1217.0, 1951.0, 2056.0 |
| pipe segment depth p (m TVD)                   | 822.0, 1187.0, 1794.0, 1878.0 |
| pipe inner diameter p (inch)                   | 7.72, 12.35, 8.53, 6.18       |
| pipe roughness p (milli-inch)                  | 1.19, 1.19, 1.19, 1.19        |
| outer diameter injector (inch)                 | 8.5                           |
| skin injector (-)                              | 1.25                          |
| skin due to penetration angle i (-)            | -0.43                         |
| pipe segment sections i (m AH)                 | 59.0, 1212.0, 1929.0, 1990.0  |
| pipe segment depth i (m TVD)                   | 52.0, 1177.0, 1757.0, 1806.0  |
| pipe inner diameter i (inch)                   | 7.72, 12.35, 8.53, 6.18       |
| pipe roughness i (milli-inch)                  | 1.19, 1.19, 1.19, 1.19        |

### Geotechnics (Output)

| Monte Carlo cases (stochastic inputs) | P90   | P50    | P10    |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|
| aquifer kH net (Dm)                   | 33.15 | 35.36  | 38.63  |
| mass flow (kg/s)                      | 93.87 | 112.53 | 133.29 |
| pump volume flow (m <sup>3</sup> /h)  | 303.4 | 372.9  | 429.5  |
| required pump power (kW)              | 917.3 | 1127.7 | 1298.7 |
| geothermal power (MW)                 | 16.06 | 19.61  | 24.47  |
| COP (kW/kW)                           | 16.7  | 17.9   | 19.2   |

|                                        |       |       |       |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.5 | 205.5 | 205.5 |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 196.0 | 196.0 | 196.0 |
| pressure difference at producer (bar)  | 17.21 | 19.18 | 23.45 |
| pressure difference at injector (bar)  | 45.56 | 52.43 | 67.47 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 78.34 | 82.34 | 85.95 |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 77.57 | 81.43 | 85.1  |

| base case (median value inputs)      | value  |
|--------------------------------------|--------|
| aquifer kH net (Dm)                  | 35.24  |
| mass flow (kg/s)                     | 108.2  |
| pump volume flow (m <sup>3</sup> /h) | 349.9  |
| required pump power (kW)             | 1058.0 |
| geothermal power (MW)                | 18.86  |
| COP (kW/kW)                          | 17.8   |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| aquifer pressure at producer (bar)     | 205.5 |
| aquifer pressure at injector (bar)     | 196.0 |
| pressure difference at producer (bar)  | 19.36 |
| pressure difference at injector (bar)  | 53.33 |
| aquifer temperature at producer * (°C) | 82.0  |
| temperature at heat exchanger (°C)     | 81.14 |
| pressure at heat exchanger (bar)       | 50.58 |

\* @ mid aquifer depth

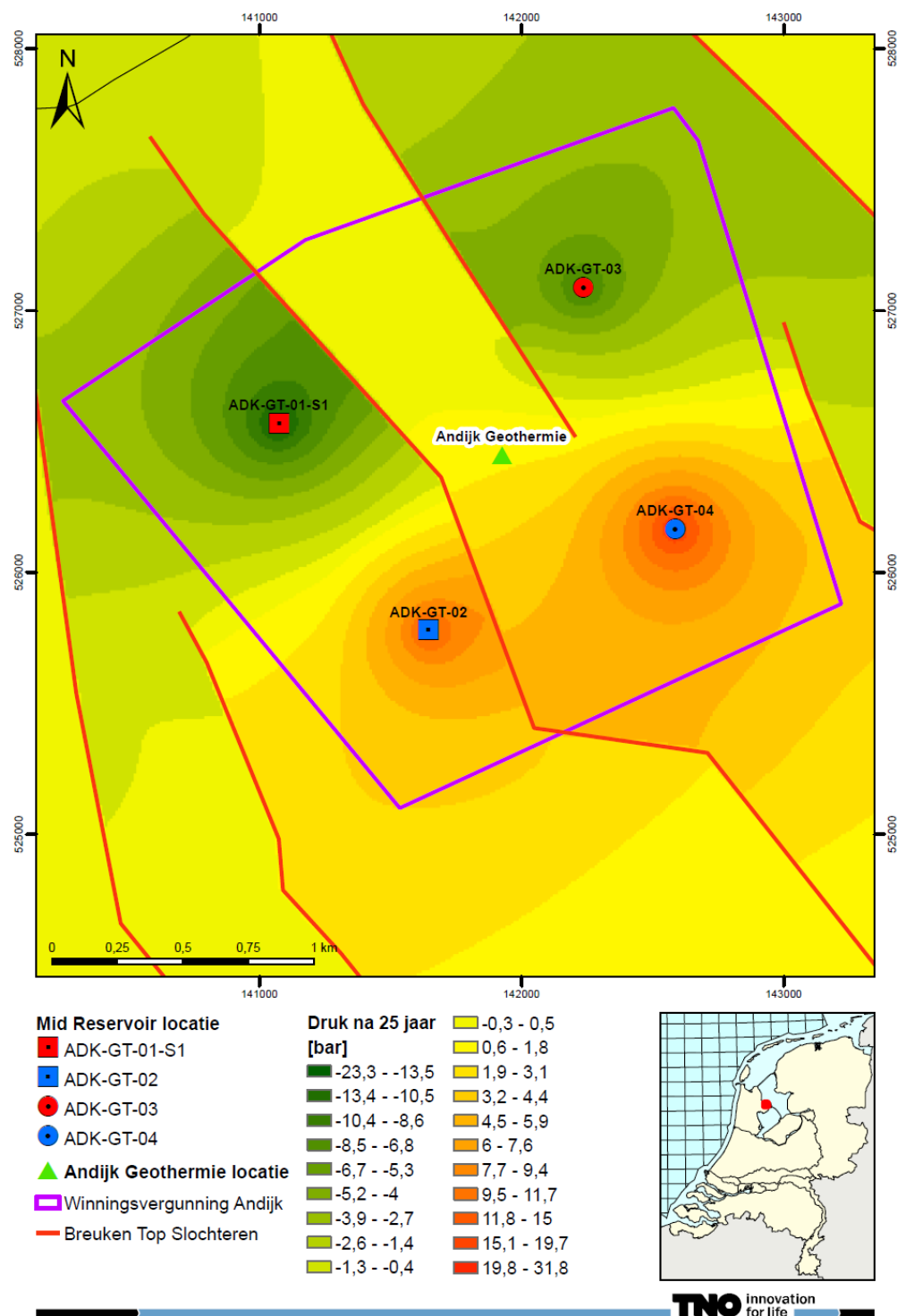
Figuur 5: DoubletCalc1D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor het geprognostiseerde debiet van 350 m<sup>3</sup>/uur van Andijk II.

# DoubletCalc2D uitvoer na 25 jaar

Datum  
13 december 2019

Onze referentie  
AGE 19-10.074

Blad  
35/43

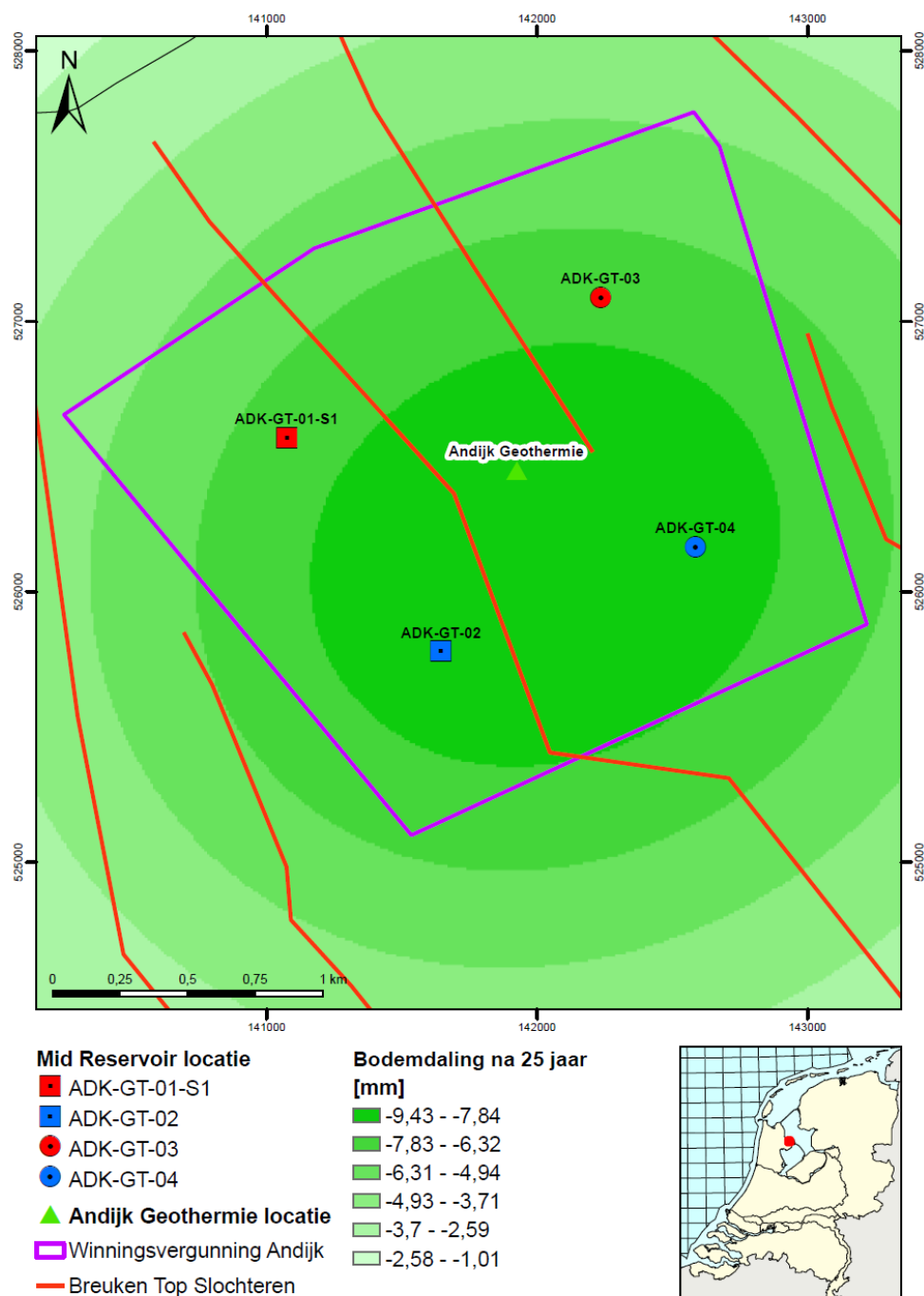


Figuur 6: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor de huidige situatie met geprognostiseerde debieten. De kaart toont de drukverandering (na 25 jaar) op het moment van overschrijding van de winningsvergunningsgrens door de koudwaterbel bij Andijk II.

Datum  
13 december 2019

Onze referentie  
AGE 19-10.074

Blad  
36/43

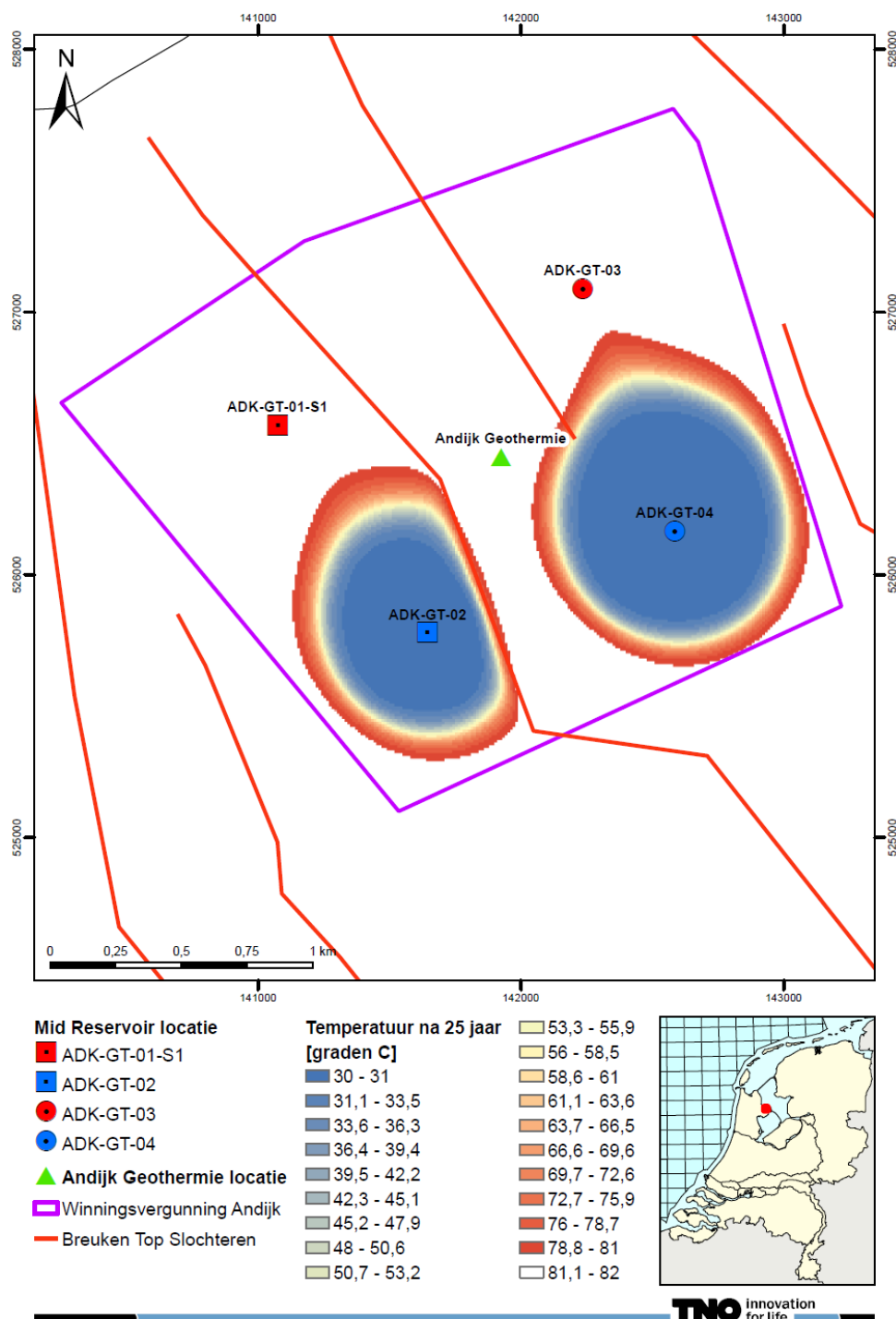


Figuur 7: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor de huidige situatie met geprognoseerde debieten. De kaart toont de bodemdaling (na 25 jaar) op het moment van overschrijding van de winningsvergunningsgrens door de koudwaterbel bij Andijk II.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
37/43



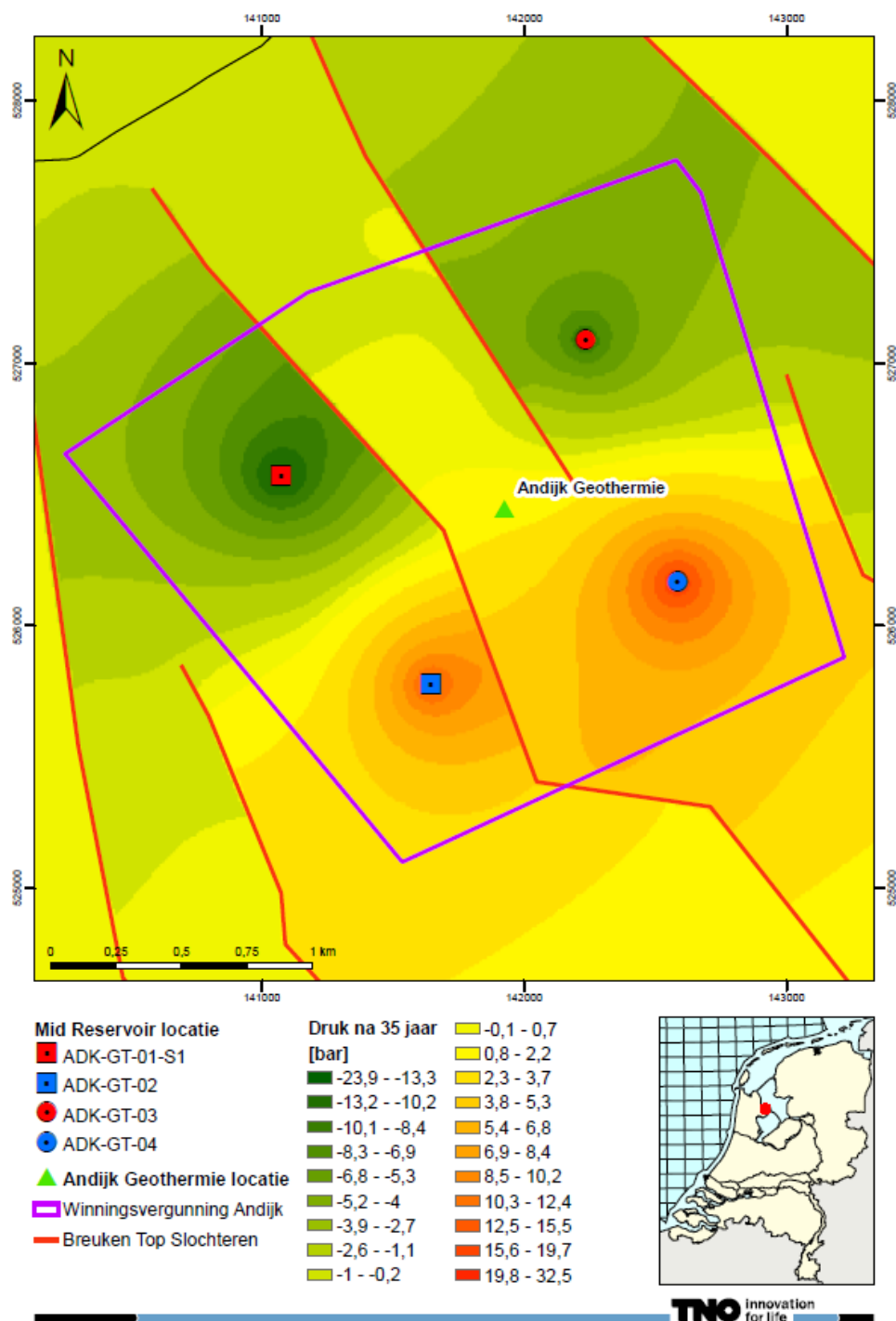
*Figuur 8: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor de huidige situatie met geprognostiseerde debieten. De kaart toont de reservoirtemperatuur (na 25 jaar) op het moment van overschrijding van de winningsvergunningsgrens door de koudwaterbel bij Andijk II.*

## DoubletCalc2D uitvoer na 35 jaar

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
38/43

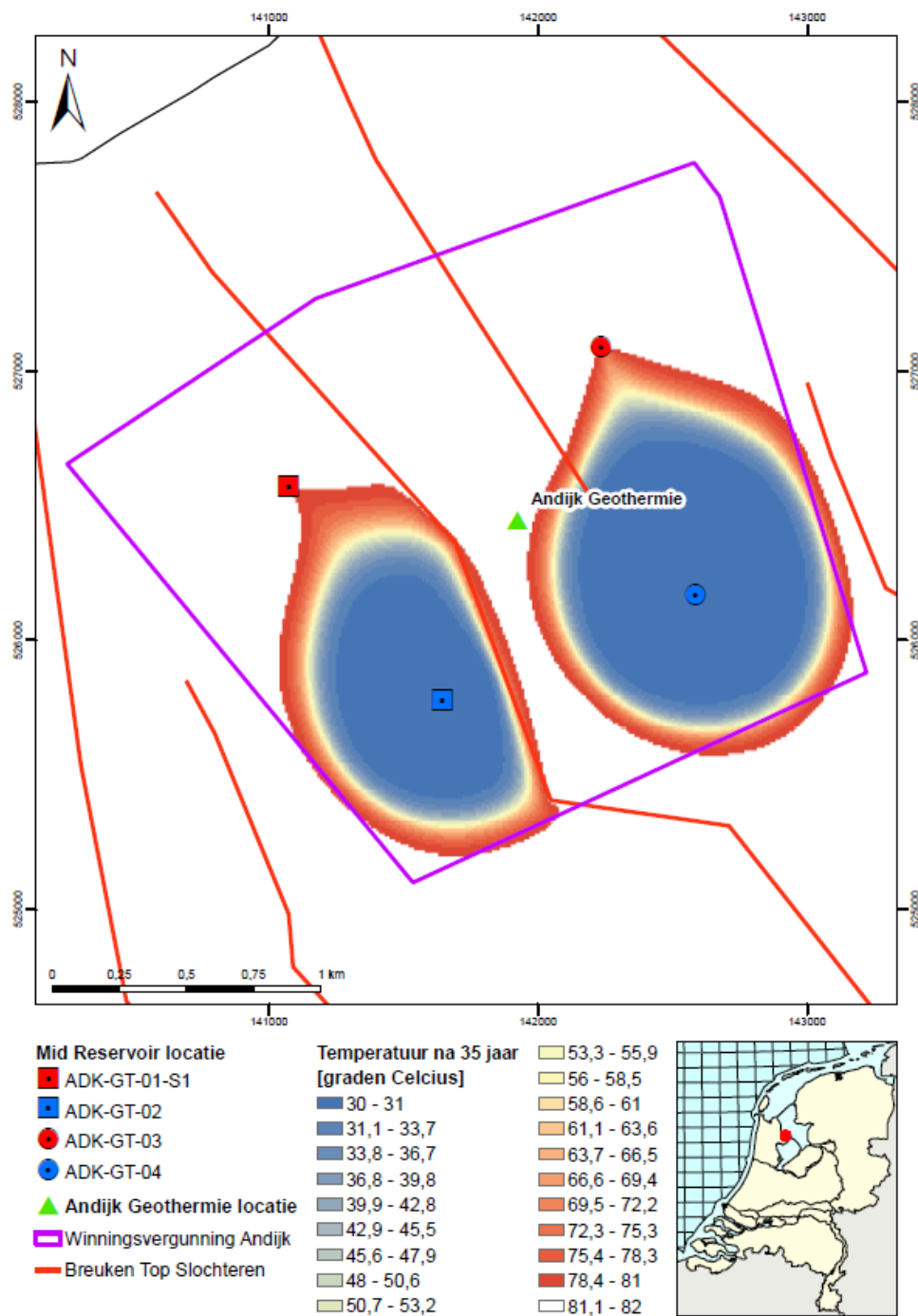


Figuur 9: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor de huidige situatie met geprognostiseerde debieten. De kaart toont de drukverandering op reservoirdiepte aan het eind van de huidige winningsvergunningsduur, dus na 35 jaar productie.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
39/43

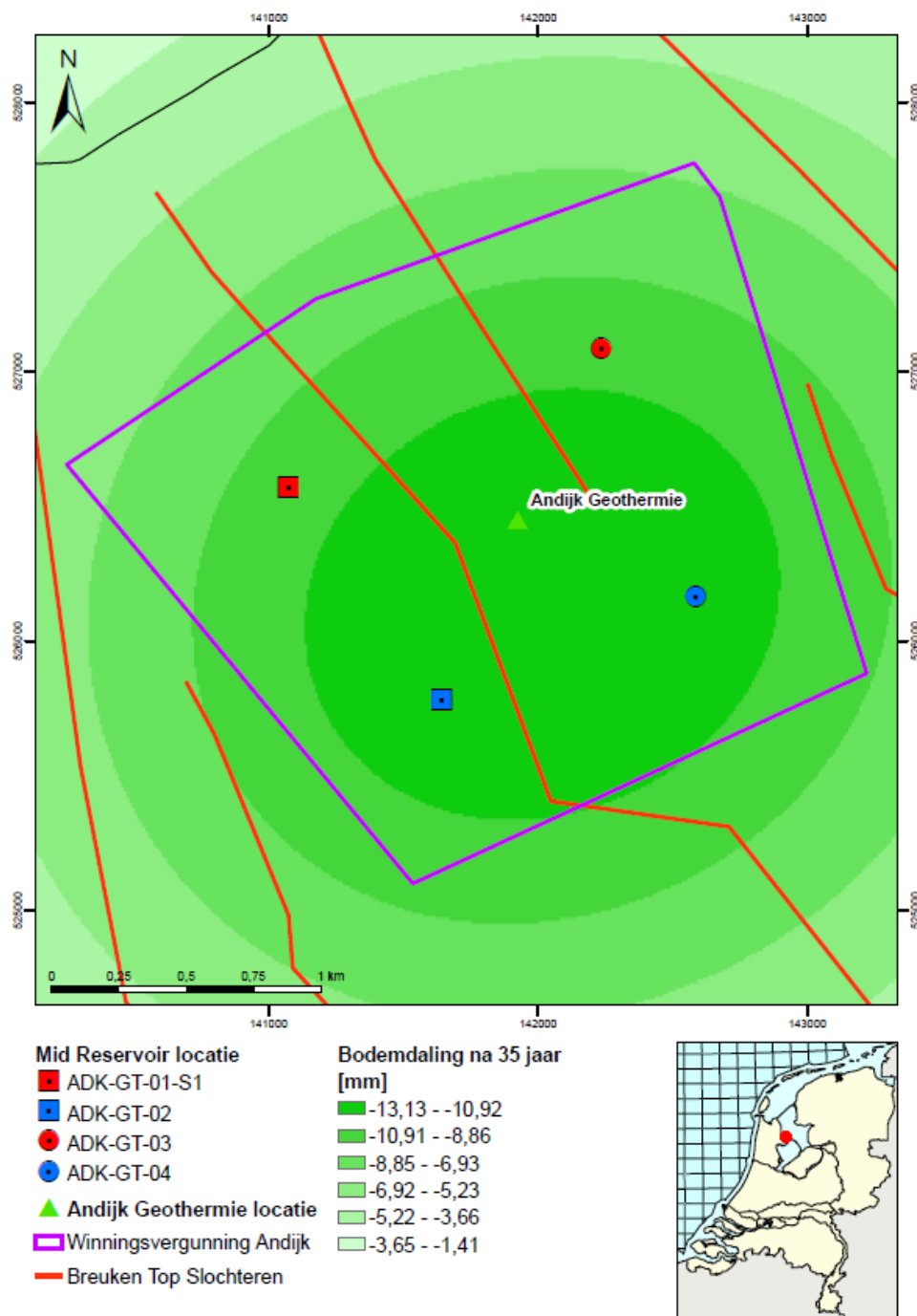


Figuur 10: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE en geprognostiseerde debiet. De kaart toont de temperatuur op reservoirdiepte aan het eind van de huidige winningvergunningsduur, dus na 35 jaar productie.

**Datum**  
13 december 2019

**Onze referentie**  
AGE 19-10.074

**Blad**  
40/43



Figuur 11: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE scenario voor de huidige situatie met geprognostiseerde debieten. De kaart toont de mate van bodemdaling aan het eind van de huidige winnings-vergunningsduur, dus na 35 jaar productie.



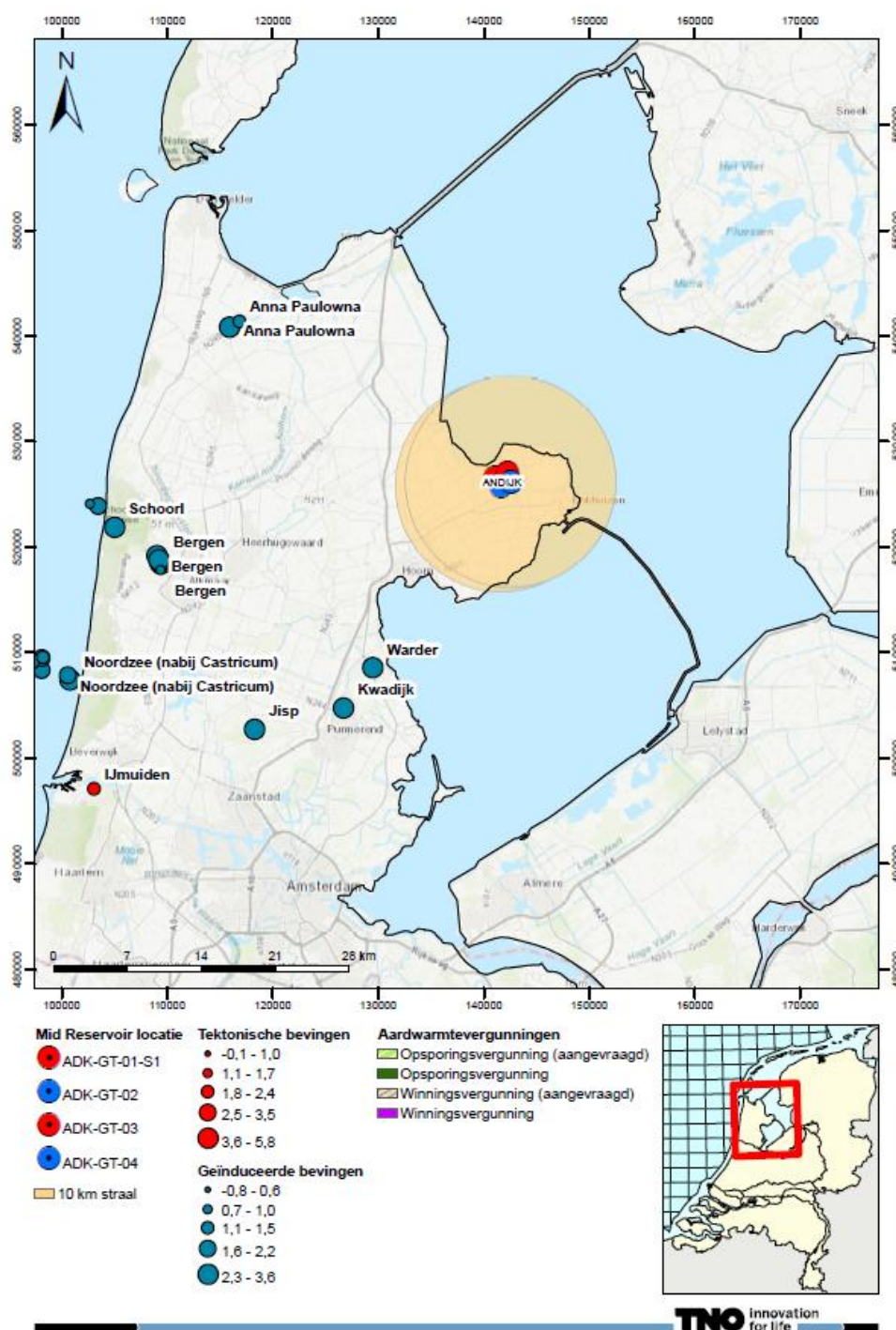
Datum  
13 december 2019

Onze referentie  
AGE 19-10.074

Blad  
41/43

### Bijlage 3: SHRA evaluatie kaarten

Afstand tot bekende natuurlijke en geïnduceerde bevingen.



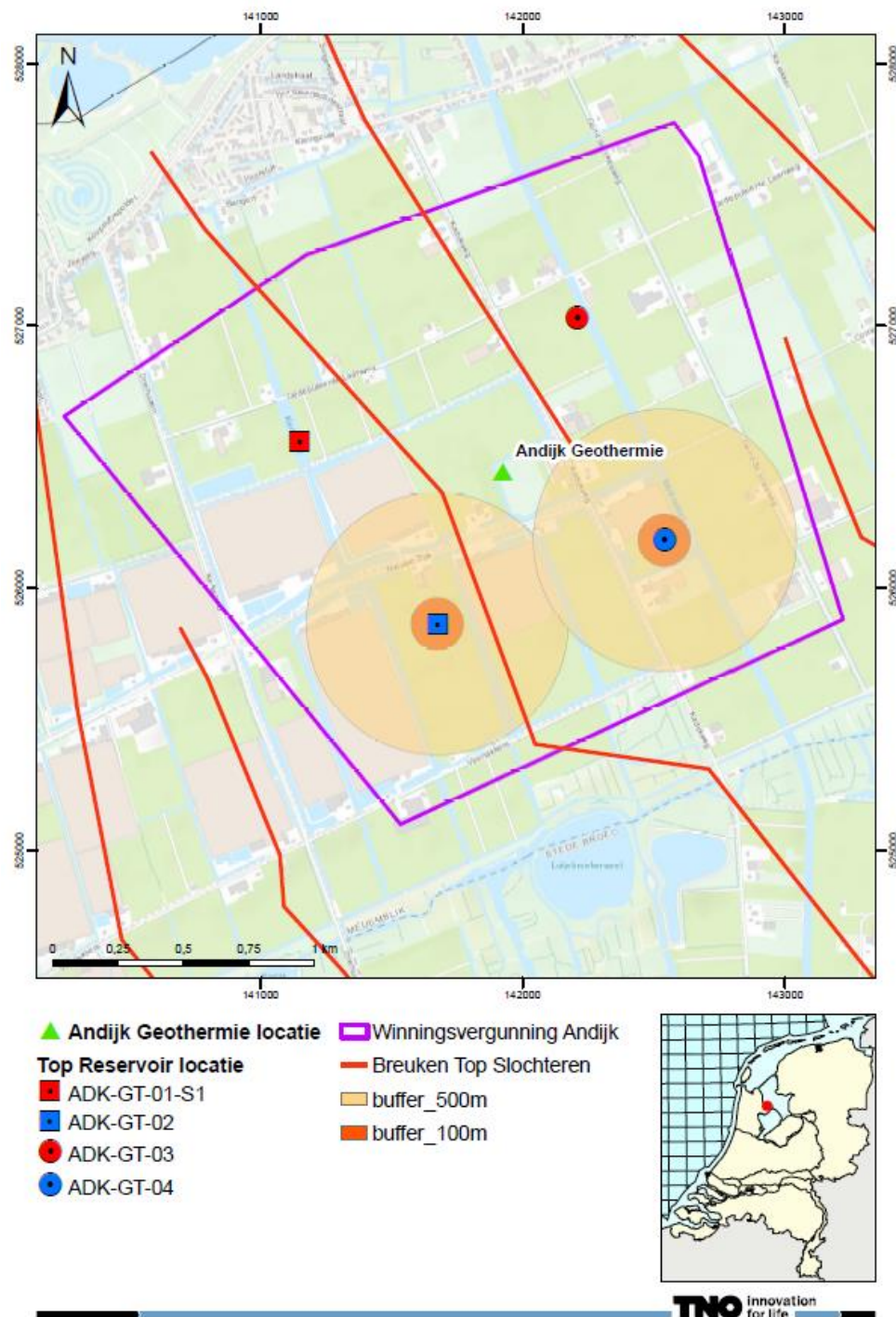
Figuur 12: Overzicht van natuurlijke en geïnduceerde bevingen in de nabijheid van het geothermiesysteem Andijk. De weergegeven bevingen komen uit de aardbevingscatalogus van het KNMI (<https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingcatalogus> – 03-06-2

Afstand tot breuken.

Datum  
13 december 2019

Onze referentie  
AGE 19-10.074

Blad  
42/43



Figuur 13: Afstand van de injectieputten, top reservoir tot de geïnterpreteerde breuken in de ondergrond.

## **Bijlage 4: erratalijst**

- De vergunninghouder rapporteert de beschrijving van de putten en putschema's met een dieptereferentie vanaf grondniveau (maaiveld). Normaal gesproken is de dieptereferentie vanaf "rotary table" (RT). Maaiveld als dieptereferentie gebruiken kan, mits consequent toegepast. De vergunninghouder geeft de einddieptes in Tabel 1 van [1] t.o.v. het maaiveld, dit klopt voor de putten ADK-GT-01, -02 en -03. Echter voor ADK-GT-04 lijkt het erop dat de vergunninghouder RT als dieptereferentie gebruikt.
- De vergunninghouder levert in het Winningsplan [1] geen historische productie aan, terwijl dit wel van de vergunninghouder verwacht wordt volgens het winningsplan format.
- In het winningsplan [1] worden verschillende kaarten gegeven waarop de injectie- en productieputten weergegeven zijn. Figuren 2, 13, 14, 17, 29, 30, 31 en 32 in [1] geven de configuratie weer waarbij de twee noordelijke putten, ADK-GT-01-S1 en ADK-GT-03, de productieputten zijn, hetgeen overeenkomt met productiedata die bekend is bij TNO-AGE. Echter Figuur 35 van [1] geeft een andere putconfiguratie, waarbij de twee zuidelijke putten, ADK-GT-02 en ADK-GT-04, de productieputten zijn. Deze configuratie komt overeen met wat in de winningsvergunning is aangegeven. TNO-AGE gaat uit van de configuratie die overeenkomt met de productiedatabase en die door vergunninghouder gegeven is in Tabel 1 van [1].
- In Figuur 28 van [1] geeft vergunninghouder aan een putdiameter van 7" te gebruiken in het DoubletCalc2D model. 7" is inderdaad de diameter van de "pre-perforated liner", echter in DoubletCalc2D moet de diameter van het boorgat ingevuld worden, welke 8,5" is.