

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 Californië V

Geachte [REDACTED],

Naar aanleiding van uw adviesverzoek van 3 oktober 2019 (per email) ter ondersteuning van het te nemen instemmingsbesluit betreffende het winningsplan aardwarmte Californië V van 3 mei 2019 door Californië Lipzig Gielen BV (CLG) (hierna: vergunninghouder), stuur ik u hierbij ons advies.

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft TNO-AGE gevraagd om advies uit te brengen en controleberekeningen uit te voeren op het ingediende winningsplan Californië V op de volgende onderwerpen:

- a. **Veiligheid van omwonenden, schade aan gebouwen of infrastructurele werken als gevolg van bodembeweging:**
 - Bodemtrilling: 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 aardwarmte-systeem;
 - Duur en hoeveelheden van de winning;

Inleidende opmerkingen

Het aardwarmtesysteem Californië V produceert warmte sinds 2017. In de omgeving van het aardwarmtesysteem heeft zich in augustus en september 2018 seismiciteit voorgedaan die mogelijk verband houdt met de aardwarmtewinning.

TNO-AGE ziet veiligheid als hoofdvoorwaarde voor doelmatige aardwarmtewinning. Daarom heeft TNO-AGE het advies over het winningsplan van CLG toegespitst op de evaluatie van de seismische dreiging.

Bepaling van de precieze oorzaak van de seismiciteit wordt bemoeilijkt door het ontbreken van een afdoende gedetailleerd ondergrondmodel, gebaseerd op een

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

Datum

7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Contactpersoon

[REDACTED]

E-mail

[REDACTED]@tno.nl

Doorkiesnummer

+31 [REDACTED]

Bijlage(n)

2

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. Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

voldoende dicht netwerk van 2D-seismische lijnen of 3D-seismiek, en door grote onzekerheid over de plaats- en dieptebeoordeling van de waargenomen seismiciteit.

Tijdens het adviestraject is CLG verzocht om aanvullende data aan te leveren. TNO-AGE heeft de gedetailleerde productiedata van 2017 en 2018 van CLG ontvangen en ook de ruwe data van de vijf seismische monitoringstations die het vergunningsgebied bestrijken.

Advies in het kort

Op basis van de evaluatie van de risicobeoordeling seismiciteit adviseert TNO-AGE om vooralsnog niet in te stemmen met het ingediende winningsplan voor het aardwarmtesysteem Californië V.

Doordat de precieze oorzaak van de aardbevingen op dit moment niet met zekerheid kan worden vastgesteld, is TNO-AGE niet in staat te beoordelen of aardwarmtewinning bij Californië V veilig plaats kan vinden en of passende beheersmaatregelen getroffen kunnen worden om de seismische dreiging voldoende in te perken.

Hieronder volgt een samenvatting van de belangrijkste uitkomsten van de geotechnische evaluatie en een toelichting op het advies. Voor de gedetailleerde geotechnische evaluatie van de seismische dreiging uitgevoerd door TNO-AGE verwijzen we lezers met een geotechnische achtergrond naar Bijlage 1.

Beschrijving winning

Geothermisch systeemconfiguratie

Het aardwarmtesysteem Californië V (hierna: CLG-doublet) bestaat uit productieput CAL-GT-04 en injectieput CAL-GT-05. Het CLG-doublet is in 2017 in productie gegaan en na optreden van seismiciteit in 2018 is de productie gestopt. Het CLG-doublet ligt in het gebied dat is gedefinieerd als de winningsvergunning Californië V (ca. 4,6 km²). Deze vergunning is bij beschikking, met kenmerk DGETM-EO/17098517, op 5 juli 2017 verleend aan Californië Lipzig Gielen B.V. voor een periode van 35 jaar.

Californië V grenst ten zuidoosten aan de winningsvergunning Californië IV (zie ook Figuur 1, Bijlage 1), met als vergunninghouder Californië Wijnen Grubbenvorst (CWG). Aardwarmtewinning door het aardwarmtesysteem Californië IV (hierna: CWG-doublet), bestaande uit productieput CAL-GT-01 en injectieput CAL-GT-03, vond plaats sinds 2015 en is in mei 2018 stilgelegd.

Met het CLG-doublet wordt aardwarmte gewonnen op een diepte van 1200 tot 2400 m, voornamelijk uit de watervoerende intervallen in de Onder-Carboon Kalkstenen van de Zeeland Groep en Devoon zandstenen van de Bosscheveld Formatie. Door de lage matrixpermeabiliteit van deze gesteenten is het waarschijnlijk dat stroming voornamelijk plaats vindt via scheuren, breuken en/of zones gerelateerd aan karstificatie.

Historische productie

Het CLG-doublet heeft met een maximaal debiet van circa 230 m³/uur en een temperatuurval van maximaal 51°C geopereerd (bron: productiedata van aanvang winning op 2017-06-01 tot einde winning 2018-09-10). De temperatuur van het geproduceerde water is circa 87°C en de gewonnen warmte werd gebruikt door

glastuinbouwbedrijven. Tot aan het stopzetten van het systeem in september 2018 is ca. 0,26 PJ aan warmte-energie gewonnen. Historische productiegegevens uit de periode juli 2017 tot september 2018 geven een totaal gecirculeerd volume van 1,34 miljoen m³ water, met een gemiddeld maanddebiet van 198 m³/uur, variërend tussen de 166 en 230 m³/uur. Het maandelijks gemiddelde temperatuurverschil tussen het injectie- en productiewater is 48°C, variërend tussen 44 en 51°C. De maandelijks gemiddelde totale pompdruk is 37,7 bar, variërend tussen 33,4 en 42,4 bar. Hierbij varieert de injectiedruk op reservoirniveau tussen de 25,5 en 35,0 bar met een gemiddelde van 30 bar. Uit de productiedata blijkt dat de injectiedruk op reservoirdiepte een schommelende dalende trend laat zien, van circa 35 naar 25 bar, die suggereert dat de injectiviteit van de put verbeterd.

Geregistreeerde seismiciteit

Op 25 augustus 2018 om 16.43 uur vond er een aardbeving met een magnitude van 0,0 op de schaal van Richter (M_L) plaats nabij de injectieput CAL-GT-05 van het CLG-doublet (Tabel 10 [1]). Daarna is de winning op 28 augustus 2018 rond 17.30 uur stilgezet en sindsdien niet meer opgestart (Figuur 17 [2]). Op 3 september om 18.20 uur, circa 6 dagen na de productiestop, is er een M_L 1,7 aardbeving geregistreerd in de nabijheid van de injectieput CAL-GT-03 van het CWG-doublet, waar de productie al sinds mei 2018 was stilgelegd. De haardlocatie van de M_L 1,7 beving en de M_L ≤ 0 bevingen, die enkele minuten voorafgaand en daaropvolgend plaatsvonden, komen qua berekende haardlocaties overeen met die haardlocaties van de lichte bevingen die plaatsvonden nabij de injectieput CAL-GT-03 in de periode 2015-2017 toen het CWG-doublet nog operationeel was.

Door het tot op heden uitblijven van nieuwe bevingen in en rond het vergunningsgebied, is vergunninghouder van zins het CLG-doublet weer op te starten en operaties te hervatten conform de beschrijving in het winningsplan. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het bestaande seismische monitoringsysteem en voorgestelde stoplichtsysteem als beheersmaatregel voor het seismisch risico.

1. Bodemtrilling

Op basis van gegevens van het landelijke KNMI-meetnetwerk en het lokale meetnetwerk geïnstalleerd bij Californië, concludeert zowel de vergunninghouder als TNO-AGE dat er meerdere aardbevingen zijn geregistreerd in de nabije omgeving van het CLG-doublet rond de periode van aardwarmtewinning. De locatie van de aardbevingen in zowel kaartbeeld als in diepte heeft een grote mate van onzekerheid.

Vergunninghouder heeft conform de leidraad^{1,2} een level-2 seismische hazard- en risicoanalyse (SHRA) uitgevoerd en concludeert dat winning veilig en verantwoord kan worden voortgezet met het reeds beschikbare stoplichtsysteem.

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

² TNO-AGE ziet de leidraad¹ als een goede eerste stap om tot een bruikbare SHRA voor geothermie te komen, maar is van mening dat deze in de huidige vorm suboptimaal is om een eenduidige en adequate inschatting van de seismische dreiging van een

Conform de tijdelijke leidraad heeft TNO-AGE zowel de SHRA quickscan uitgevoerd als de locatiespecifieke seismische hazardanalyse (SHA) van de vergunninghouder geëvalueerd.

Op basis van de SHRA quickscan komt TNO-AGE uit op een gemiddeld tot gemiddeld-hoog potentieel voor het induceren van seismiciteit met de voorgenomen aardwarmtewinning in het CLG-doublet.

Uit de evaluatie van de locatiespecifieke SHA door TNO-AGE blijkt dat de door de vergunninghouder aangeleverde gegevens, analyse- en evaluatieresultaten een adequaat detailniveau missen. Op basis van putgegevens van zowel CLG als CWG heeft TNO-AGE het reservoirmodel van de vergunninghouder geëvalueerd. Met name de structureel-geologische interpretatie van het reservoir mist voldoende detail, in het bijzonder voor de aanwezigheid van breuken in het beïnvloedingsgebied van de injectieput CAL-GT-05.

Het ontbreken van een gedetailleerd ondergrondmodel gebaseerd op een voldoende dicht netwerk van 2D-seismische lijnen of 3D-seismiek heeft implicaties voor de diagnose van de geregistreerde aardbevingen. Voor de bepaling van het haardmechanisme is een betrouwbare dieptelocatie van de aardbevingshaarden onmisbaar. Het gebrek aan adequate seismiek en de onzekerheid in de haardlocatiebepaling bij Californië V, mede door het ontbreken van een lokaal snelheidsmodel maken het onmogelijk om met voldoende zekerheid de waargenomen bevingen aan (delen van) een aanwezige breuk of breuken (al dan niet gekarteerd) toe te schrijven.

Daarnaast is onduidelijk wat de spanningstoestand is geweest op het moment van schuiven langs breuk(en) waar de bevingen mogelijk hebben plaats gevonden. Ook de oorzaak en sterkte van de spanningsverandering die het breukvlak hebben doen schuiven, zijn niet te achterhalen, waardoor de mogelijkheid van een natuurlijke oorzaak niet volledig kan worden uitgesloten.

Op de beving van M_L 0,0 (beving 8) bij de eigen injector CAL-GT-05 na, schrijft vergunninghouder alle bevingen toe aan de aardwarmtewinning door het naastgelegen CWG-doublet. TNO-AGE acht het aannemelijk dat de injectie van koud water bij de CAL-GT-03 put van het CWG-doublet verband houdt met bevingen 1 tot 7, geregistreerd tussen 2015-2017. Toch is TNO-AGE van mening dat, in de periode dat het CWG-doublet stillag, een verband tussen aardwarmtewinning bij CLG en de bevingen 9 tot 17, inclusief beving 11 van M_L 1,7, niet voldoende kan worden ontkracht.

TNO-AGE constateert, evenals de vergunninghouder, een correlatie tussen het optreden van seismiciteit en aardwarmtewinning bij zowel het CLG- als CWG-doublet. De meeste aardbevingen vonden plaats enkele uren tot meerdere dagen na significante debietsverlagingen ($\geq 75 \text{ m}^3/\text{uur}$) of productiestops.

De vergunninghouder doet geen uitspraken over mogelijke maximale magnitudes van bevingen of frequenties van optreden. Wel wordt de kans op een beving van

M_L 2,4 op minder dan 10% ingeschat, gegeven de eerdere tektonische beving bij Lottum en een b-waarde van 1.

Door de onzekerheden in het ondergrondmodel en onduidelijkheden over het haardmechanisme van de bevingen is niet goed vast te stellen op welk breukvlak de bevingen plaatsvonden. Zonder informatie over de relevante breuken en bijbehorende dimensies is dan ook niet op te maken wat de kans, de mogelijke frequentie van optreden en de magnitudes van toekomstige bevingen kunnen zijn.

Hierdoor is het voor TNO-AGE vooralsnog niet mogelijk om het seismisch risico adequaat in te schatten.

Monitoring en mitigatie

Bij conventionele beheersmaatregelen zoals het door de vergunninghouder ingestelde stoplichtsysteem, wordt de productie verlaagd of compleet stilgelegd na overschrijding van opgestelde grenswaarden voor bodemtrilling. Dit heeft als doel de frequentie en magnitude van nieuwe bevingen te beperken.

Voor de bepaling van de "Peak Ground Velocity" (PGV) of grondopslingering ten gevolge van een aardbeving is een "Ground Motion Prediction Equation" (GMPE) nodig. Om de PGV goed te kunnen bepalen, is een lagenmodel met geomechanische eigenschappen van de ondiepe ondergrond essentieel. Zo'n model is voor Californië momenteel niet beschikbaar, waardoor magnitudes niet direct zijn te vertalen naar een PGV. Voor de 1,7 M_L beving wordt een PGV van 1,1 mm/s gerapporteerd door de vergunninghouder in [1] op basis van het Q-con monitoringnetwerk [3]. De PGV van een M_L 1,4 en 2,4 beving worden op 0,5 en 5 mm/s geschat.

Vergunninghouder heeft een stoplichtsysteem ingesteld op basis van PGV-grenswaarden. Bij bevingen met een PGV < 0,1 mm/s (groene stoplicht) wordt geen actie ondernomen. Bij PGV > 0,1 mm/s en < 0,3 mm/s (oranje stoplicht) worden de oorzaak en mogelijke mitigatiemaatregelen onderzocht en wordt de toezichthouder ingelicht. Het doublet wordt direct stilgelegd en de toezichthouder ingelicht bij PGV ≥ 0,3 mm/s (rode stoplicht). Om escalatie naar oncontroleerbare magnitudes te voorkomen, heeft vergunninghouder een maximale grenswaarde ingesteld die rekening houdt met een magnitudesprong van maximaal 1,3 magnitude-eenheden op te vangen. De uiterste grenswaarde van het systeem komt overeen met een maximale magnitude van ongeveer M_L 1,1. Op basis van deze waarden lijkt vergunninghouder rekening te houden met een maximale magnitude van 2,4.

In het geval van CLG, heeft het stoplichtsysteem niet goed gewerkt, hetgeen uit de volgende observaties valt af te leiden:

- 1) Beving 11 (M_L 1,7, 03-09-2018 18:20) overschreed ruimschoots de door de vergunninghouder opgestelde grenswaarden van het rode stoplicht. De groundbeweging was 1,1 mm/s bij een grenswaarde van 0,3 m/s.
- 2) In overeenstemming met de afgesproken operationele ruimte werd het CLG-doublet op 28 augustus 17:30 stilgelegd naar aanleiding van beving 8 (M_L 0,0, 25-08-2018 16:43) die nog binnen de grenswaarde van het groene stoplicht viel. De daaropvolgende magnitudesprong van beving 8 naar beving 11 was 1,7 magnitude eenheden en is groter dan de 1,3

magnitude eenheden waar het stoplichtsysteem op is berekend om na-ijleffecten te beperken.

- 3) De voornaamste maatregel om de frequentie en magnitude van de seismiciteit te beperken, was het terugbrengen van het debiet of een algehele productiestop. Op basis van de productiedata lijkt er juist een correlatie te zijn tussen de bevingen en significante verlagingen van het debiet of productiestops.

TNO-AGE is er niet van overtuigd dat dit stoplichtsysteem bij toekomstige winning in deze specifieke geologisch-tektonische configuratie wel goed zal werken omdat: 1) de uiterste grenswaarden van het stoplichtsysteem al ruim zijn overschreden; 2) de magnitudesprong tussen de bevingen groter waren dan waar het stoplichtsysteem op was berekend; 3) de debietsverlagingen en productiestops - bedoeld om de frequentie en magnitude van de seismiciteit te beperken - zelf verband lijken te houden met de bevingen.

TNO-AGE kan vooralsnog geen duidelijke diagnose van de haardmechanismes stellen. Hierdoor is TNO-AGE niet in staat het seismische dreigingsniveau ten gevolge van aardwarmtewinning eenduidig te bepalen en blijft het onduidelijk welke beheersmaatregelen passend zijn om de seismische dreiging voldoende in te perken. Ook is TNO-AGE niet overtuigd van de werking van het door de vergunninghouder ingestelde stoplichtsysteem. Een ontwerp voor een adequaat monitoringssysteem passend bij de specifieke geologische situatie en opgelegde temperatuurs- en drukverandering in de ondergrond is nodig indien besloten wordt productie op termijn te hervatten.

2. Bodemdaling

Vergunninghouder heeft een bodemdaling van ca. 5 mm bij de injectieput bepaald in 2052 bij volcontinue productie van 300 m³/uur. TNO-AGE heeft op basis van de historische productiegegevens van CWG en CLG, de productieprognose van CLG in het winningsplan [1] en de reservoirparameters uit [4] de bodemdaling berekend. Aan het eind van de winningsvergunning in 2052 is de bodemdaling minder dan 5 mm voor een vollasturen-gecorrigeerd jaargemiddelde debiet van 186 m³/uur. De bodemdalingsskom bevindt zich op een locatie tussen de injectieputten van het CLG- en CWG-doublet (Figuur 20, Bijlage 2). De geringe bodemdaling is enkel het gevolg van de krimp van het reservoir door afkoeling van het gesteente. Het dichtstbijzijnde Natura2000 gebied ligt circa 6 km ten oosten van de injectieput CAL-GT-05, waardoor er geen modelmatige bodemdaling wordt berekend.

TNO-AGE is het met vergunninghouder eens dat, indien er geproduceerd gaat worden, de maximale modelmatig bepaalde bodemdaling ten gevolge van de winning van aardwarmte in de orde van 5 mm zal zijn aan het eind van de winning in 2052.

3. Planmatig gebruik van de ondergrond

Vergunninghouder beoogt 0,338 PJ per jaar te produceren door het systeem een gemiddeld jaardebiet van 186 m³/uur (200 m³/uur gecorrigeerd voor 8600 vollasturen per jaar) en een temperatuurval van 47 °C op te leggen tot het einde

Datum

7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

7/55

van de winningsvergunning in 2052 (Tabel 7 [1]). In Tabel 6 (p. 21 in [1]) vermeldt vergunninghouder een gemiddeld jaardebiet van 200 m³/uur en een maximaal debiet van 320 m³/uur.

TNO-AGE is van mening dat, gegeven de onzekerheden over de seismiciteit en de daaruit voortvloeiende afwezigheid van een eenduidige definitie van de operationele ruimte met betrekking tot onder meer de maximale injectiedruk, productie- en injectiedrukverloop, uitkoeling, adequate drempelwaarden voor seismiciteitsmonitoring en beheersmaatregelen, het niet mogelijk is een oordeel te geven of dit winningsplan doelmatig dan wel planmatig is.

4. Conclusie

Op basis van de evaluatie van de risicobeoordeling seismiciteit adviseert TNO-AGE om vooralsnog niet in te stemmen met het ingediende winningsplan voor het aardwarmtesysteem Californië V.

TNO-AGE is van mening dat de door de vergunninghouder aangeleverde gegevens, analyse- en evaluatieresultaten een adequaat detailniveau missen. Daarnaast is, ook door het ontbreken van een betrouwbare dieptelocatie van de geregistreerde aardbevingen, het vooralsnog niet mogelijk een duidelijke diagnose van de haardmechanismes te stellen. Hierdoor is het seismische dreigingsniveau niet eenduidig te bepalen en blijft onduidelijk welke beheersmaatregelen passend zijn om de seismische dreiging voldoende in te perken. TNO-AGE is niet overtuigd van de werking van het door de vergunninghouder ingestelde stoplichtsysteem omdat het bij de opgetreden bevingen niet goed heeft gewerkt.

5. Aanbevelingen

Voor eventueel vervolgonderzoek naar de waargenomen seismiciteit in relatie tot de aardwarmtewinning bij Californië V, geeft TNO-AGE de acquisitie van seismiek (bij voorkeur 3D-seismiek) en boorgatseismiek (Verticaal Seismisch Profiel of VSP) ter overweging om het lokale ondergrond- en snelheidsmodel te verbeteren. Hiermee zou de locatiebepaling van breuken en bevingen mogelijk verbeterd kunnen worden en is mogelijkwerijs het haardmechanisme van de bevingen te duiden op basis waarvan, zo mogelijk, een betere inschatting gemaakt kan worden van de operationele ruimte in relatie tot de veiligheidsnorm en er een adequaat monitorings- en mitigatieplan kan worden opgesteld.

Ik verwacht u hiermee van dienst te zijn geweest.

Met vriendelijke groet,




Hoofd Adviesgroep Economische Zaken en Klimaat

Datum

7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

8/55

Bijlage 1: geotechnische evaluatie winningsplan geothermie Californië V

Datum

7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

9/55

Inhoud

1	Introductie.....	10
1.1	Beleidsmatige referentiekader.....	10
1.1.1	Wetsartikelen van de mijnbouwwet en richtlijnen.....	11
1.2	Normstelling vergunninghouder.....	11
2	Situatieschets	11
2.1	Beschrijving van vergunningen en plannen.....	11
2.2	RNES en SDE aanvragen	12
2.3	Configuratie aardwarmtesysteem.....	12
3	Evaluatie put- en reservoirgegevens en ondergrondmodel	13
3.1	Beschrijving geothermisch systeem	14
3.2	Gelaagdheid van het reservoir / Reservoirstratigrafie	14
3.3	Resultaten puttestevaluatie	17
3.4	Samenvatting reservoir eigenschappen	19
3.5	Saliniteit formatiewater	19
3.6	Connectiviteit tussen de putten	20
3.7	Ondergrondmodel.....	20
3.7.1	Interpretatie seismische secties en structurele geologie van vergunninghouder	20
3.7.2	Bevindingen TNO-AGE statisch / structureel model diepe ondergrond en alternatieve scenario's	21
3.8	Productiegegevens en productieprognose CLG	22
4	Seismische Hazard en Risico Analyse (SHRA)	24
4.1	Eerste drie vragen beslisboom	24
4.2	Quickscantabel	25
4.2.1	Hydraulische connectie met het kristallijn basement.....	25
4.2.2	Drukcommunicatie tussen de putten	26
4.2.3	Injectiedruk	27
4.2.4	Debiet	27
4.2.5	Afstand tot natuurlijke breuken	27
4.2.6	Breukoriëntatie in het natuurlijk spanningsveld	29
4.2.7	Afstand tot natuurlijke aardbevingen	29
4.2.8	Afstand tot geïnduceerde aardbevingen	29

		Datum 7 april 2020
		Onze referentie AGE 20-10.037
		Blad 10/55
4.2.9	Netto geïnjecteerd volume.....	29
4.3	Resultaat Quickscan scoretabel voor CLG.	29
5	Level-2 locatie specifieke seismische hazardanalyse (SHA).....	30
5.1	Belangrijkste mechanismes voor geïnduceerde/getriggerde seismiciteit. 30	
5.1.1	Directe drukverandering (drukdiffusie)	31
5.1.2	Porro-elastische effecten	31
5.1.3	Thermo-elastische effecten	31
5.1.4	Effect-combinaties	32
5.2	Beslisboom voor de diagnose van de aard van de bevingen.....	32
5.2.1	Vraag 1 van seismiciteits-beslisboom: Waargenomen seismiciteit... 33	
5.2.2	Vraag 2 van seismiciteits-beslisboom: Ruimtelijke correlatie bevingen 40	
5.2.3	Vraag 3 van seismiciteits-beslisboom: Temporele correlatie bevingen 41	
5.2.4	Vraag 4 van seismiciteits-beslisboom: Mogelijke scenario's en oorzaken bevingen	43
5.3	Conclusie	52

1 Introductie

TNO-AGE heeft een geotechnische evaluatie uitgevoerd van de documenten die bij het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) zijn aangeleverd ter ondersteuning van het te nemen instemmingsbesluit betreffende het winningsplan voor het geothermiesysteem Californië V. Om het seismische risico op een geowetenschappelijke manier te duiden, heeft TNO-AGE zoveel mogelijk beschikbare data gebruikt. De putgegevens van zowel Californië V (Californië Lipzig-Gielen (CLG), CAL-GT-04 en CAL-GT-05) als Californië IV (Californië Wijnen Grubbenvorst (CWG), CAL-GT-01, CAL-GT-02 en CAL-GT-03) zijn gebruikt voor de evaluatie van het ondergrondmodel. Ook heeft TNO-AGE aanvullende data opgevraagd bij de vergunninghouder. Hierop heeft TNO-AGE de gedetailleerde productiedata van 2017 en 2018 van het CLG-doublet [5] ontvangen en ook de ruwe data van de vijf seismische monitoringstations die het vergunningsgebied bestrijken [6]. In deze rapportage worden de resultaten en bevindingen van de door TNO-AGE uitgevoerde evaluatie beschreven.

1.1 Beleidsmatige referentiekader

Indiening van een winningsplan aardwarmte door vergunninghouder en eventuele goedkeuring door de minister is voorzien in art. 34 en 35 van de mijnbouwwet in samenhang met art. 39 1a.

1.1.1 Wetsartikelen van de mijnbouwwet en richtlijnen.

Artikel 35 van de mijnbouwwet geeft onder punt 1 op hoofdlijnen weer waaraan het winningsplan moet voldoen:

“Het winningsplan bevat voor elk voorkomen binnen het vergunningsgebied ten minste een beschrijving van:

- a. de verwachte hoeveelheid aanwezige delfstoffen en de ligging ervan;
- b. het aanvangstijdstip en de duur van de winning;
- c. de wijze van winning alsmede de daarmee verband houdende activiteiten;
- d. de hoeveelheden jaarlijks te winnen delfstoffen;
- e. de kosten op jaarbasis van het winnen van de delfstoffen;
- f. de bodembeweging ten gevolge van de winning alsmede de daarmee verband houdende activiteiten en de maatregelen ter voorkoming van schade door bodembeweging, voor zover het winnen van delfstoffen niet geschiedt in het continentaal plat, tenzij Onze Minister anders heeft bepaald;
- g. de risico's voor omwonenden, gebouwen of infrastructurele werken of de functionaliteit daarvan met een risicobeoordeling, voor zover het winnen van delfstoffen niet geschiedt in het continentaal plat.”

Door het ministerie is een handleiding / format aangereikt voor het opstellen van het winningsplan document. Daarnaast heeft Staatstoezicht op de Mijnen in beginsel de Seismische Hazard en Risico Analyse methodiek van Q-Con en IF-Technology [7] als richtinggevende leidraad aangeraden voor het opstellen van de evaluatie “seismische dreiging”.

1.2 Normstelling vergunninghouder

Vooralsnog is er door de overheid voor aardwarmtewinning geen eenduidige norm gedefinieerd voor geaccepteerde seismiciteit of de mate van bodemtrilling aan het aardoppervlak. Het effect van seismiciteit op bodemtrillingen aan het aardoppervlak hangt af van de diepte waar de seismiciteit plaatsvindt en van de eigenschappen van de ondiepe ondergrond. Door het type ondergrond kunnen bodemtrillingen worden gedempt of juist worden versterkt.

De vergunninghouder heeft het effect van de ondiepe ondergrond voor het winningsplan niet meegenomen.

Vergunninghouder gaat er van uit geen voelbare en schadeveroorzakende seismiciteit te veroorzaken. Voelbare seismiciteit relateert vergunninghouder aan grondversnellingswaarden van groter dan 0,5 mm/s. Die grenswaarde wordt gecorreleerd met een aardbeving van M_L 1,4. Een schadeveroorzakende beving wordt gerelateerd aan een grondversnellingswaarde van groter dan 5 mm/s. Die grenswaarde wordt gecorreleerd met een aardbeving van M_L 2,4 [3].

2 Situatieschets

2.1 Beschrijving van vergunningen en plannen

CLG heeft op 15 maart 2010 de opsporingsvergunning Californië 2 verkregen. In 2015 is deze vergunning tezamen met opsporingsvergunning Californië I samengevoegd en vervolgens in drieën gesplitst. CLG is vergunninghouder van

Californië V geworden. Na het boren van de putten CAL-GT-04 en CAL-GT-05 in 2015 en 2016 is de winningsvergunning aangevraagd op 21 september 2016. Op 5 juli 2017 is de winningsvergunning verleend aan CLG. Het ingediende winningsplan dateert van 3 mei 2019 [8].

2.2 RNES en SDE aanvragen

CLG heeft in 2013 een aanvraag Garantiefonds ingediend (AARD03001). In 2013 is deze aanvraag toegekend. Na het boren en testen van het doublet heeft CLG een claim ingediend bij RVO omdat, naar mening van CLG, het vermogen van het gerealiseerde doublet lager was dan het “verzekerde” P90-vermogen. In december 2018 heeft TNO-AGE de resultaten van de technische evaluatie van de claim aan RVO gezonden. Hierna heeft RVO de claim gedeeltelijk gehonoreerd. Basis voor de formulering van het afrekeningscenario zijn putttestevaluaties uitgevoerd door vergunninghouder en TNO-AGE.

Voor dit doublet is in 2012 een SDE-subsidie aangevraagd (SDE1288429) en vervolgens een hernieuwde indiening in 2013 (SDE1337405). Op basis van de laatste aanvraag en beschikking krijgt dit doublet nu SDE-productiesubsidie.

2.3 Configuratie aardwarmtesysteem

Het aardwarmtesysteem Californië V bestaat uit productieput CAL-GT-04 en injectieput CAL-GT-05. Het CLG-doublet is in 2017 in productie gegaan en na optreden van seismiteit in 2018 is de productie noodgedwongen gestopt.

Aardwarmte wordt gewonnen op een diepte van 1200 tot 2400 m, voornamelijk uit de watervoerende intervallen in de Onder-Carboon Kalkstenen van de Zeeland Groep en Devoon zandstenen van de Bosscheveld Formatie. Door de lage matrixpermeabiliteit van deze gesteenten is het waarschijnlijk, ook ondersteund door de resultaten van de putttest [9], dat stroming voornamelijk plaats vindt via scheuren, breuken en/of zones gerelateerd aan karstificatie.

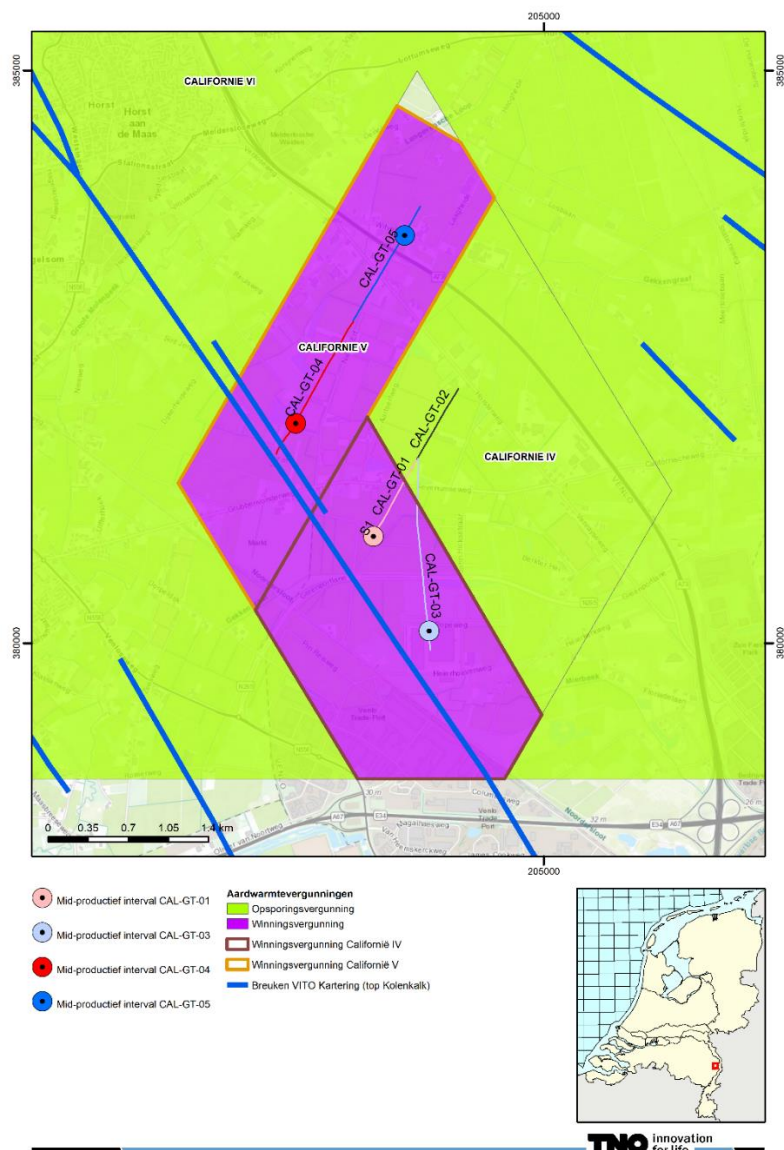
Het CLG-doublet heeft met een maximaal debiet van circa 230 m³/uur en een temperatuurval van maximaal 51°C geopereerd (bron: productiedata van aanvang winning op 2017-06-01 tot einde winning 2018-09-10 [5]). De temperatuur van het geproduceerde water is circa 87°C en de gewonnen warmte werd gebruikt door glastuinbouwbedrijven. Een schematisch overzicht van het systeem wordt gepresenteerd in Figuur 3 [1] en van de putten in Figuur 5 en 6 [1]. Tot aan het stopzetten van het systeem in september 2018 is ca. 0,26 PJ aan warmte-energie gewonnen.

Californië V grenst ten zuidoosten aan de winningsvergunning Californië IV (zie ook Figuur 1), met als vergunninghouder Californië Wijnen Grubbenvorst (CWG). Het CWG-doublet bestaat uit productieput CAL-GT-01 en injectieput CAL-GT-03. De aardwarmtewinning van het CWG-doublet ligt sinds mei 2018 stil.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
13/55



Figuur 1: Ligging gebied van de winningsvergunning Californië V (oranje omhullende) met de puttrajecten van het CLG-doublet. Voor de volledigheid is ook de winningsvergunning Californië IV (bruine omhullende) met bijbehorende puttrajecten van het CWG-doublet weergegeven. Dikke blauwe lijnen geven de door vergunninghouder gekarteerde breuken weer op de diepte van de top van de Dinant Kalkstenen.

3 Evaluatie put- en reservoirgegevens en ondergrondmodel

TNO-AGE heeft een evaluatie uitgevoerd van de in het winningsplan [1] beschreven put-, reservoir- en productiegegevens die als invoer dienen voor de reservoirmodellering. Indien tot andere inzichten is gekomen –eventueel ook op basis van gegevens aangeleverd in het kader van de mijnwet, het garantiefonds en SDE+– wordt dat in dit hoofdstuk beschreven.

3.1 Beschrijving geothermisch systeem

Het CLG geothermisch systeem bestaat uit de putten CAL-GT-04 en CAL-GT-05. De gegevens van het systeem zijn gecondenseerd gepresenteerd in Hoofdstuk 3 van [1]. Opgemerkt dient te worden dat in Tabel 1 [1] de coördinaten op TD anders zijn dan aangeleverd onder de mijnwettelijke aanlevering in de vorm van de deviatie survey alsook gepresenteerd op kaart in Figuur 9 [1]. Op basis van de gegevens in Tabel 1 [1] is de afstand tussen de putten op einddiepte ca. 2956 m en conform de deviatie survey is dit ca. 2490 m. Ook Figuur 10 [1] geeft 2499 m als afstand op diepte. TNO-AGE houdt vast aan de locatiegegevens conform de deviatie-survey aangeleverd onder de mijnwet.

Figuur 5 [1] geeft de putarchitectuur van de boring CAL-GT-04 weer. In het interval 2547 tot 2799 m “along hole” (AH) heeft de productieput CAL-GT-04 in een niet-gecementeerde 7”-liner, een vijftal perforatie-intervallen van circa 6 meter per interval. De geologische formaties achter de perforatie zijn: Zeeland Formatie (Dinant Kalkstenen) en Bosscheveld Formatie (Kalkstenen, Kleistenen en zandstenen). Volgens Figuur 5 [1] kruist de Tegelen breukzone de put CAL-GT-04 tussen dieptes 2746 en 2779 m (AH).

Figuur 6 [1] geeft de put-architectuur van de boring CAL-GT-05 weer. De injectieput CAL-GT-05 heeft een “open hole completion”. Dit betekent dat, vanaf basis 9 5/8” liner (1547 m AH) tot einddiepte (2433 m AH), de Zeeland en Bosscheveld Formaties openstaan voor stroming naar de put. Daarnaast is in CAL-GT-05 een “radial drilling” operatie uitgevoerd waarbij een twaalfstal “laterals” zijn geboord (Figuur 6 [1]). Vooralsnog lijkt het erop dat voornoemde operatie niet heeft geleid tot een verbetering van de injectiviteit.

3.2 Gelaagdheid van het reservoir / Reservoirstratigrafie

De putten CAL-GT-01, CAL-GT-03 en CAL-GT-04 zijn geboord in zuidwestelijke richting met de laaghelling mee. De aangetroffen dikte in de put is hierdoor niet gelijk aan de stratigrafische dikte. Er moet nog voor de helling van de laag (ca. 23° berekend van Figuur 11 [1]) worden gecompenseerd. Voor de putten CAL-GT-02 en CAL-GT-05 kan gesteld worden dat zij de formatie qua boorricting tegengesteld aanboren ten opzichte van de laaghelling. Figuur 14 uit [10] laat een lichte laaghelling zien ten opzichte van de boorricting in CAL-GT-05. De dikte aangetroffen in de put benadert de stratigrafische dikte.

Het CLG-doublet produceert heet water met de productieput CAL-GT-04 uit de Tegelen breukzone en injecteert het afgekoelde water met de injectieput CAL-GT-05 in noordoostelijke richting van de Tegelenbreuk af. Het warme productiewater komt naar verwachting primair uit de Tegelenbreuk. Volgens de vergunninghouder wordt het afgekoelde water van de breuk af geïnjecteerd, in onverbreukt (hypothetische breuk (p. 37 in [1])) mogelijk gekarstificeerd gesteente. De laagpakketten die doorboord zijn en in de beoogde productieve zone zitten, zijn de Onder-Carboon Kalkstenen van de Zeeland Groep (ook wel Dinant Carbonaten of Kolenkalk van Vroeg-Carboon ouderdom genoemd) en zandstenen en carbonaten van de Bosscheveld Formatie van Laat-Devoon ouderdom. In de documentatie [1] van de vergunninghouder wordt een meer gedetailleerde stratigrafische onderverdeling gebruikt. De Zeeland Formatie / Dinant Kalkstenen wordt

Datum

7 april 2020

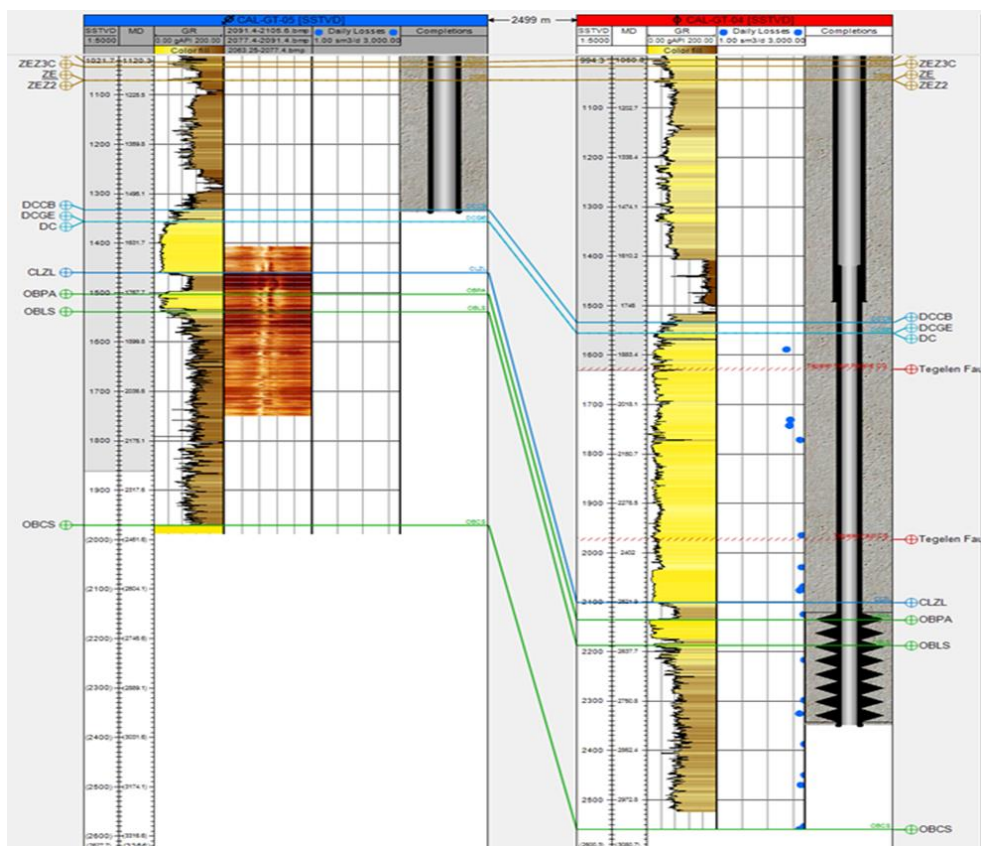
Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

15/55

onderverdeeld in vijf reservoirzones. De Bosscheveld Formatie wordt onderverdeeld in de pakketten: 1) Pont d'Arcole; 2) "Bosscheveld", en 3) Boven-Condroz, conform de Belgische stratigrafische indeling.

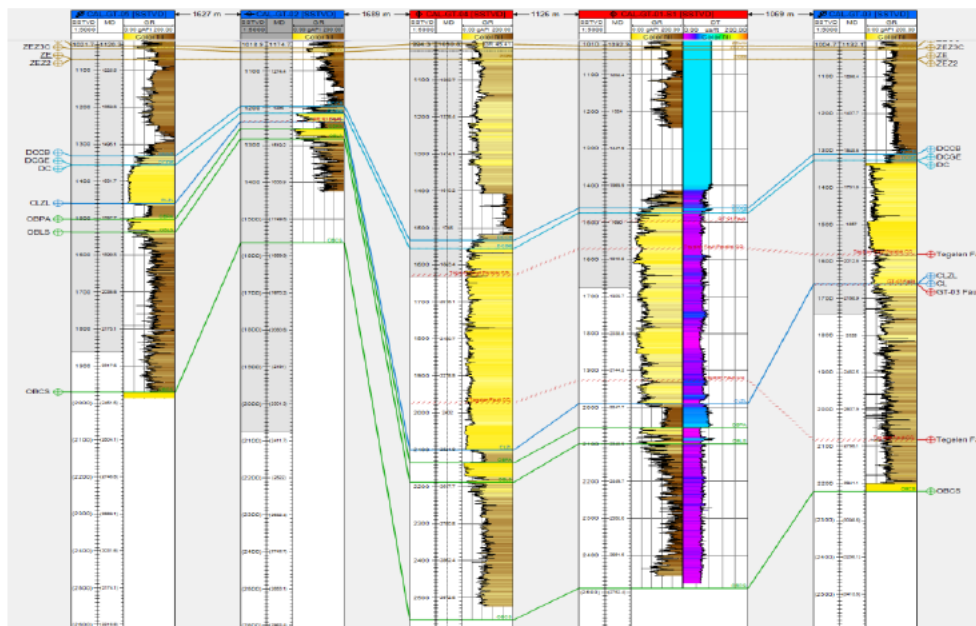


Figuur 2: Correlatiepanel CAL-GT-04 ↔ Cal-GT-05 met formaties en putafwerking. ZE3C = Zechstein 3 Carbonaat Laagpakket, ZE = Zechstein Groep, ZE2 = Zechstein 2 Formatie, DCCB = Baarlo Formatie (boven Carboon), DCGE = Epen Formatie (boven Carboon), CLZL = Zeeland Formatie (Onder Carboon), OBPA = Pont d'Arcole, OBLS = Bosscheveld Limestone en OBSC = Condroz Sandstone. De laatste drie zijn informele eenheden in de Banjaard Groep. De annotatie "Tegelen Fault" geeft locaties in de put weer waar er een breuk doorgang wordt geïnterpreteerd.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
16/55



Figuur 3 Correlatiepanel Dinant/Devoon reservoir met CAL-GT-05 ⇔ CAL-GT-02 ⇔ CAL-GT-04 ⇔ CAL-GT-01 ⇔ CAL-GT-03. CAL-GT-01, CAL-GT-03 en CAL-GT-04 zijn door de Tegelenbreuk geboord; CAL-GT-02 en CAL-GT-05 zijn van de Tegelenbreuk af geboord (bron TNO-AGE 2018).

De stratigrafische onderverdeling van vergunninghouder is gegeven in Tabel 2 [1]. Dit conformeert zich met de inzichten van TNO-AGE (Tabel 1).

Tabel 1: Overzicht van diepte van reservoirs, de Tegelenbreuk, perforatie en TD zoals gegeven door de TNO-AGE.

CAL-GT-04 (producer)	Diepte (m AH)		Diepte (m TVD)	
	Top	Basis	Top	Basis
Zeeland Formatie	1818	2522	1583	2131
Pont d'Arcole	2522	2563	2131	2163
Bosscheveld sb	2563	2695	2163	2282
Condroz sst	2695	TD	2282	TD
Top Tegelenbreuk	2755	-	2335	-
Perforatie	2547	2799	2152	2374
TD	-	3037	-	2592
CAL-GT-05* (injector)	Diepte (m AH)		Diepte (m TVD)	
	Top	Basis	Top	Basis
Zeeland Formatie	1470	1740	1378	1497
Pont d'Arcole	1740	1753	1497	1533
Bosscheveld sb	1753	1901	1533	1642
Condroz sst	1901	TD	1642	TD
Perforatie	1547	2433	1368	2011
TD	-	2433	-	2011

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
17/55

In de CAL-GT-boringen zijn breukdoorsnijdingen geïnterpreteerd door TNO-AGE. Argumenten voor identificatie van breukdoorsnijdingen zijn:

- grote dikteverschillen tussen naburige putten waarbij bepaalde intervallen wel eenzelfde log-signatuur hebben,
- spoelingsverliezen,
- vergrote boorgatdiameter t.o.v. boorkopdiameter,
- specifieke dipmeterlog-signatuur (FMI en acoustic image log (AIL)).

In onderstaande tabel worden de dieptelocaties (m AH) opgesomd.

Tabel 2: Locatie breukdoorsnijdingen in de CAL-GT putten.

Putnaam	Diepte breuk (mAH)	Referentie
CAL-GT-01 (producer CWG)	1685	Dipmeter log & Interne evaluatie & LITHOLOG en @ top losses zone
	2330	Begin losses zone Comp log
CAL-GT-02 (CWG)	1402-1411	Borehole breakout on caliper
CAL-GT-03 (injector CWG)	1925 of 1960	Correlatie gebaseerd (Interne evaluatie)
	2955 tot ca. 2965	Losses of 600 m ³ /d & off scale ROP op Litholog
CAL-GT-04 (producer CLG)	1935	Karst / losses zones on comp log
	2343	
	2416-2420	
	2432	
CAL-GT-05 (injector CLG)	2000	Injectieve/Productive zone in well test interpretation; PLT [4]
	1891-1895	Fractures on AIL [10] p. 21
	1954-1959	Fractures on AIL [10] p. 22

3.3 Resultaten putttestevaluatie

Uit de putttestresultaten kunnen twee essentiële parameters worden afgeleid: de permeabiliteitsdikte en de skin van een put. Deze putttestevaluatie-resultaten zijn essentieel voor de constructie en ook de beoordeling van een statisch ondergrondmodel. In het kader van de advisering Garantiefonds voor de RVO/EZK zijn de putttesten van CAL-GT-04 en CAL-GT-05 geëvalueerd. De putttestresultaten van de putten CAL-GT-01, CAL-GT-02 en CAL-GT-03 zijn door de betreffende vergunninghouder eerder aangeleverd in het kader van het RNES Garantiefonds.

CAL-GT-01

Het rapport van VITO aangeleverd in het kader van het Garantiefonds [11] geeft een permeabiliteitsdikte kH van 16 Dm. Recente herinterpretatie aangeleverd in het kader van een Garantiefonds aanvraag geeft een significant hogere kH waarde van 170 tot 180 Dm.

CAL-GT-02

Geen rapportage of TNO-AGE interpretatie bekend. Well ruwe datafiles van de injectietest. Recente herinterpretatie aangeleverd in het kader van een

Garantiefonds aanvraag geeft ook hogere kH waarde van 84 tot 140 Dm op basis van de drukvereffeningsperiode van de injectietest.

CAL-GT-03

Geen gegevens van een puttest bekend. Wel repetitieve PLT-metingen gerapporteerd in bijvoorbeeld [10].

CAL-GT-04

In het kader van de behandeling van de Garantiefondsclaim is de puttest van de put CAL-GT-04 door TNO-AGE geëvalueerd [4]. Op basis van de evaluatie is geconcludeerd:

..“Uit de aangeleverde puttestinformatie valt eenduidig de relevante reservoirkarakteristieken te bepalen. TNO-AGE bevestigt de zeer hoge permeabiliteitsdikte en permeabiliteit alsmede de interpretatie dat breuk permeabiliteit zeer waarschijnlijk is (resultaat TNO-AGE ... permeabiliteitsdikte: 93.7 Dm, permeabiliteit: 195 mD (bij netto dikte 480m), skin: -8).”..

CAL-GT-05

Volgens de vergunninghouder wordt het afgekoelde water van de breuk af geïnjecteerd, in niet-verbreukt mogelijk gekarstificeerd gesteente (hypothetische breuk (p. 37 in [1])).

In het kader van de behandeling van de Garantiefondsclaim is de puttest van de put CAL-GT-05 door TNO-AGE [4] geëvalueerd. Op basis van de evaluatie is geconcludeerd:

.. “Daarentegen geeft de verbeteroptie “hogere injectiedruk” wel significant resultaat. De verbeterde injectiviteit bij hogere injectiedruk wordt hoogst waarschijnlijk veroorzaakt door het onder druk openen van “natuurlijke fractures” in het gesteente.”..

en

.. “Op basis van de initiële productie- en injectietest en de opeenvolgende tweede serie injectie- en doublettesten op de put CAL-GT-05 kan geconcludeerd worden dat de permeabiliteitsdikte van het matrixgesteente in de nabije omgeving van de put CAL-GT-05 bijzonder laag is (± 4.5 Dm). In en rond put CAL-GT-04, de productieput, is de permeabiliteitsdikte aanzienlijk hoger, namelijk ± 94 Dm. Fractures in het reservoirgesteente, in de puttesten gekenmerkt door een negatieve skin, zorgen er echter voor dat, ondanks de lage permeabiliteitsdikte in put CAL-GT-05, de injectie van koud water toch redelijk goed gaat in deze put. Daarbij valt op dat naarmate de injectiedruk hoger wordt ook de injectiviteit verbetert doordat de fractures verder opengedrukt worden.”..

Daarnaast laat puttestinterpretatie van CAL-GT-05 door TNO-AGE zien dat op relatief korte afstand van deze put de permeabiliteitsdikte toeneemt. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat er een variabel permeabiliteitsveld is tussen de productie- en injectieput van ca. 210 tot 10 mD bij een reservoirdikte van 450 m.

Het feit dat de productietest nagenoeg niets opleverde en de injectietest een drukafhankelijk debiet heeft, doet vermoeden dat het een verbreukt reservoir

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
19/55

betreft hetgeen bevestigd wordt door de beelden van de acoustic image log in [10]. Hierbij zijn de fractures en/of diaklazen niet open zoals in de put CAL-GT-04 maar nagenoeg dicht. Indien er drukverlaging wordt opgelegd aan het reservoir bij de productieput zullen de fractures de neiging hebben dicht te gaan. Dit in tegenstelling tot de opgelegde drukverhoging bij de injectieput waar de fractures opengedrukt worden.

De grafiek met de verschillende PLT opnames Figuur 10 en 11 [10] laat zien dat het merendeel van het injectievolume (circa 70%) uit het interval tussen circa 1980 en 2200 m (AH) komt, gesteenten van de Condroz Groep veelal siliciklastische gesteenten die waarschijnlijk niet of nauwelijks karstverschijnselen zullen vertonen. Stroming vindt daarom voornamelijk plaats via fractures.

3.4 Samenvatting reservoir eigenschappen

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

Reservoir eigenschap	Vergunninghouder		TNO-AGE	
	CAL-GT-04	CAL-GT-05	CAL-GT-04*	CAL-GT-05*
Diepte top reservoir (mTVD)	1583	1378	1583	1378
Bruto dikte (m)	480	480	480/450	450
Netto dikte (m)	-	-	480/450	450
Netto-bruto (%)	-	-	100	100
Porositeit (%)	-	-	2-4	2-4
Permeabiliteit petrofysica (mD)	-	-	-	10
Transmissiviteit puttest (Dm)	-	-	93,7	1,6
Permeabiliteit puttest (mD)	175	-	195/208	3,6
Skin puttest (-)	-7	-	-8	Druk-afhankelijk
Temperatuur midreservoir	84	-	84	64
Reservoirdruk topreservoir	211	-	211,7	136,5

*Tabel 4 in [4]

3.5 Saliniteit formatiewater

Het blijkt dat het formatiewater in de putten CAL-GT-01 en CAL-GT-04, die door of in de nabijheid van de Tegelenbreuk zijn geboord, een saliniteit hebben in de orde van 74000 tot 95000 ppm.

CAL-GT-02 en CAL-GT-05, de twee putten die van de breuk af naar het noord-oosten en updip en richting de truncatielij van de Kolenkalk zijn geboord en waar het reservoir ondieper ligt, hebben een lagere saliniteit van 41000 tot 61000 ppm.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
20/55

Tabel 4: Overzicht van Total Dissolved Solids, gemiddelde dichtheid en NaCl eq. gegeven door vergunninghouder en zoals bepaald door TNO-AGE (@ 25°C en 1 bar).

Saliniteit	TNO-AGE					Vergunninghouder	
	CAL-GT-01	CAL-GT-02	CAL-GT-03	CAL-GT-04	CAL-GT-05	CAL-GT-04	CAL-GT-05
Gem. TDS (ppm)	74000	41000	47000	80000-95000	61000	95000	-
Gem. dichtheid (g/l)	1,054	-	-	1,059-1,072	1,041	1,054	-
NaCl equivalent (ppm)	73000	-	-	79000-93000	58000	-	-

3.6 Connectiviteit tussen de putten

In het CLG-douplet is een interferentietest tussen de putten CAL-GT-04 en CAL-GT-05 uitgevoerd. De interferentietest is door Kappa geïnterpreteerd en de resultaten wijzen op een goede drukcommunicatie tussen de twee putten [9].

Figuur 22 [2] geeft het druksignaal weer van de productiestop in douplet CLG weer in de CAL-GT-01 de productieput van het CWG-douplet. Onder meer volgt hieruit dat de productieputten CAL-GT-04 en CAL-GT-01 een drukverbinding hebben. Productiegegevens van het CLG-douplet maken het zeer waarschijnlijk dat er sprake is van drukcommunicatie tussen de CWG-putten CAL-GT-01 en CAL-GT-03.

3.7 Ondergrondmodel

Elementen die ondersteunend zijn voor het ondergrondmodel van CLG worden genoemd in de aanvraag. Het culmineert in een sterk vereenvoudigd ondergrondmodel zoals gepresenteerd in Figuur 26 [1] waarin zes breuken zijn gepresenteerd. Een lagenmodel wordt gepresenteerd in Figuur 19 [3] met bijbehorende reservoir eigenschappen, gegeven in Tabellen 3-5 [3]. In dit laatste model is er een reservoir zoning gegeven van: vijf reservoir zones in de Kolenkalk (L1 t/m L5), een in de Pont d'Arcole, een in de Bosscheveld en een in de Condroz. Het gebruikte simulatiemodel bevat in totaal acht reservoir zones, waarvan twee breuken: de Tegelen- en de Veldenbreuk, beide hellend naar het noordoosten (Figuren 16-18 [3]). De L1 reservoir zone in de Kolenkalk wordt door de zeer lage permeabiliteit niet meegenomen in het reservoir model. Voor de geomechanische modellering is het model uit [3] gebruikt.

3.7.1 Interpretatie seismische secties en structurele geologie van vergunninghouder

Vergunninghouder geeft een W-O seismische sectie (Figuur 12 [1]). Op de seismische sectie zijn een vijftal horizons en de Tegelenbreuk met een enkele afsplitsing geïnterpreteerd. Daarnaast is op deze seismische sectie schematisch de putconfiguratie afgebeeld. De productieput doorsnijdt de Tegelenbreuk en de injectieput penetreert een ondergrondse locatie van de Tegelenbreuk af (zie ook p. 35 in [1]). Figuur 11 [1] geeft de geologische dieptekaart van de top Kolenkalk gemaakt op basis van de geïnterpreteerde seismische secties. De meest noordoostelijke breuk uit Figuur 11 [1] is niet op de sectie van Figuur 12 [1]

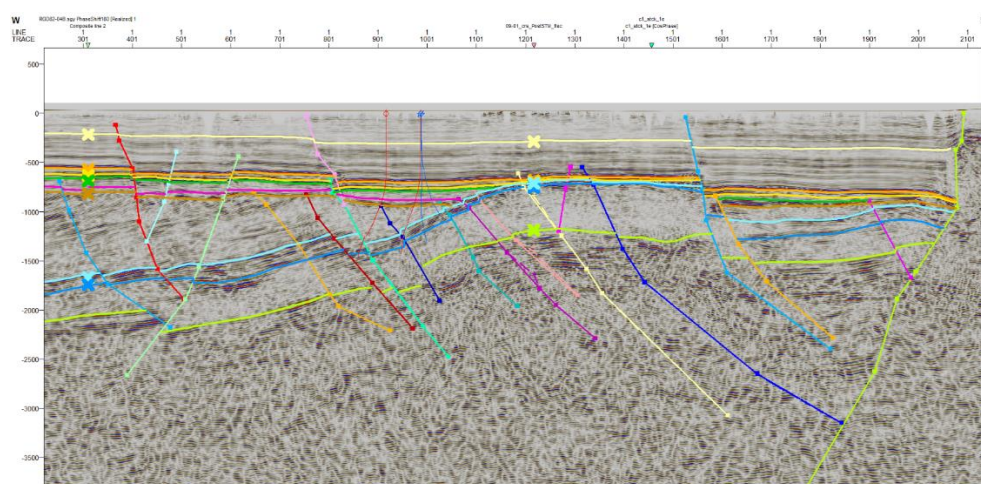
weergegeven. Opmerkelijk is dat dit figuur ook in de aanvraag Garantiefonds staat als Figuur 14 dd. maart 2013 [12], ruim voor het boren van de putten.

3.7.2 Bevindingen TNO-AGE statisch / structureel model diepe ondergrond en alternatieve scenario's

TNO-AGE stelt dat er veel meer detail in de interpretatie van de seismiek gebracht had kunnen worden, resulterend in een ander beeld van de ondergrond. Figuur 4 en Figuur 5 geven de door TNO-AGE in detail geïnterpreteerde E-W en NO-ZW lopende seismische lijnen. In tegenstelling tot Figuur 12 uit [1], wordt in het gebied van het CLG-doublet, inclusief de omgeving waar de put CAL-GT-05 op geprojecteerd kan worden, aanzienlijk meer breuken geïnterpreteerd. Ook in de rapportage uit de UDG-studie, Figuur 44 [13], valt af te leiden dat het gebied waar de injectieput CAL-GT-05 zich bevindt, door breuken wordt doorsneden.

Op basis van de breukarchitectuur op de seismische secties kunnen de door TNO-AGE geïnterpreteerde breuken tussen de secties worden verbonden. Aan de hand van de Tegelen- en Veldenbreuk volgt, zoals uit eerdere karteringen, dat de hoofdbreukrichting NW-ZO is.

Interpretatie van de FMI-log die in de put CAL-GT-01 is opgenomen, laat zien dat: 1) de geologische laagpakketten naar het zuidwesten hellen; en 2) er ter plaatse een breuk- en fracture-netwerk is met een WNW-OZO voorkeursrichting; en 3) er een kleine hoek lijkt te zijn tussen de algemene richting van de hoofdbreuken met de richting van de kleinere zijtakken.

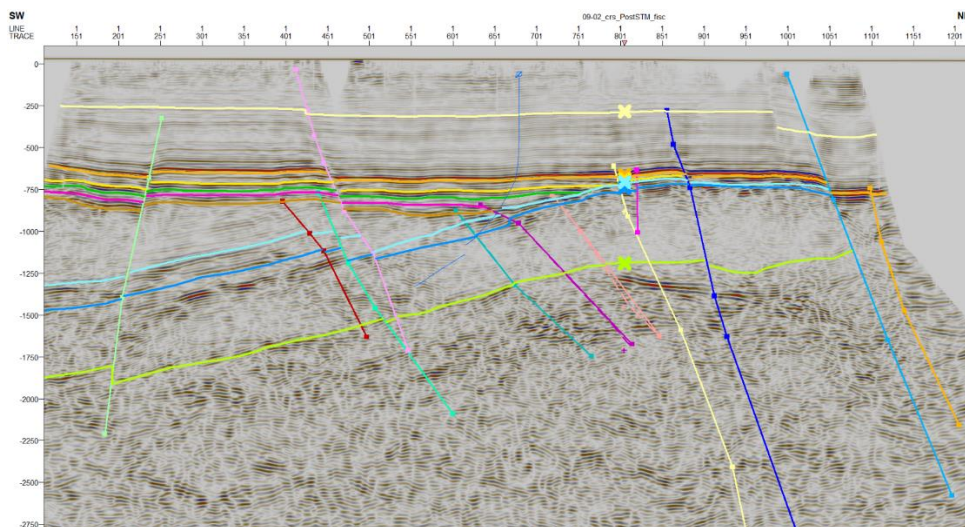


Figuur 4: Interpretatie van TNO-AGE van de oost-west seismische sectie nabij het CLG doublet (Figuur 12 uit [1] Voor locatie zie Figuur 11 uit [1]). Subverticale lijnen met vierkantjes zijn breuken. Geleurde subhorizontale tot scheve gekleurde lijnen zijn de scheidingsvlakken tussen belangrijke gesteenteformaties. Kleuren van breuken en laagvlakken bij deze figuur en Figuur 5 corresponderen als ze hetzelfde fenomeen betreffen. De putten CAL-GT-01, -02, -03 (in blauw) en -04 (in rood) zijn op deze sectie geprojecteerd.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
22/55



Figuur 5: De door TNO-AGE geïnterpreteerde noordoost-zuidwest seismische sectie nabij de CLG- en CWG-doubletten. De put CAL-GT-03 (in lichtblauw) is op deze seismische sectie geprojecteerd. (Voor locatie zie Figuur 11 uit [1]).

Projectie van de put CAL-GT-05 naar de seismische secties parallel aan de heersende breukstrekking van de Tegelenbreuk laat zien dat in de nabijheid van of zelfs in de put CAL-GT-05 minimaal één breuk aanwezig is. Put CAL-GT-05 heeft een sonic bore hole image log (AIL) op p. 21 in [10]. Er worden drie intervallen gepresenteerd en gecombineerd met de metingen van de PLT. Op een diepte tussen 1981 en 1985 m AH zijn drie kenmerkende lijnen te zien die correleren met een door de PLT gemeten zone van stroming en die daardoor als breuken geïnterpreteerd zouden kunnen worden. TNO-AGE heeft nog geen beschikking over de ruwe data van de AIL log en ook niet over een gedetailleerde structurele interpretatie, inclusief fracture- en breukoriëntatie.

Op basis van de seismiek en putinformatie kan gesteld worden dat het ondergrond model veel complexer is dan vergunninghouder presenteert in haar modellen. Met name het verschil in de breukdichtheid in het blok tussen de Tegelen- en Veldenbreuk is groot tussen de interpretaties van TNO-AGE en vergunninghouder.

De formulering “hypothetische breuk dicht bij de injector” op p. 37 in [1] en ook op p. 44 in [3] is niet plausibel. TNO-AGE is van mening dat er voldoende aanwijzingen zijn in zowel de seismiek als in de putgegevens dat de boring CAL-GT-05 in of nabij een breuk is geboord.

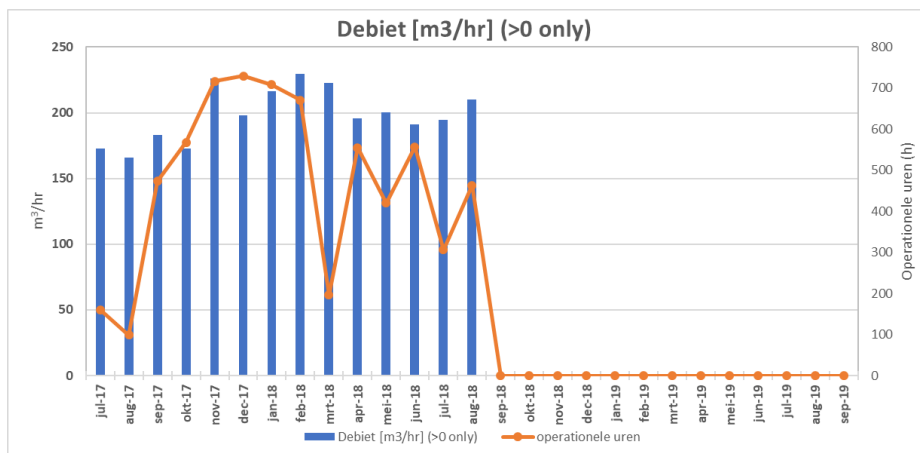
3.8 Productiegegevens en productieprognose CLG

Het CLG-doublet is in juli 2017 gestart met het winnen van aardwarmte. In augustus 2018 is de winning stopgezet vanwege seismiciteit nabij de injectieput CAL-GT-05. Onderstaande grafieken geven het maandelijkse debiet en de temperatuur- en drukgetallen zoals aangeleverd door vergunninghouder en afgeleid van die gegevens. Er is inmiddels circa 1,34 miljoen m³ koud water geïnjecteerd.

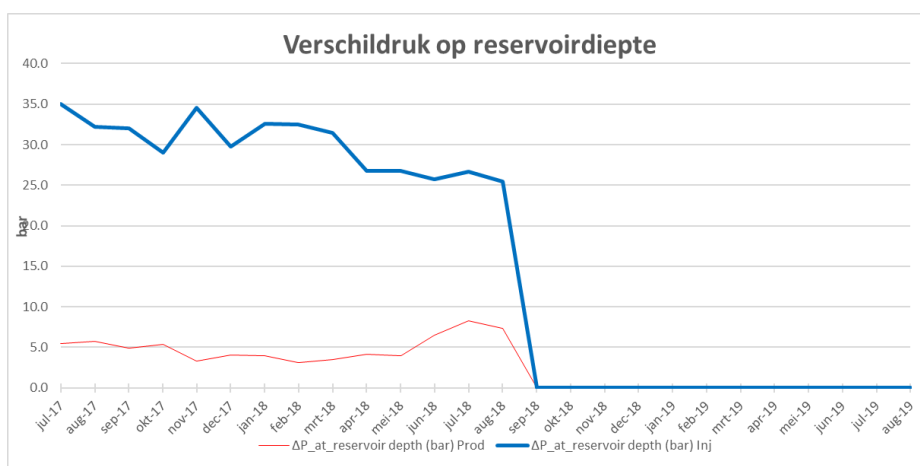
Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

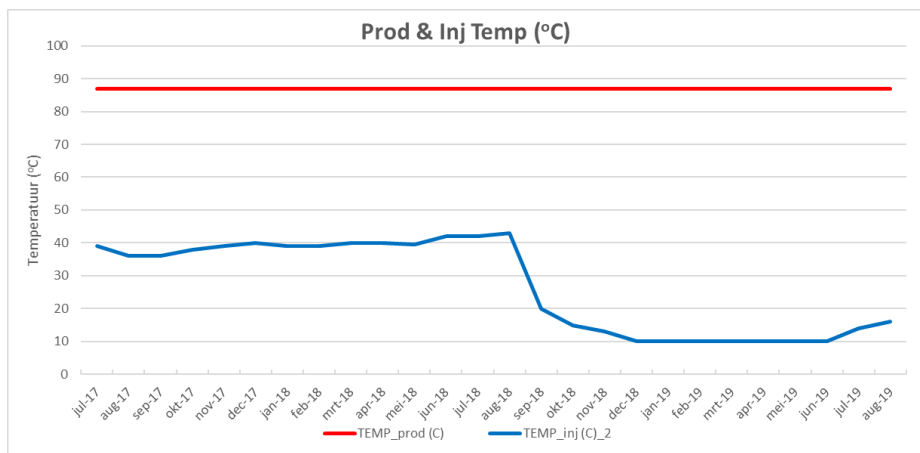
Blad
23/55



Figuur 6: Gemiddelde maanddebiet en aantal operationele uren van het CLG geothermisch systeem. Berekend door de hoeveelheid geproduceerd water te delen door het aantal operationele uren.



Figuur 7: Drukverschil op reservoirniveau bij de injectie- (blauwe lijn) en productieput (rode lijn) van het CLG-doublet.



Figuur 8: Gemiddelde volume gewogen temperatuur van het productie- en injectiewater van het CLG-doublet

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
24/55

Zoals het aantal operationele uren per maand in Figuur 6 al aangeeft, heeft het systeem met meer variatie in debiet, temperatuur en druk geopereerd dan weergegeven in de maandgemiddelden in Figuur 7 en Figuur 8. Rapportage op uur- of dagbasis geeft een ander beeld. Dagelijkse variatie in debiet van het CLG-doublet is inzichtelijk gemaakt in Figuren 14 en 15 uit [3] en 16 en 17 uit [2]. Deze gegevens zijn gebruikt om de productie en de variatie daarin te correleren aan het optreden van seismiteit.

4 Seismische Hazard en Risico Analyse (SHRA)

Het uitgangspunt voor deze analyse is de tijdelijke leidraad zoals opgesteld door Q-con en IF-Technology [7] en de door DAGO gepubliceerde toevoeging hierop [14]. Door de waargenomen seismiteit op de projectlocatie van CLG is de vergunninghouder verplicht om direct over te gaan op een level-2 locatiespecifieke seismische hazardanalyse (SHA), met aandacht voor de punten genoemd op p. 43 in [7]. Hierdoor is een quickscan seismische hazard- en risicoanalyse (SHRA) niet langer noodzakelijk. Voor de volledigheid doorloopt TNO-AGE de gehele procedure, inclusief de beslisboom en SHRA quickscananalyse voor CLG.

4.1 Eerste drie vragen beslisboom

De antwoorden van TNO-AGE op de eerste drie vragen van de beslisboom in de SHRA methodiek van Q-con en IF [7] worden gegeven in Tabel 5, alsmede een korte argumentatie.

Tabel 5: Antwoord eerste drie vragen van beslisboom Q-con en IF SHRA methodiek [7].

Eerste drie vragen beslisboom	Antwoord TNO-AGE	Argumentatie en opmerkingen TNO-AGE
Is de afstand van het project tot een majeure breukzone <100 m of is het stromingsconcept gebaseerd op productie uit bestaande breuken?	Ja	Play type is "faulted, fractured, karstified carbonate and sandstone" en richt zich op secundaire permeabiliteit verkregen door karst en/of verbreukte kalksteen nabij breukzones. Figuur 11 toont de afstand tussen projectlocatie en gekarteerde breuken.
Ligt het project in de tektonisch actieve Roerdalslenk?	Ja	Projectlocatie ligt in zone C volgens [15], zie Figuur 9.
Wordt het project beïnvloed door het Groningen gasveld?	nee	Project ligt meer dan 100 km verwijderd van Groningen gasveld.

Op basis van bovenstaande bevindingen komt TNO-AGE tot **tweemaal ja** en **eenmaal nee**.

Ten gevolge van het positieve antwoord op de eerste twee vragen wordt het project direct ingedeeld in het level-2 niveau hetgeen betekent dat er een locatiespecifieke seismische hazardanalyse (SHA) uitgevoerd moet worden, inclusief een evaluatie van mitigerende maatregelen waaronder een stoplichtsysteem. De resultaten van deze evaluatie dienen in een risicomatrix te worden gepresenteerd. De lijst met punten die minimaal geadresseerd moeten worden staan op p. 43 in [7]. Op p. 55 t/m 57 in [7] staat als voorbeeld de casus

Datum

7 april 2020

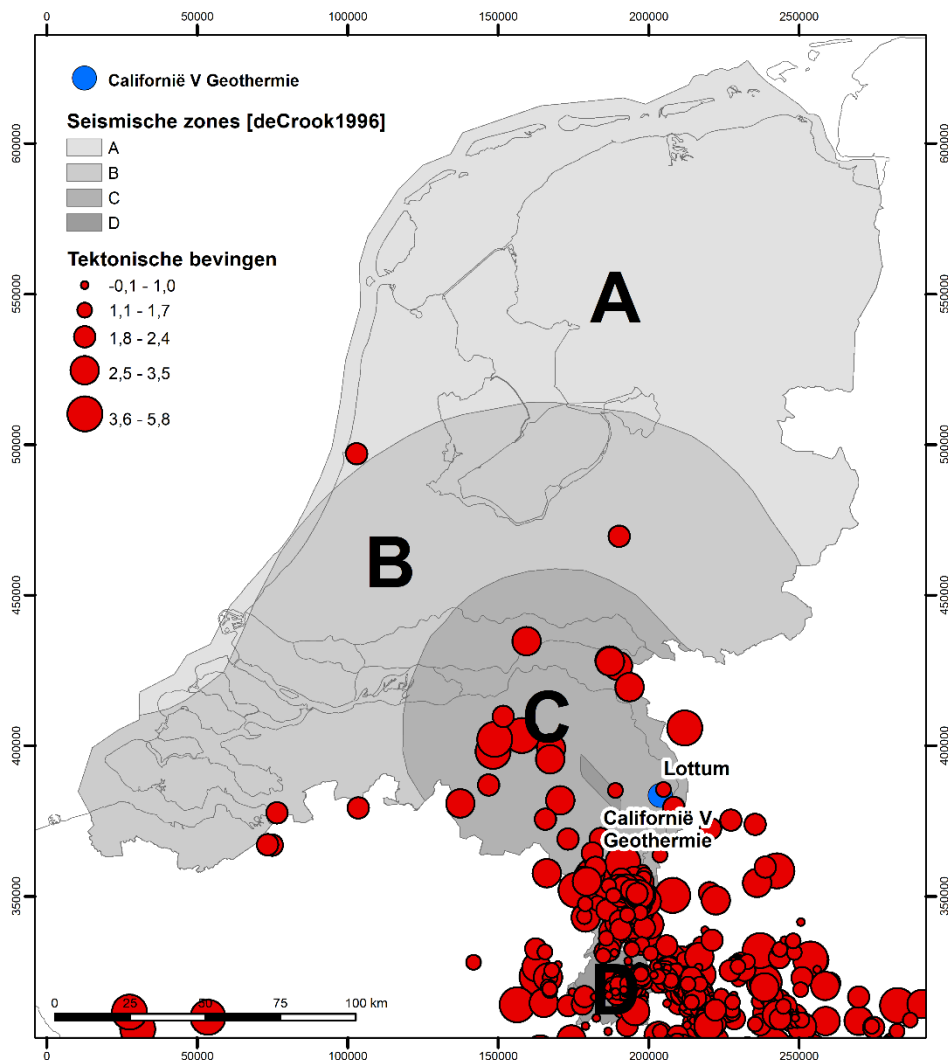
Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

25/55

CWG. Hier wordt ook de level-1 quickscantabel ingevuld als onderdeel voor de level-2 SHA. In onderstaande paragrafen wordt voor de volledigheid het quickscantabel voor het CLG-doublet ingevuld.



Figuur 9: De locatie van de winningsvergunning Californië V ligt in seismische zone C van De Crook (1996) [15]). De natuurlijke Lottum beving in 2007 [16] met een magnitude van 1,1 op de schaal van Richter ligt op 2 km afstand (onzekerheid plaatsbepaling onbekend) van de injector CAL-GT-05.

4.2 Quickscantabel

De score voor de 9 categorieën in de quickscantabel van de SHRA methodiek van Q-con en IF-Technology [7], door TNO-AGE, wordt gegeven in Tabel 7. De bepaling van de score per categorie volgt hieronder.

4.2.1 Hydraulische connectie met het kristallijn basement

De diepte van het kristallijne basement is onbekend. De seismiek laat geen duidelijke reflectoren zien die eenduidig wijzen op een reflector van de top van het kristallijne basement. Analyses op basis van datasets van gravimetrische en

magnetische anomalieën uitgevoerd in het kader van SCAN-UDG [17], geven vooralsnog geen eenduidig beeld. Een plausibele interpretatie van de O-W seismische sectie nabij het CWG-doublet geeft wel aan dat de ZW hellende Viersenbreuk zeer diep doorloopt en mogelijkwerwijs één van de breuken is die op grote diepte aansluiting vindt bij een diepe basementbreuk. De Tegelenbreuk lijkt op deze interpretatie een gerelateerde (antithetische) breuk, aangesloten op de Viersenbreuk (zie ook [13]).

De seismische interpretatie geeft aan dat onder de injectielocatie in de put CAL-GT-05 nog een dik seismisch transparant pakket voorkomt, vermoedelijk de klastische sedimentpakketten van het Devoon. Daaronder is een sterk reflectief pakket te zien dat mogelijkwerwijs de Devoonkalksequentie is. De totale seismische dikte is 1000 ms, hetgeen een dikte in de orde van 2000 tot 4000 m kan zijn. Wat er precies onder het Devoon aanwezig is, blijft onduidelijk. Mogelijk zijn het Siluur kleistenen zoals in de put O18-01.

Een hydraulische connectie met kristallijn basement valt niet uit te sluiten. De afstand tot top kristallijn basement is onbekend (p. 62 in [7]) en dus ook of de verticale afstand meer of minder is dan 1,5 of 3 km.

De score is derhalve niet eenduidig te bepalen. Conform de casus in [7] wordt uitgegaan is een score 7 mogelijk opportuun.

4.2.2 Drukcommunicatie tussen de putten

De horizontale afstand tussen de injectie- en productielocatie is circa 2,4 km (Figuur 10 [1]) en de verticale afstand in de orde van 600 m. Sensu stricto levert de interpretatie van deze scoringsklasse een score van 7 op.

Figuur 2 laat zien dat het injectie- en productie-interval niet noodzakelijkerwijs in hetzelfde laagpakket zijn gesitueerd.

Op de seismische sectie is te zien dat de laagpakketten van het doelreservoir circa 20 graden hellen naar het zuidwesten en op sommige plekken zijn verzet door breuken. De laagpakketten hebben een zeer lage matrixpermeabiliteit. Stroming van water vanuit de injectielocatie (open hole vanaf top Kolenkalk), in met name de verbreukte Condroz Zandsteenlaag naar de productielocatie (perforatie vanaf Pont d'Arcole Laagpakket) in de verbreukte Condroz zandsteen, vindt plaats via fractures, breuken en eventueel karstfenomenen.

De interpretatie van de injectietest door Kappa geeft aan dat er goede drukcommunicatie is tussen de injectie- en productielocatie [9]. Op basis van de korte vertragingstijd tussen opgelegde drukverandering in de ene put en de drukrespons in de andere put, concludeert Kappa dat er uitstekende communicatie is tussen de twee putten via het fracture-systeem. De vorm en richting van de stromings- en drukcommunicatiepaden tussen de twee putten is echter niet eenduidig vast te stellen. Op basis van deze locatiespecifieke informatie kan de score naar 3 teruggebracht worden.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
27/55

Tabel 6: Overzicht van de uitkomst per toetsingselement, voor de evaluatie van de drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput.

Toetsingselement	Californië V
Afstand lateraal [m]	1900
Afstand verticaal [m]	200-650
Injectie/productie zelfde laagpakket?	Gedeeltelijk

Geothermal system designed to have no pressure communication	10
Geothermal system targeting the different geological formations	7
Geothermal system designed to have pressure communication and targeting the same geological formation	

	Lateral separation		
Vertical separation	< 1000 m	1000 – 2000 m	> 2000 m
>500 m	7	7	7
100 – 500 m	3	3	7
< 100	0	3	7

Figuur 10: Score-indeling voor de categorie “drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput” volgens de SRA methodiek van Q-con en IF-Technology [7], omgezet in een tabel. De geel gemarkeerde cellen geven situaties die niet worden beschreven in de methodiek van Q-con en IF-Technology [7].

4.2.3 Injectiedruk

De hydrostatische druk van het reservoir bij de injectielocatie is circa 140 bar (Figuur 10 [4]). De opgegeven maximale injectiedruk aan de putmond (maaiveld) is 43 bar. Hoe dit zich vertaalt naar een druk op reservoirniveau wordt niet gegeven in [1]. De verschildruk op reservoirniveau kan lager uitvallen vanwege drukverlies door stromingswrijving, maar kan ook hoger liggen vanwege de door afkoeling en hogere gemiddelde saliniteit zwaarder water in de put. Met de aanname dat de door vergunninghouder opgegeven injectiedruk ook op reservoir niveau geldt is de injectiedruk score 7.

4.2.4 Debiet

In het winningsplan wordt een maximum operationeel debiet genoemd van 320 m³/uur (Tabel 6, p. 21 in [1]). De score is derhalve 7.

4.2.5 Afstand tot natuurlijke breuken

Op basis van de breukinterpretatie van de vergunninghouder is de afstand tussen de injectieput CAL-GT-05 en gekarteerde breuk meer dan 500 meter (Figuur 11). Gegeven de seismische interpretatie van TNO-AGE (Figuur 4) is het echter aannemelijk dat de breuken 6 en 7 in Figuur 11 doorlopen, parallel aan de richting van de Veldenbreuk.

Datum

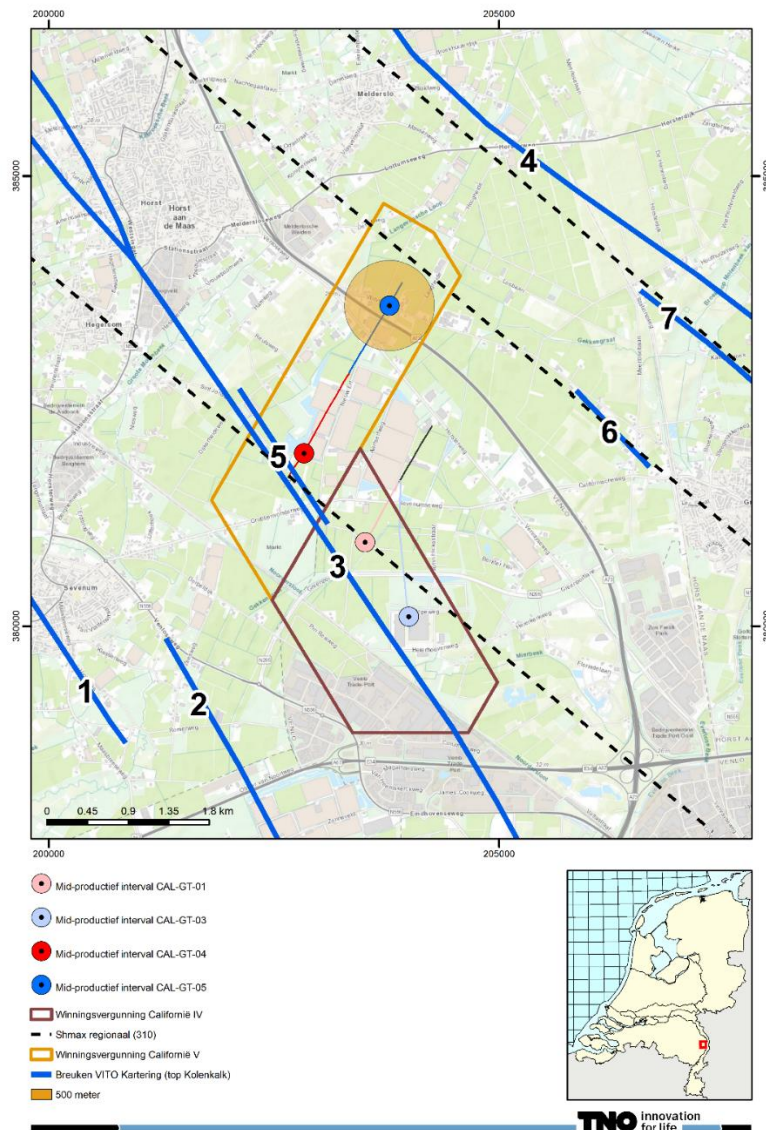
7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

28/55



Figuur 11: Kaart met daarin de breukinterpretatie van de vergunninghouder, een bufferzone van 500m om de injectieput en de oriëntatie van de dichtstbijzijnde breuken i.r.t. de maximale spanningsrichting van 310° (Sh_{max}). Te zien is dat de Tegelenbreuk (3) en parasitaire breuk (5) een hoek van $\sim 20^\circ$ hebben t.o.v. de Sh_{max} , terwijl de Veldenbreuk (4) en nabije breuken (6,7) ongeveer parallel lopen aan de Sh_{max} .

Samen met de interpretatie van de puttest die een fracture dominated reservoir suggereert waarschijnlijk gerelateerd aan een breuk, is de afstand tot een breuk waarschijnlijk minder dan 100 meter. Daarnaast moet bij deze categorie ook rekening gehouden worden met de kwaliteit en dekking van de seismiek. De kwaliteit van de twee seismische lijnen is redelijk tot goed. Echter, de seismische bedekkingsgraad is laag: De project- en injectielocatie ligt op ca. 1,5 km van de dichtstbijzijnde seismische lijn; als die geprojecteerd wordt op die seismische lijn parallel aan de breukrichting ca. 2 km.

Indien wordt aangenomen dat er breuken nabij injector CAL-GT-05 zijn gelegen met een vergelijkbare strekking als breuk 6 in Figuur 11, wat wordt ondersteund door de haardlocatie van beving 8 (Figuur 16), dan zou deze breuk op ca. 500 m afstand kunnen liggen.

Gegeven de mogelijk ongekarteerde breuken, is de score voor deze categorie minimaal 7, maar gezien het feit dat er veel indicaties zijn dat er een breuk in of zeer nabij de put zit, is een score van 10 mogelijk.

4.2.6 Breukoriëntatie in het natuurlijk spanningsveld

De oriëntatie van de strekking van de breuk nabij de CAL-GT-05 put is naar verwachting parallel aan de Veldenbreuk dus circa 310° (Figuur 11), nagenoeg gelijk aan de richting van de maximale horizontale spanning (Sh_{max}): van 301° tot $310^\circ \pm 3^\circ$. Dit resulteert in de hoogste score van 10.

4.2.7 Afstand tot natuurlijke aardbevingen

De meest nabije (ca. 2 km afstand) natuurlijke aardbeving in de catalogus van KNMI is de Lottum beving in 2007 met een magnitude van 1,1 op de schaal van Richter. Dit resulteert in een score 7.

4.2.8 Afstand tot geïnduceerde aardbevingen

De meest nabije geïnduceerde aardbeving is beving nummer 8 [2, 1, 3], qua xy-locatie zeer nabij de injectielocatie, gepresenteerd in [1] en Figuur 16. Dit resulteert in een score 10 (zie ook sectie 5.2.1.2 Seismiciteit bij Californië tussen 2014 en heden).

4.2.9 Netto geïnjecteerd volume

Het doublet beoogd een gesloten zoutwatercirculatiesysteem te zijn. Extractie of toevoeging van volumes water of andere vloeistof (wellicht op kleine hoeveelheden inhibitor na) wordt niet voorzien. Derhalve is voor dit scoringselement de score 0.

4.3 Resultaat Quickscan scoretabel voor CLG.

In onderstaande tabel zijn de bovengenoemde scores ingevuld. Er dient wel gezegd te worden dat er enige onzekerheid in de scores zit en dat dat zijn weerslag heeft op de uiteindelijke genormaliseerde score. In alle gevallen valt de genormaliseerde score onder of rond de grens tussen gemiddeld en hoog seismisch potentieel en dient er een locatiespecifieke seismische hazardanalyse (SHA) uitgevoerd worden.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
30/55

Tabel 7: SHA-scoringstabel voor het CLG-doublet.

Score	Connectie met basement	Drukcommunicatie tussen productie- en injectieput	Injectiedruk	Debiet	Afstand tot natuurlijke aardbevingen	Afstand tot geïnduceerde aardbevingen	Afstand tot breuken	Breukoriëntatie in huidig spanningsveld	Netto geïnjecteerd volume		
10	Yes	No	>7	>360	<1	<1	<0,1	Favourabl	>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
Operator	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,00
TNO-AGE	7	3	7	7	7	10	7	10	0	58	0,64

5 Level-2 locatie specifieke seismische hazardanalyse (SHA)

Op basis van twee positieve antwoorden op de eerste drie vragen van de beslisboom in de SHRA methodiek van Q-con en IF [7] en uitkomst van de quickscores, moet voor het CLG-doublet conform de handleiding een level-2 locatiespecifieke SHA-analyse worden uitgevoerd, hetgeen vergunninghouder heeft gedaan in [1] met bijlages [2] en [3] en daarin gerefereerde rapportages.

Op de projectlocatie en in de ruime omgeving vinden van nature aardbevingen plaats zoals opgetekend in Figuur 9 en in sectie 4.2.7 Afstand tot natuurlijke aardbevingen. De progressief opgebouwde natuurlijke spanningstoestand in de aardkorst van dit deel van Nederland overschrijdt periodiek de drempelwaarde van de breukstabiliteit. Voor deze SHA-analyse is het van belang om inzicht te krijgen in ten eerste de aard of oorzaak van de bevingen, natuurlijk dan wel geïnduceerd/getriggered, en ten tweede het daaraan gerelateerde haardmechanisme.

5.1 Belangrijkste mechanismes voor geïnduceerde/getriggerde seismiciteit.

Er kunnen één of meerdere mechanismes ten grondslag liggen aan het optreden van een aardbeving. Een aardbeving treedt op als de stabiliteit van een breukvlak (ratio tussen schuif- en effectieve normaalspanning) een kritische drempelwaarde (frictiecoëfficiënt) overschrijdt, waardoor op een specifieke locatie kortstondig de gesteenten aan weerszijde van de breuk langs elkaar schuiven. De hoogte van deze kritieke drempelwaarde is in de eerste plaats afhankelijk van de natuurlijke spanningstoestand in de ondergrond en gesteente-eigenschappen rondom de breuk. De drempelwaarde kan door de tijd heen veranderen door zowel natuurlijke processen (tektoniek, klimaat, geohydrologische en geochemische processen) als door menselijk ingrijpen in de ondergrond en bovengrond (o.a. waterwinning en injectie, energiewinning en opslag, grondverzet).

De geomechanische effecten van natuurlijke en antropogene processen die tot een overschrijding van deze kritische drempelwaarde kunnen leiden, zijn onder te verdelen in drie categorieën (zie ook Buize et al., 2019 [18]):

5.1.1 Directe drukverandering (drukdiffusie)

Dit zijn opgelegde drukveranderingen die vrijwel direct tot een spanningsverandering op het breukvlak leiden. De mate van spanningsverandering is afhankelijk van de afstand tussen de locatie van de opgelegde drukverandering en het breukvlak. Bij aardwarmtesystemen worden drukveranderingen opgelegd bij injectie -en productieputten. Als deze putten nabij of in breuken zijn geboord, kunnen deze drukveranderingen zorgen voor een overschrijding van kritische drempelwaarden van (nabijgelegen) breuken.

5.1.2 Poro-elastische effecten

Dit zijn effecten waarbij veranderingen van de vloeistofdruk in de matrix van het reservoirgesteente kunnen leiden tot volume- en spanningsverandering. Lokaal is bij aardwarmteinjectieputten sprake van vloeistofdrukverhoging in de poriën, waarbij het gesteente mogelijk (omhoog) uitzet door een afgenomen effectieve verticale spanning. Bij aardwarmteproductieputten is tijdens productie juist sprake van lokale drukverlaging die leidt tot een toename van de effectieve verticale spanning waardoor het gesteente (omlaag) krimpt. Afhankelijk van de situatie en gesteente-eigenschappen, wordt een deel van deze spanningsverandering omgezet in een verticale volumeverandering: bodemstijging bij injectie (uitzetting) of bodemdaling bij productie (krimp). Het naastliggende gesteente biedt weerstand tegen horizontale volumeveranderingen, wat zich vertaalt in een horizontale spanningsverandering. Bij productie neemt de horizontale spanning daarom af, terwijl deze bij injectie juist toeneemt. Deze verandering van de spanningstoestand kan mogelijk leiden tot een overschrijding van de kritische drempelwaarden van breuken in het reservoir of nabij het reservoir.

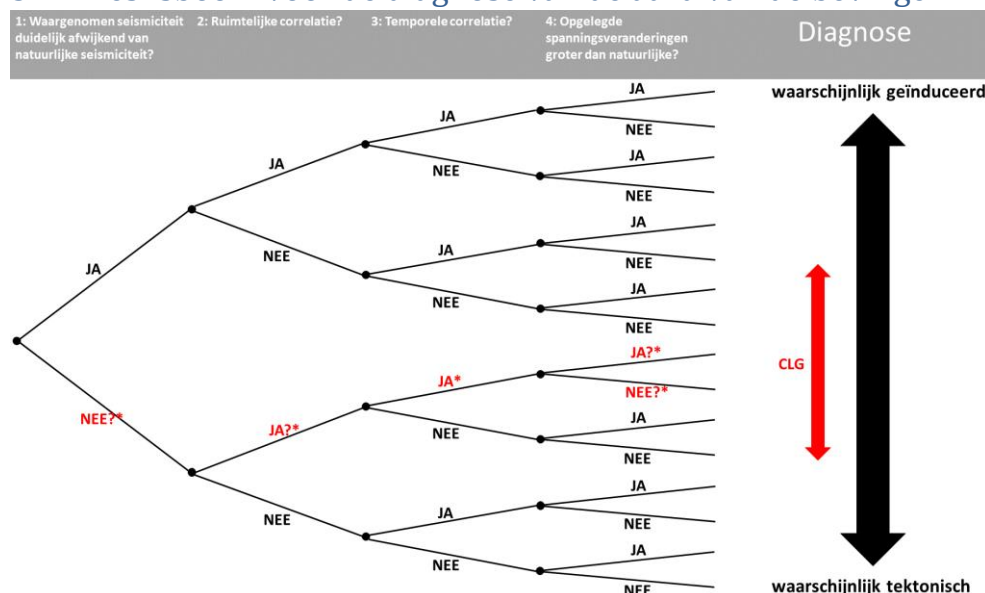
5.1.3 Thermo-elastische effecten

Dit zijn effecten waarbij veranderingen van de temperatuur in de ondergrond kunnen leiden tot volumeveranderingen van het reservoir en aanliggende gesteenten. Bij de meeste aardwarmtesystemen wordt afgekoeld water met injectieputten teruggevoerd in het reservoir waardoor een koudwaterbel ontstaat in het reservoirgesteente die zich verspreid rondom de injectieput. Het temperatuurverschil tussen het teruggevoerde water en het reservoirgesteente zorgt voor krimp van het reservoirgesteente wat tot spanningsveranderingen kan leiden bij breuken. De mate van krimp en resulterende spanningsveranderingen is o.a. afhankelijk van de het volume van het koudwaterbel, de temperatuursverandering en de gesteente-eigenschappen van het reservoir en omliggende aardlagen.

5.1.4 Effect-combinaties

Bij aardbevingen tijdens aardwarmtewinning (of andere ondergrondse handelingen) kunnen al deze effecten gelijktijdig een rol spelen, waardoor het precieze haardmechanisme niet altijd eenduidig is vast te stellen. Ook zijn in gebieden met weinig data, kritieke drempelwaarden van breukstabiliteit moeilijk in te schatten. Bij een zeer kritisch gespannen breuk zijn de spanningsveranderingen die de kritieke drempelwaarde kunnen overschrijden zo gering, dat zelfs getijdenwisseling of andere natuurlijke processen een beving zouden kunnen veroorzaken. Men spreekt dan van een getriggerde beving. Bij geïnduceerde bevingen zijn opgelegde spanningsveranderingen die de kritieke drempelwaarden overschrijden groot genoeg om deze van natuurlijke processen te onderscheiden.

5.2 Beslisboom voor de diagnose van de aard van de bevingen.



Figuur 12: Beslisboom van de diagnose van de aard van de bevingen bij Californië. Antwoorden worden in de onderstaande secties besproken. Met sterren wordt aangegeven dat het antwoord afhangt van de diepte van de haardlocaties van de bevingen.

Om de inschatting van het seismische dreigingspotentieel van de vergunninghouder te evalueren, is het van belang om de waargenomen bevingen tijdens de aardwarmtewinning bij Californië te duiden. Daarbij gaat het met name om het onderscheid tussen door aardwarmtewinning veroorzaakte bevingen en natuurlijke tektonische bevingen. Dat is in veel gevallen niet eenduidig vast te stellen. TNO-AGE heeft op basis van de vragenlijst van [19] een beslisboom opgesteld om inzicht te geven in de diagnosemethode. Deze beslisboom bestaat uit vier vragen waarbij de uitkomst bepaalt of de beving(en) waarschijnlijk tektonisch of waarschijnlijk geïnduceerd zijn.

Als eerste wordt de waargenomen seismiciteit vergeleken met (eventueel bekende) historische bevingen op basis van frequentie van voorkomen, diepte van de bevingshaarden en de verdeling tussen lichte en zware bevingen (Gutenberg-Richterverdeling). Vervolgens wordt vastgesteld of er sprake is van zowel een

ruimtelijke als temporele correlatie tussen de bevingen en aardwarmtewinning. Als laatste worden de opgelegde spanningsveranderingen door aardwarmtewinning vergeleken met natuurlijke spanningsveranderingen die bevingen zouden kunnen veroorzaken.

Bevingen worden geclassificeerd als 'waarschijnlijk geïnduceerd' als de waargenomen bevingen duidelijk afwijken van natuurlijke bevingen, er een duidelijke correlatie bestaat tussen de bevingen en aardwarmtewinning in ruimte en tijd, en de opgelegde spanningsveranderingen significant hoger zijn dan de natuurlijke. In het tegenovergestelde geval worden bevingen geclassificeerd als 'waarschijnlijk tektonisch'. Tussen deze twee uitersten zit een overgangsgebied waarin de bevingen niet eenduidig te classificeren zijn.

In de volgende secties worden de bevingen van Californië geclassificeerd volgens diagnoseschema.

5.2.1 Vraag 1 van seismiciteits-beslisboom: Waargenomen seismiciteit

5.2.1.1 *Natuurlijke seismiciteit in de regio rondom Californië.*

De vergunninghouder geeft geen analyse van de natuurlijke seismiciteit. Enkel op p. 44 in [3] neemt vergunninghouder een b-waarde van 1 aan voor de Gutenberg-Richterstatistiek, waaruit afgeleid kan worden dat de projectlocatie zich in een seismisch actief gebied bevindt.

In een technisch rapport van het IMAGE project [20] wordt een overzicht gegeven van de natuurlijke en geïnduceerde seismiciteit op basis van de KNMI-aardbevingscatalogus van 1-1-1980 tot 30-6-2015 in een straal van 70 km rond het dorp Meijel. Meijel ligt op ongeveer 15 km van de locatie van het CLG-doublet. De b-waarde voor deze regio die in dit rapport wordt gegeven is 1. Gezien de korte afstand tussen Meijel en CLG, zou deze natuurlijke seismiciteit ook representatief kunnen zijn voor het gebied rond CLG.

Onderstaande figuren zijn vergelijkbare met die uit het IMAGE-rapport maar zijn door TNO-AGE geactualiseerd voor de projectlocatie.

Het aantal bevingen uit de KNMI-catalogus die in de nabijheid van de Californië V zijn geregistreerd zijn te zien in Figuur 13. De concentratie van aardbevingen in het bestudeerde gebied ligt ten zuiden van de projectlocatie en lijkt gerelateerd aan de Peelrandbreuk.

Datum

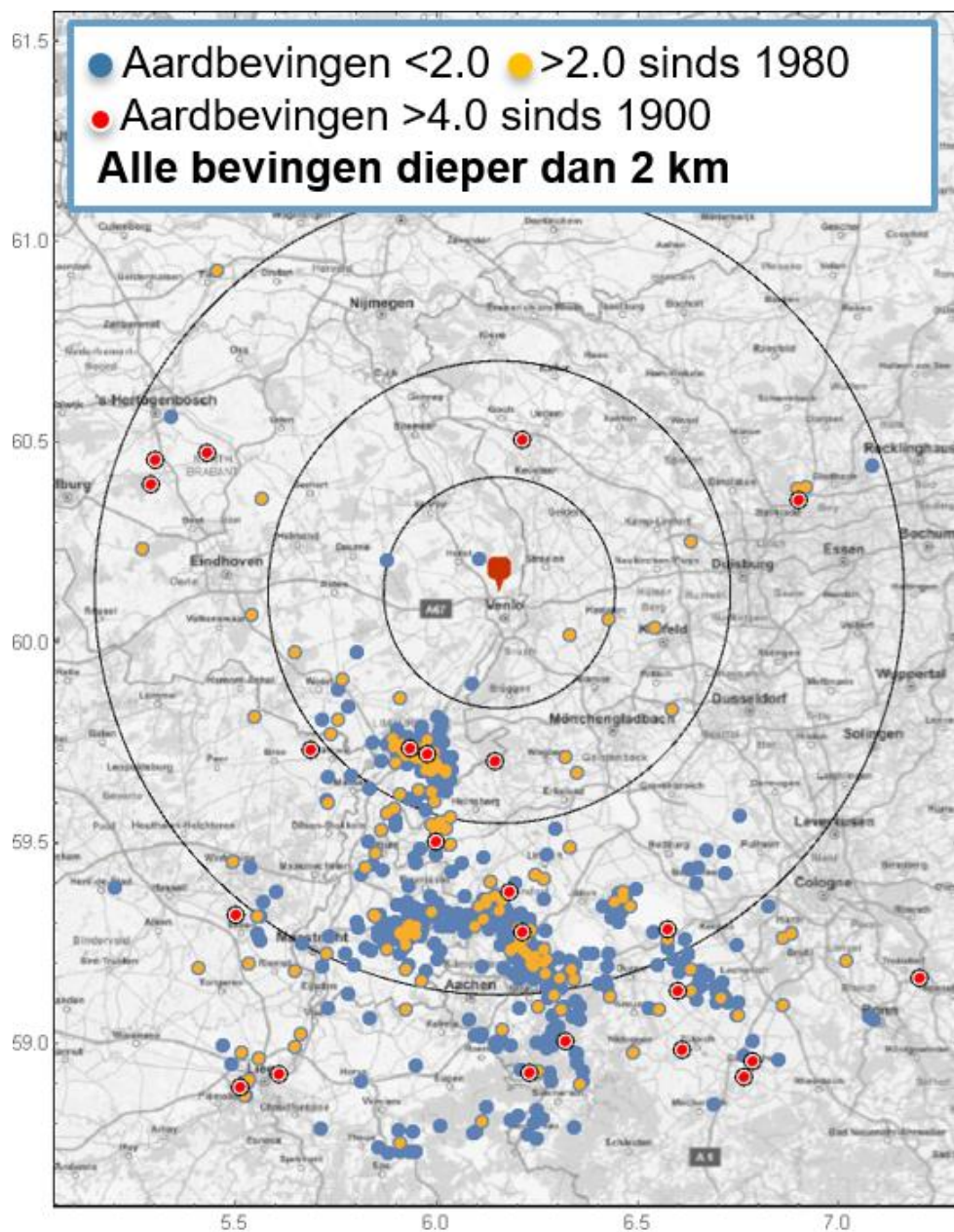
7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

34/55



Figuur 13: Locatie van aardbevingen uit de KNMI-catalogus in de periode 1-1-1980 tot 30-6-2015. Daarnaast zijn enkele grote geregistreerde bevingen op de kaart gezet van voor de reguliere registratie. Stralen van de cirkels van binnen naar buiten zijn 20, 40 en 70 km. De locatie van CLG is bij het rode label.

Datum

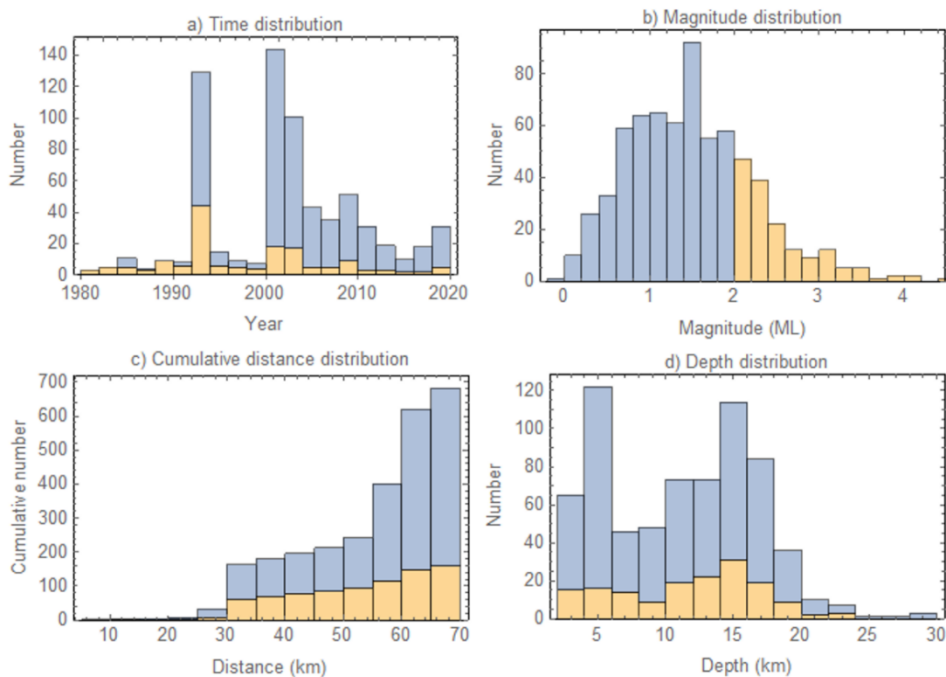
7 april 2020

Onze referentie

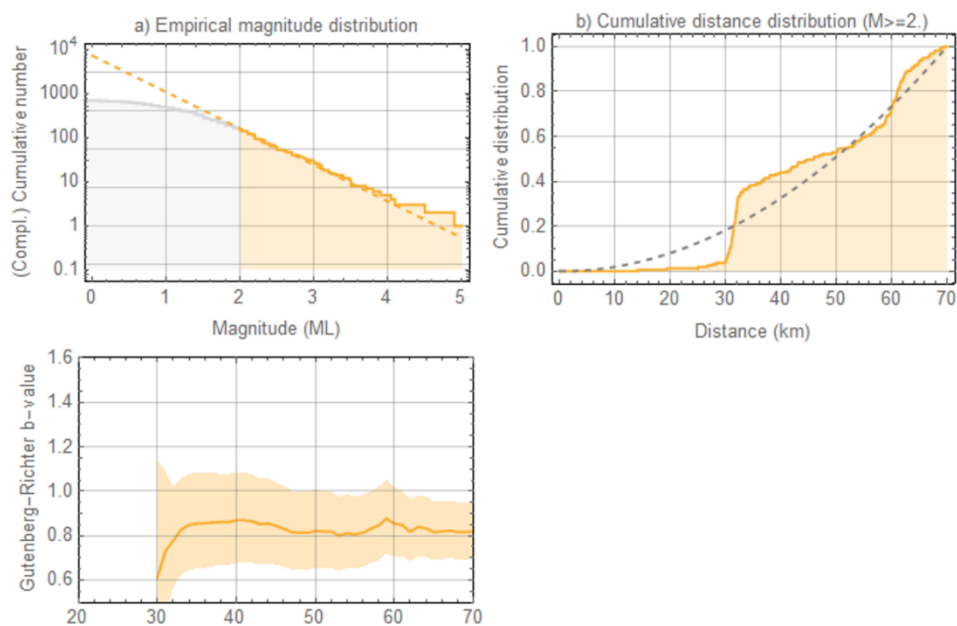
AGE 20-10.037

Blad

35/55



Figuur 14: Aardbevingen statistiek van aardbevingen in een straal van ca 70 km rond de projectlocatie. Blauw bevingen < 2 M_L , oranje bevingen > 2 M_L . a) aantal bevingen per jaar; b) aantal per magnitudeklasse; c) cumulatief aantal per afstandsklasse, oorsprong van de grafiek is de locatie van het CLG-doublet; d) aantal bevingen per diepteklasse.



Figuur 15: Extrapolatie van het verwachte aantal natuurlijke bevingen in een periode van 35,5 jaar van bevingen > 2 M_L binnen een straal van 70 km van CLG.

De seismische vingerafdruk van de regio laat zich vangen in Figuur 14. Figuur 14a toont de frequentie van aardbevingen per 2-jaarsintervallen. Ogenschoonlijk is er een bepaalde periodiciteit van circa 10 jaar. Figuur 14b geeft het aantal bevingen per magnitudeklasse weer. Het aantal bevingen, inclusief locatie, met een lage waarde is onder-geregistreerd vanwege de detectiegrens van het seismische meetnet (circa M_L 1,5 tot 2). Figuur 14c geeft de afstand van de aardbevingshaarden tot de CLG-projectlocatie. Voor aanvang van aardwarmtewinning bij CLG en CWG, zijn er slechts twee natuurlijke aardbevingen geregistreerd in een straal van 15 km: op 08-04-2003 vond er bij IJsselstein (Limburg) op een diepte van 10 km een beving plaats van 1,7 M_L en op 21-05-2007 een beving van 1,1 M_L bij Lottum op een diepte van 15 km. Figuur 14d geeft de diepte van de bevingshaarden in een straal van 70 km rond de projectlocatie. Opmerkelijk is de hoeveelheid bevingen van $M_L < 2$ rond de 5 km diepte. Daarnaast is er een piek van zowel bevingen $M_L < 2$ als $M_L > 2$ op een diepte-interval rond de 15 km.

Lichte aardbevingen komen veel vaker voor dan zwaardere bevingen (Figuur 14b). De Gutenberg-Richterwet beschrijft deze relatie tussen frequentie en magnitude van aardbevingen (Figuur 15a). Uit de trendlijn van de logaritmische waarde van het cumulatieve aantal bevingen en de magnitude van de bevingen kan een richtingscoëfficiënt worden bepaald: de zogenaamde b-waarde (Figuur 15a en c). Uit de actualisatie van TNO-AGE volgt een b-waarde van 0,8. Deze waarde geeft een indicatie van de verhouding tussen grote en kleine bevingen. Daarnaast worden deze grafieken gebruikt om een optreed-frequentie te bepalen. De totale registratieperiode waarin deze populatie aardbevingen in dit gebied heeft plaatsgevonden, is circa 40 jaar. Op basis van deze waarde is vastgesteld dat er binnen een straal van 70 km van CLG, in een tijdsbestek van ongeveer 40 jaar gemiddeld 150 natuurlijke aardbevingen met een $M_L > 2$ voorkomen, ca. 20 met een $M_L > 3$ en ca. 3 met een $M_L > 4$.

Het KNMI heeft twee aparte catalogi voor geregistreerde aardbevingen door het landelijke meetnetwerk: een voor natuurlijke en een voor geïnduceerde. De catalogus voor geïnduceerde bevingen bestaat voornamelijk uit bevingen gerelateerd aan gaswinning of gasopslag (e.g. Groningengasveld, Bergermeer). Toch is het onderscheid tussen natuurlijke of geïnduceerde aardbevingen niet altijd eenduidig te maken. Dat is terug te zien in de natuurlijke aardbevingscatalogus van het KNMI, waar bijvoorbeeld de ondiepe Voerendaalbevingen in zijn opgenomen. Deze bevingen zijn naar alle waarschijnlijkheid geïnduceerd en gerelateerd aan grootschalige grondwateronttrekking ten behoeve van de mijnbouw [21].

De M_L 1,7 beving van 03-09-2018 nabij het CWG-doublet is ook opgenomen in de natuurlijke bevingscatalogus van het KNMI en wordt daar op een diepte van 1 km geplaatst. Deze beving zou gerelateerd kunnen zijn aan geothermische operaties van het CLG-doublet. Ook Q-con, die de locatiespecifieke SHA voor de vergunninghouder heeft uitgevoerd, sluit de mogelijkheid van een natuurlijke beving niet uit op p. 39 in [2].

Nader onderzoek door het KNMI [22] met data van het lokale meetnetwerk van Q-con bij Californië geeft een mogelijk dieptebereik van 3,2 tot 9,2 km. Onzekerheid in de plaatsbepaling is niet gegeven in de KNMI-dataset. Het is echter bekend dat

met de toegepaste analysemethode, de locatie in kaartbeeld tot enkele kilometers kan afwijken. De dieptelocatie heeft ook een onzekerheid van kilometer(s).

5.2.1.2 Seismiciteit bij Californië tussen 2014 en heden

Vergunninghouder heeft berekend dat alle 17 bevingen geregistreerd door het seismische netwerk een hypocentrum hebben rond de 6 km diep (Tabel 11 in [1]). Op p. 34 in [1] beargumenteert vergunninghouder dat de aardbevingen zijn geïnduceerd door geothermische activiteiten van het CWG- en/of CLG-doublet vanwege de correlatie tussen het tijdstip van de productiestop en het tijdstip waarop de aardbevingen plaatsvonden en de locatie. Daarnaast stelt vergunninghouder op p. 8 in [2] dat het zeer aannemelijk is dat de aardbevingen op injectiediepte hebben plaatsgevonden. De potentiële injectie-dieptelocatie van CAL-GT-3 bevindt zich in het interval 1490 tot 1880 m TVD maar eindigt effectief op 1690 m TVD (1800 tot 2400 m AH). De potentiële injectie-dieptelocatie van CAL-GT-05 is rond het “open hole” interval van 1368 tot 2011 m TVD. Dit is meer dan 4 km verticaal verwijderd van de circa 6 km diepte die met de aardbevingshaardlocatiemethodiek in [2] is bepaald en door Q-con wordt gerapporteerd.

KNMI rapporteert in haar aardbevingscatalogus [16] een groot aantal geïnduceerde bevingen in de ruime omgeving van de projectlocatie, met name in noordoostelijke en zuidelijke richting (Figuur 13). Vooralsnog lijken de meeste van deze bevingen gerelateerd aan de mijnbouw in Duitsland en Zuid-Limburg. Van de 17 door Q-con geregistreerde bevingen wordt door het KNMI alleen de M_L 1,7 beving gerapporteerd. KNMI heeft de plaatsbepaling van de 1,7 M_L aardbeving uitgebreid ge(her-)analyseerd en komt tot een diepte tussen de 3,2 en 9,2 km [22] met als meest plausibele uitkomst een diepte van circa 7 km. De locatie in kaartbeeld is nabij de door Q-con bepaalde locatie (Figuur 16). De dieptelocaties van de M_L 1,7 beving wijken af van die gegeven in de landelijke aardbevingscatalogus van KNMI. Daar wordt nog de oude foutieve locatiewaarde gegeven van 1 km diep op een locatie buiten het kaartbeeld van Figuur 16.

In het winningsplandocument rapporteert vergunninghouder het voorkomen van 17 aardbevingen in de periode 18-8-2015 tot 9-9-2018 (Tabel 10 en 11 in [1] en Tabel 2 en 3 in [2]). Evaluaties van de aardbevingen zijn gegeven in de rapporten [2] en [3] van Q-con. Op basis van locatie en tijd is een vierdeling in de bovenstaande tabellen te maken: de eerste 6 bevingen zijn opgetreden in de periode van augustus 2015 tot en met april 2018 waarin enkel het CWG-doublet produceerde. De zevende beving vond plaats op 8 april 2018 in de periode waarin zowel CLG en CWG in productie waren. Al deze bevingen zijn gelokaliseerd in kaartbeeld rond de injectieput CAL-GT-03 van CWG (Figuur 16). De achtste beving vond 15 weken na de productiestop van CWG plaats en is in kaartbeeld gelokaliseerd nabij de injectieput van CLG (CAL-GT-05). De daaropvolgende bevingen, nummer 9 tot 17, vonden 6 tot 12 dagen plaats na de productiestop van het CLG-doublet waarbij ook het CWG-doublet niet produceerde.

Datum

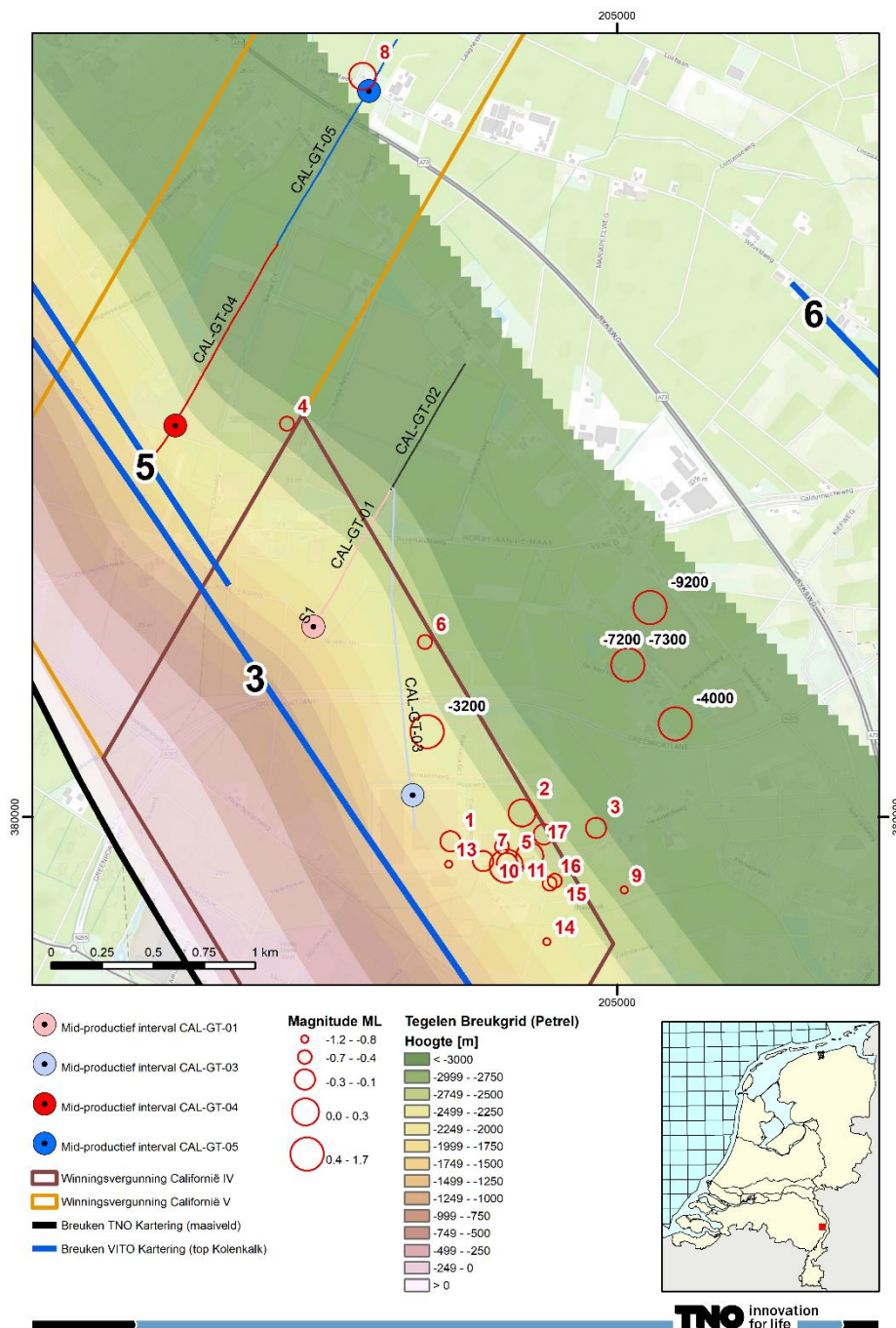
7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

38/55



Figuur 16: De locatie van de 17 bevingen op basis van de aangeleverde data van Q-con (relocated) geannoteerd met het beving-volnummer in rode cijfers rood en de locatie en diepte van beving nummer 11 (1,7 ML)(geannoteerd met de dieptewaarde in zwarte cijfers) voor de verschillende KNMI modellen.

De eerste aardbeving nabij de CWG-injectieput, CAL-GT-03, vond plaats circa 19 maanden na productiestart van het CWG-doublet. Er was toen circa 2,5 miljoen

m³ koud water geïnjecteerd en dezelfde hoeveelheid warm water geproduceerd. De eerste aardbeving nabij de CLG-injectieput CAL-GT-05, beving 8 met 0,0 M_L, vond plaats circa 14 maanden na productiestart van het CLG-doublet. Er was toen circa 1,34 miljoen m³ koud water geïnjecteerd en de dezelfde hoeveelheid warm water geproduceerd.

Sinds de laatste door Q-con geregistreerde beving nummer 17 op 9 september 2018 hebben er zich -voor zover bij TNO-AGE bekend- tot op heden geen nieuwe bevingen op en rond de projectlocatie voorgedaan. Ook het KNMI heeft sindsdien geen bevingen nabij het doublet geregistreerd [16].

5.2.1.3 *Onzekerheid bevingshaardlocatie*

De onzekerheid in de bevingshaardlocatie en dan met name de dieptebepaling, is groot en wordt veroorzaakt door het gebrek aan een betrouwbaar snelheidsmodel gebaseerd op lokale snelheidsmetingen. Daarnaast is voor een meer exacte dieptebepaling een meetsonde op diepte noodzakelijk. KNMI heeft in haar rapport [16] verschillende snelheidsmodellen gebruikt in de standaard plaatsbepalingsmethode. De diepteonzekerheid bij een bepaald snelheidsmodel gerelateerd aan de methode wordt niet gegeven.

Q-con heeft voor de vergunninghouder aan de hand van een inversiemethode de haardlocatie nader bepaald [2]. Daarbij is het standaard KNMI snelheidsmodel als invoer gebruikt, waarna dit model systematisch is gevarieerd om goed te passen met het seismische signaal van de 1.7 M_L beving. Met dit best passende snelheidsmodel zijn de absolute haardlocaties berekend, variëren van 5,4 tot 6,2 km. Daarbij rapporteert de Q-con in [2] 2-sigma afwijkingen voor zowel de dieptelocaties als de locaties in kaartbeeld voor alle 17 bevingen. Daarnaast is door middel van een Seismic Event Relocation methode de haardlocatie van de 1.7 M_L beving gebruikt om de relatieve locaties van de andere bevingen ten opzichte van de 1.7 M_L te verbeteren. De diepte van de relatieve haardlocaties varieert tussen de 5,6 tot 7,2 km.

Ondanks de gerapporteerde dieptes in [2], geeft de vergunninghouder aan dat de bevingen waarschijnlijk ondieper hebben plaatsgevonden op een diepte van circa 2 km. Dit impliceert een fout van rond de 3,5 km in de huidige dieptebepaling.

Het KNMI-rapport [16] stelt dat een betrouwbare inschatting van de dieptelocaties niet mogelijk is zonder kennis van de daadwerkelijke secundaire golfsnelheden (Vs, S-waves) in het gebied. Er lijkt een mogelijkheid om secundaire golfsnelheden te bepalen op basis van de meetreeksen van de seismometers, inclusief de seismische achtergrondruis (ambient noise). Dit is nader onderzocht.

5.2.1.4 *Bepaling Vs met ambient noise methodiek [23]*

De aardkorst staat continue aan periodieke vibraties bloot. Deze worden veroorzaakt door bijvoorbeeld getijden en golfwerking in de zee of treinen. Deze processen geven een coherent "ambient" seismisch signaal dat verstopt zit in de seismische ruis die door een gevoelig seismisch meetnetwerk als die bij de doubletten CLG en CWG wordt opgevangen. Door de seismische ruis te aggregeren, is het mogelijk het verstopte coherente signaal te versterken. Dit signaal bestaat uit golven met verschillende golflengtes op basis waarvan van een

lokaal 1D-snelheidsmodel berekend kan worden. Dit snelheidsmodel kan vervolgens gebruikt worden om de haardlocatie nauwkeuriger te bepalen.

Tot op heden is het TNO-AGE niet gelukt om de signaal-ruisverhouding van de data van de vijf monitoringsstations [6] te verbeteren zodat er bruikbare gegevens uit gehaald kunnen worden. Dit heeft meerdere oorzaken: de technische specificaties van de seismometers zijn niet optimaal voor deze techniek. Eén maand data heeft geen bruikbaar resultaat opgeleverd. Dataprocesing van een jaar aan gegevens heeft tot op heden ook nog geen bruikbaar resultaat opgeleverd. Derhalve blijft momenteel de diepte van de haardlocatie omgeven met een grote onzekerheidsbandbreedte.

5.2.1.5 Bevindingen TNO-AGE

TNO-AGE heeft de natuurlijke achtergrond seismiteit geanalyseerd en vergeleken met de waargenomen bevingen bij Californië ten tijde van de aardwarmtewinning. Door de beperkte detectielimiet van het landelijke KNMI netwerk (vanaf magnitude van 1,5) is alleen beving nr. 11 (1,7 ML) te vergelijken met de geregistreerde natuurlijke aardbevingen. Ook is het niet mogelijk om een betrouwbare b-waarde te bepalen voor het beperkte aantal bevingen bij Californië ten tijde van de aardwarmtewinning. Hierdoor kan niet worden bepaald of deze b-waarde afwijkt van de natuurlijke b-waarde van 0,8. De voorlopig bepaalde bevingshaarddieptes van 3 tot 9 km diep, wijken niet af van natuurlijke bevingsdieptes.

*Op basis van deze (beperkte) dataset en informatie concludeert TNO-AGE dat de aard van waargenomen bevingen bij Californië niet eenduidig van natuurlijke bevingen is te onderscheiden. Het antwoord op vraag 1 in de “beslisboom aard seismiteit” (Figuur 12) is daarom **NEE**.*

5.2.2 Vraag 2 van seismiteits-beslisboom: Ruimtelijke correlatie bevingen

De analyse in het voorgaande hoofdstuk is ondersteunend aan onderstaande bevindingen.

5.2.2.1 Bevindingen TNO-AGE

De onzekerheid van zowel de bevingsdiepte als de locatie van de bevingen in kaartbeeld is aanzienlijk. De voorlopig bepaalde bevingshaarddieptes voor beving 11 is tussen de 3 en 9 km diep. Dit bereik ligt 1-6 km dieper dan de diepte-intervallen waaruit warmte wordt geïnjecteerd en geproduceerd.

De haardlocaties in kaartbeeld hebben een onzekerheid (in de orde van 1 km). Alle bevingen, op beving nr. 4 en 8 na, vallen buiten het winningsgebied van Californië V en clusteren rondom de injector van CWG (CAL-GT-03) nabij de Tegelenbreuk (zie Figuur 16). Beving 4 ligt nagenoeg op de vergunningsgrens tussen de twee doubletten, terwijl beving 8 nabij de injectielocatie van CLG ligt (CAL-GT-05).

Ondanks de onzekerheid in de positie van de haardlocatie stelt TNO-AGE vast dat, op basis van deze informatie, er een ruimtelijke correlatie bestaat tussen de

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
41/55

bevingshaardlocaties en de aardwarmtewinning. Deze correlatie is het sterkst in kaartbeeld, waarbij de meeste bevingen clusteren bij de injectielocaties, maar minder sterk voor de diepte van de bevingshaarden die een stuk dieper liggen dan het aardwarmtereservoir. Het antwoord op vraag 2 in de beslisboom (Figuur 12) is JA.

Tabel 8: Overzicht van de ruimtelijke correlatie tussen bevingen en de CAL-GT-03 injector van het CWG-doublet en de CAL-GT-05 injector van het CLG-doublet. De driedimensionale afstand (euclidische afstand) tussen de bevingshaardlocaties (tabel 3 [2]) wordt gegeven voor beide injectors. Met groen wordt aangegeven welke injector het dichtstbij de beving ligt.

ID	Datum	Tijdstip	M _L	Diepte [km]	Operatie-neel doublet	Afstand CAL-GT-03 [km]	Afstand CAL-GT-05 [km]
1	18-aug-15	02:47:05	-0,1	6,07	CWG	4,25	5,84
2	5-dec-15	08:07:28	0,3	5,84	CWG	4,04	5,63
3	26-jan-16	02:47:00	-0,3	5,65	CWG	3,93	5,59
4	2-apr-16	14:17:16	-0,5	6,31	CWG	4,76	5,14
5	25-jan-17	16:27:12	-0,3	5,84	CWG	4,06	5,76
6	31-jan-17	04:01:56	-0,5	5,90	CWG	4,07	5,17
7	8-apr-18	10:29:27	-0,2	5,94	CWG/CLG	4,14	5,82
8	25-aug-18	16:43:27	0,0	7,19	CLG	6,26	5,84
9	3-sep-18	18:11:23	-0,8	5,98	CLG	4,32	6,06
10	3-sep-18	18:12:35	-0,4	5,76	CLG	3,96	5,64
11	3-sep-18	18:20:31	1,7	5,90	CLG	4,12	5,82
12	3-sep-18	18:26:37	-0,3	5,57	CLG	3,81	5,50
13	3-sep-18	20:44:12	-1,0	6,01	CLG	4,20	5,86
14	4-sep-18	00:13:15	-1,2	5,85	CLG	4,17	6,04
15	6-sep-18	15:27:20	-0,4	5,73	CLG	4,00	5,77
16	6-sep-18	15:58:22	-0,5	5,79	CLG	4,06	5,82
17	9-sep-18	20:50:22	0,0	5,82	CLG	4,05	5,74

5.2.3 Vraag 3 van seismiciteits-beslisboom: Temporele correlatie bevingen

In Tabel 1 uit [2] wordt een correlatietabel gepresenteerd op basis van het tijdstip en de locatie van de aardbevingen met een mogelijke verklaring zoals een al dan niet opzettelijke productiestop of significante debietverlaging. De grafieken in de figuren 11-17 van Appendix A.2 [2] laten een veel grilliger beeld van debiet en waarschijnlijk bijbehorende injectie- en productiedrukken versus tijd zien dan de maandelijkse gemiddelden zoals gegeven in paragraaf 3.8 Productiegegevens en productieprognose CLG. Op basis van de gedetailleerde productiehistorie [5], zijn de tijdsintervallen tussen het optreden van een aardbeving en de eerst voorgaande productiestop of significante debietsverlaging door TNO-AGE geëvalueerd. Dit is weergegeven in onderstaande Tabel 9.

Ten tijde van beving 1-6 was alleen het CWG-doublet operationeel. Debietsverlagingen varieerden van 300 tot 80 m³/uur, waarbij de vertragingstijd

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
42/55

van de tussen de debietsverandering en de bevingen varieert tussen 30 minuten tot circa zes dagen.

Ten tijde van beving 7 waren beide doubletten operationeel. Voor beide doubletten is een significante productieverlaging aan te wijzen die voorafging aan beving 7.

Voorafgaand aan beving 8-17 was alleen het CLG-doublet operationeel. De grootste debietsverlagingen waren circa 200 m³/uur en vonden plaats bij het stilleggen en opstarten van de productie. Ongeveer 7 dagen voorafgaand aan beving 8 is het doublet stilgelegd, waarna het 2 dagen later weer is opgestart. Daarna is het doublet 33 uur voorafgaand aan de beving stilgelegd en vijf uur later weer opgestart.

Op 28 augustus rond 17.30 is het CLG-doublet definitief stilgelegd. De tijdsverschillen en debietsverlagingen van bevingen 9-17 kunnen derhalve alleen met deze productiestop verband houden.

Tabel 9: Overzicht van de temporele correlatie tussen bevingen en debietsverlagingen of productiestops van het CLW- en CLG-doublet.

ID	Datum	Tijdstip	M _L	Debiets- verlaging/ Productie- stop van	ΔQ [m ³ /u]	Δt [uur]	Δt [dag]
1	18-aug-15	02:47:05	-0,1	CWG	240	0,5	0,02
2	5-dec-15	08:07:28	0,3	CWG	150	68	2,83
3	26-jan-16	02:47:00	-0,3	CWG	270	25,9	1,08
4	2-apr-16	14:17:16	-0,5	CWG	300	138,6	5,78
5	25-jan-17	16:27:12	-0,3	CWG	80	9,2	0,38
6	31-jan-17	04:01:56	-0,5	CWG	80	114,8	4,78
7	8-apr-18	10:29:27	-0,2	CWG/CLG	75/425	14/46	0,58/1,92
8	25-aug-18	16:43:27	0,0	CLG	200	25/33/ 123/171	1,04/1,38/ 5,15/7,13
9	3-sep-18	18:11:23	-0,8	CLG	200	144,75	6,03
10	3-sep-18	18:12:35	-0,4	CLG	200	144,83	6,03
11	3-sep-18	18:20:31	1,7	CLG	200	144,92	6,04
12	3-sep-18	18:26:37	-0,3	CLG	200	145,00	6,04
13	3-sep-18	20:44:12	-1,0	CLG	200	147,33	6,14
14	4-sep-18	00:13:15	-1,2	CLG	200	150,83	6,28
15	6-sep-18	15:27:20	-0,4	CLG	200	214,00	8,92
16	6-sep-18	15:58:22	-0,5	CLG	200	214,50	8,94
17	9-sep-18	20:50:22	0,0	CLG	200	291,42	12,14

5.2.3.1 Bevindingen TNO-AGE

TNO-AGE heeft de waargenomen bevingen bij Californië ten tijde van de aardwarmtewinning vergeleken met de productiehistorie van de twee doubletten. Bij alle bevingen ten tijde van de aardwarmtewinning van het CWG-doublet lijkt er een significante debietsverandering (≥ 75 m³/uur) of productiestop te zijn geweest die enkele uren tot circa zeven dagen voorafgaand aan de beving plaatsvond. Voorafgaand aan beving 7 vonden er zowel bij CWG als CLG een debietsverandering(en) of productiestop(s) plaats. Toch zijn er ook meerdere

debietsveranderingen of productiestops waarbij geen seismiciteit heeft plaatsgevonden. In de periode 1 juni tot 1 augustus 2018 is het CLG-doublet 9 keer opgestart en 8 keer stilgelegd, zonder dat er bevingen zijn geregistreerd.

Voorafgaand aan beving 7 vonden er zowel bij CWG als CLG debietsverandering(en) of productiestop(s) plaats.

Ook bij beving 8 en bevingen 9-17 (temporeel geclusterd rond hoofdbeving 11) lijken te correleren met debietsveranderingen of productiestops bij CLG.

De vertragingstijd tussen deze debietsveranderingen of productiestops en het optreden van de bevingen varieert tussen een half uur en 12 dagen. Twee productiestops vonden plaats voorafgaand aan beving 8 met een vertragingstijd van anderhalve dag en zeven dagen. Toch valt ook niet uit te sluiten dat beving 8 mogelijk is veroorzaakt door het opstarten van het CLG-doublet.

Na beving 8 is de productie van het CLG-doublet geheel stilgelegd. Ongeveer zes dagen na het stilzetten van het doublet, vonden bevingen 9-14 plaats. Bevingen 15 en 16 vonden negen dagen na de productiestop plaats en beving 17 na 12 dagen.

Voor zover bij TNO-AGE bekend zijn er geen nieuwe bevingen gedetecteerd na de bevingen in september 2018. Dit is mogelijk een extra aanwijzing voor het mogelijke verband tussen de bevingen en aardwarmtewinning.

Op basis van de productiegegevens constateert TNO-AGE een temporele correlatie tussen de debietsveranderingen/productiestops en de bevingen. Het antwoord op vraag 3 in de beslisboom (Figuur 12) is daarom JA.

5.2.4 Vraag 4 van seismiciteits-beslisboom: Mogelijke scenario's en oorzaken bevingen

5.2.4.1 Mogelijke scenario's en oorzaken volgens vergunninghouder

Op p. 33 in [1] stelt vergunninghouder dat het aannemelijk is dat alle aardbevingen, behalve beving nummer 8, te relateren zijn aan geothermische activiteiten bij CWG. Op basis van de correlatie tussen het tijdstip van grote afnames in debiet of productiestops en het tijdstip en locatie waarop aardbevingen hebben plaatsgevonden, wordt geconcludeerd dat de bevingen moeten zijn geïnduceerd.

De vergunninghouder stelt dat het meest waarschijnlijke aardbevingsmechanisme thermische contractie van het reservoir is ten gevolge van koudwaterinjectie (thermo-elastisch effect) door de CAL-GT-03 injectieput in de Tegelen breukzone.

Daarnaast suggereert de vergunninghouder dat de druktoename om en nabij de productieputten, CAL-GT-01 of CAL-GT-04, terug naar het evenwichtsniveau van voor productie, ook voor een drukpuls kan zorgen (effect van directe drukverandering, ΔP). Hierdoor zou beweging kunnen plaatsvinden in het door afkoeling gedestabiliseerde deel van de breuk nabij de CAL-GT-03 put.

Het uitzetten of krimpen van het reservoir door lokaal verhoogde poriëndruk rondom de injector of lokaal verlaagde poriëndruk rondom de producer kan van invloed zijn op de breukstabiliteit (poro-elastisch effect). De vergunninghouder beargumenteert dat gezien het geringe effect van directe drukveranderingen, het poro-elastische effect van secundair belang moet zijn.

Vergunninghouder stelt in [1] de uitkomsten van de eigen dieptebepaling van de bevingen ter discussie en acht een scenario met ondiepere bevingen in de nabijheid van de injector als waarschijnlijker (op basis van p. 8 in [2]). Dit mogelijke scenario voor de bevingshaardlocaties sluit beter aan bij het door vergunninghouder aangedragen voorkeurshaardmechanisme. Een groot snelheidscontrast tussen de bovenliggende lagen en het reservoirgesteente wordt als mogelijke verklaring gegeven voor het verschil in diepte (p. 8 in [2]). Er wordt echter niet ingegaan op de benodigde grootte van dit snelheidscontrast om de bevingen op reservoirniveau te kunnen plaatsen en ook een petrofysische duiding of indicatie op de seismiek van dit voorgestelde snelheidscontrast ontbreekt.

5.2.4.2 Mogelijke scenario's en oorzaken volgens TNO-AGE

Op basis van de door de vergunninghouder aangeleverde rapporten en data met bijhorende onzekerheden, zijn door TNO-AGE twee belangrijkste scenario's gedefinieerd met mogelijke oorzaken:

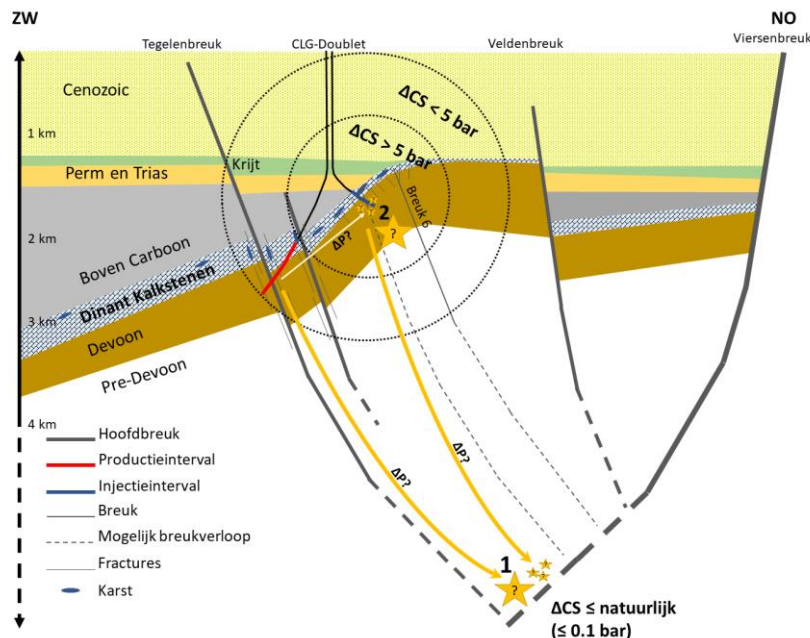
1. Bevingen vonden plaats op de door Q-con gerapporteerde diepte (ca. 6 km diep) door:
 - A. Thermo-elastische effect door weglekken injectiewater langs breuken naar de gerapporteerde diepte van de bevingen;
 - B. Drukdiffusie vanuit productieput na stilzetten doublet;
 - C. Natuurlijke triggers (e.g. getijden, weer, grondwaterfluctuaties, teleseismische aardbevingsgolven).
2. Bevingen vonden plaats op reservoirdiepte (ca 1,5 km) door:
 - A. Drukdiffusie vanuit productieput na stilzetten doublet;
 - B. Thermo-elastisch effect (injectieputten);
 - C. Poro-elastische effecten;
 - D. Natuurlijke triggers;
 - E. Alle denkbare combinaties van A t/m D.

Deze scenario's zijn schematisch weergegeven in Figuur 17. Door de onzekerheid van de dieptebepaling van de bevingshaarden is het momenteel niet mogelijk om een van de twee scenario's volledig uit te sluiten. Ook is een natuurlijke oorzaak van de bevingen enkel uit te sluiten als de spanningsveranderingen door aardwarmtewinning significant groter zijn dan de natuurlijke spanningsveranderingen. Verder is het ook mogelijk dat er ook per beving sprake kan zijn van een ander scenario.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
45/55



Figuur 17: Schematische doorsnede van het gebied Californië V met het CLG-Doulet, de aanwezige aardlagen en breuken. Gegeven de onzekerheid van de dieptebepaling van de aardbevingen, zijn er twee mogelijke scenario's voor de haardieptes: 1) beving(en) vonden plaats op de door Q-con geregistreerde diepte van ~6 km; 2) beving(en) vonden plaats op reservoirniveau. ΔP = opgelegd drukverschil, ΔCS = spanningsverandering in het gesteente ten gevolge van afkoeling of drukverandering.

Om inzicht te krijgen in de waarschijnlijkheid van deze scenario's, heeft TNO-AGE voor beide scenario's de mogelijke oorzaken in kaart gebracht en een orde-grootte-analyse uitgevoerd van de mogelijk optredende spanningsveranderingen. Deze analyse zal zich beperken tot de hoofdbeving van 1.7 ML (beving 11) en de beving van 0.0 (beving 8), voorafgaand aan de hoofdbeving.

5.2.4.3 Spanningsbalans

Verhouding tussen (mogelijk) opgelegde spanningsverschillen door aardwarmtewinning (nabij breuken op reservoirniveau en waarnemingsdiepte bevingshaarden) en de natuurlijke variatie van de spanningstoestand (e.g. getijden, teleseismische golven, natuurlijke seizoenale fluctuaties).

5.2.4.4 Natuurlijke spanningstoestand in de ondergrond

Het SCAN-rapport over de spanningstoestand in het Dinantien in Nederland [24] geeft voor het CLG- en CWG-doublet een indicatie over het aldaar heersende stressveld. Borehole breakout interpretaties (Tabel 1 [24]) geven voor CAL-GT-01 een spanningsrichting voor Sh_{max} van $310^\circ \pm 3^\circ$. Interpretaties van Image logs geven een spanningsrichting voor Sh_{max} in CAL-GT-01 van 301° (Tabel 2 [24]). De gekarteerde breuken hebben een strekking van variërend tussen $300-330^\circ$ (Figuur 11), in lijn met Sh_{max} . De door Q-con (Figuur 5 [2]) gerapporteerde breukoplossing (FMS) gebaseerd op de zwaarste beving van 1,7 ML, geeft een puur strike-slip regime met sinistraal verzet langs een breukvlak met een strekking van $349,6^\circ$ of een breukvlak met een strekking van $79,9^\circ$ met dextraal verzet.

Algemeen wordt aangenomen dat in de Roerdalslenk de verticale spanning S_v groter is dan de horizontale spanningen $Sh_{\max}$ en $Sh_{\min}$ resulterend in een afschuivingsregime met een stressrichting variërend tussen N135-N165 (e.g. [25]). Voor de geomechanische modellen van CLG, gebruikt Q-con de volgende spanningsgradiënten, mogelijk bepaald door het aflezen van een grafiek uit [26]: $S_v = 0,3 \text{ bar/m}$, $Sh_{\max} = 0,21 \text{ bar/m}$, $Sh_{\min} = 0,13 \text{ bar/m}$.

Deze spanningsgradiënten komen overeen met een afschuivingsregime. In [26] wordt tot een diepte van 12 km een afschuivingsregime voorzien dat overgaat in een strike-slip regime op grotere diepte. Het verschil tussen S_v en $Sh_{\max}$ is klein op een diepte van 4-8 km. De reservoirdichtheid van 2500 kg/m^3 die door Q-con wordt aangenomen, komt niet overeen met een $S_v = 0,3 \text{ bar/m}$. Door de algemeen lagere dichtheid van ondiepere, jongere geconsolideerde lagen, zou de S_v eerder rond de $0,25 \text{ bar/m}$ moeten liggen. Dit klopt ook beter met Figuur 7 [3] (S_v is ongeveer 190 MPa op $7,5 \text{ km}$ diepte). Doordat het verschil tussen S_v en $Sh_{\max}$ mogelijk kleiner is dan Q-con heeft aangenomen, kunnen eventuele strike-slip breukbewegingen niet op voorhand worden uitgesloten. Dit zou mogelijk een verklaring kunnen zijn voor de door Q-con bepaalde strike-slip breukoplossing bij de zwaarste beving (nummer 11, $1,7 M_L$) samen met een bevingshaarddiepte van 5-7 km.

De $Sh_{\min}$ van $0,13 \text{ bar/m}$ die door Q-con wordt aangehouden, is wel in overeenstemming met Figuur 7 [3]. Voor gebieden waar geen spanningsgradiënt waarnemingen zijn, wordt voor het Dinantien de $Sh_{\min}$ echter hoger ingeschat op $0,18 \text{ bar/m}$ [24].

Het is belangrijk om te vermelden dat de grafiek in Figuur 17 [26] (zie ook Figuur 7 [3]) slechts een indicatie geeft van de spanningen op basis van aannames voor dichtheid van de verschillende lagen. Door gebrek aan dichtheidslogs van de putten van CLG en CWG blijft het onzeker of deze waarden representatief zijn voor de ondergrond bij CLG en CWG.

Ter verantwoording van de injectiedruk aan SodM is er door vergunninghouder een notitie opgesteld [27] waarin resultaten van formatieintegriteitstests worden gegeven (FIT tests). De zogenaamde breukvoortplantingsdruk (FPG) is bepaald voor de verschillende gesteenteformaties in put CAL-GT-05. Deze druk geeft de maximale belasting weer waaraan een gesteenteformatie nabij de put is blootgesteld zonder te breken en is indicatief voor de $Sh_{\min}$. De daadwerkelijke $Sh_{\min}$ kan enkel worden bepaald door middel van een leak-off test (LOT), waarbij de belasting wordt verhoogd totdat het gesteente breekt.

De gradiënten van de FPG's zijn allemaal groter dan de $Sh_{\min}$ -gradiënt die door Q-con wordt gebruikt. Ook de lithostatische drukgradiënten voor de formaties uit de FIT zijn lager dan de S_v van Q-con. De ratio tussen $Sh_{\min}$ en S_v geeft een indicatie voor de neiging tot breukbeweging (slip-tendency). De $Sh_{\min}/S_v$ van Q-con geeft een grotere neiging tot breukbeweging vergeleken de waardes uit de FIT.

Het tabel hieronder geeft een overzicht van deze gegevens.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
47/55

Tabel 10: Overzicht van lithostatische drukken en breukvoortplantingsdrukken (FPG), indicatief voor Sh_{min} , voor de gesteenteformaties in CAL-GT-05.

Formatie	Lithostatische drukgradiënt [bar/m]	FPG [bar/m]	Poisson's ratio ν
Overburden (o.a. Noordzee Groep)	0,22	-	-
Limburg Groep / Epen Fm (kleisteen)	0,24	0,135	0,2
Zeeland Fm / Kolenkalk	0,27	0,157	0,3
Boscheveld Fm / Banjaard kalksteen	0,25	0,158	0,3
Condroz zandsteen	0,25	0,147	0,25
Vergunninghouder (Q-con / VITO) als aanname voor het gehele reservoir	0,3	0,13 (Sh_{min})	0,25

5.2.4.5 Geomechanische eigenschappen ondergrond

De door Q-con opgestelde geomechanische modellen voor de vergunninghouder gebruiken aannames voor de mechanische eigenschappen (Tabel 11) van de reservoirgesteenten en de Tegelenbreuk.

Tabel 11: Geomechanische parameters uit de rapportages van vergunninghouder.

Reservoirparameters Vergunninghouder (Q-con / VITO)	
Dichtheid ρ	2500 kg/m ³
Soortelijke warmte C_p	900 J/kg/K
Lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt α_T	$8,00 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Shear modulus G	20 GPa
Youngs-modulus* (Zeeland/Boscheveld Fm)	50* GPa
Poisson's ratio ν	0,25
Frictiecoëfficiënt μ	0,6 ($\angle 31^\circ$)

*Door TNO-AGE bepaald

In de put CAL-GT-01 is een dipole sonic log gerund. Op basis van deze log heeft TNO-AGE een dynamische Youngs-modulus van circa 50 MPa bepaald, een dynamische shear-modulus van circa 20 MPa en een Poisson's ratio van circa 0,28.

Voor de berekening van de spanningstoestand in de ondergrond is de statische Youngs-modulus nodig. Deze is af te leiden door de dynamische Youngs-modulus te corrigeren (e.g. Nur & Wang, 1989) [28]: $E_{\text{statisch}} = E_{\text{dynamisch}} - 15,2 \sim 34,8 \text{ GPa}$.

5.2.4.6 Geomechanisch ondergrondmodel om breukstabiliteit te bepalen

Een eerstelijns rekenmodel om het risico op breukinitiatie of -reactivatie in te schatten, wordt gegeven in de Geomech_V2.xls rekensheet [29]. Hierbij is uitgegaan van de standaardwaarden van het Geomech sheet voor de geomechanische eigenschappen.

Een deel van het reservoirgesteente bij Californië bestaat uit kalksteen of dolomiet. De Youngs-modulus hiervoor is significant groter dan voor de typische

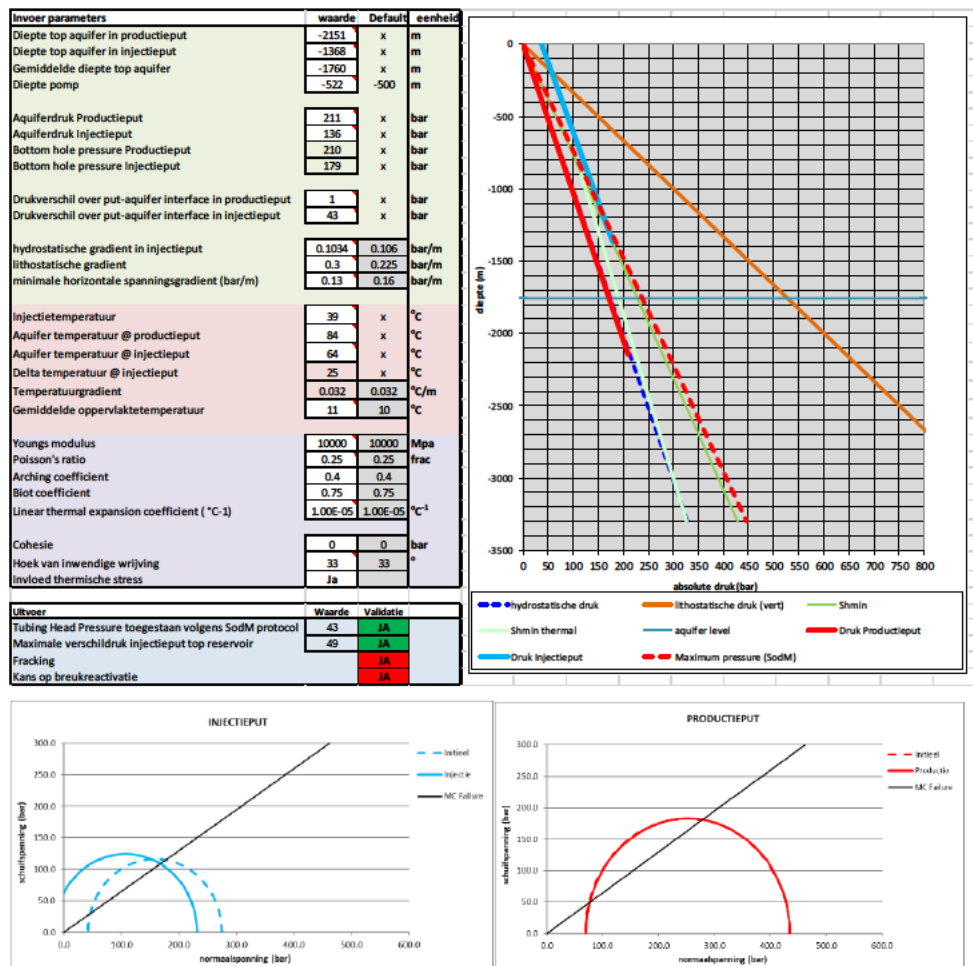
Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
48/55

zandsteenreservoirs. Het geomech sheet is momenteel nog niet geschikt om met hoge Youngs-moduli te rekenen, zoals de waarde van 35 GPa bepaald voor het reservoirgesteente bij CLG. In algemene zin kan worden gesteld dat een hogere Youngs-modulus zorgt voor een versterkt effect van thermische afkoeling. Dit effect heeft een negatieve invloed op de zowel de injectiedrukruimte (Sh_{min} thermal) als de breukstabiliteit.

Indien de door vergunninghouder gerapporteerde spanningsgradiënten worden gebruikt als invoerparameters, geeft dat als resultaat dat breuken nabij de aardwarmte-doubletten waarschijnlijk kritisch gespannen zijn. Ook als wordt uitgegaan van een optimistisch scenario waarbij de S_v en Sh_{min} zijn gebaseerd op de FIT waarden. In alle gevallen is er mogelijk kans op breukreactivatie van nabijgelegen breuken.

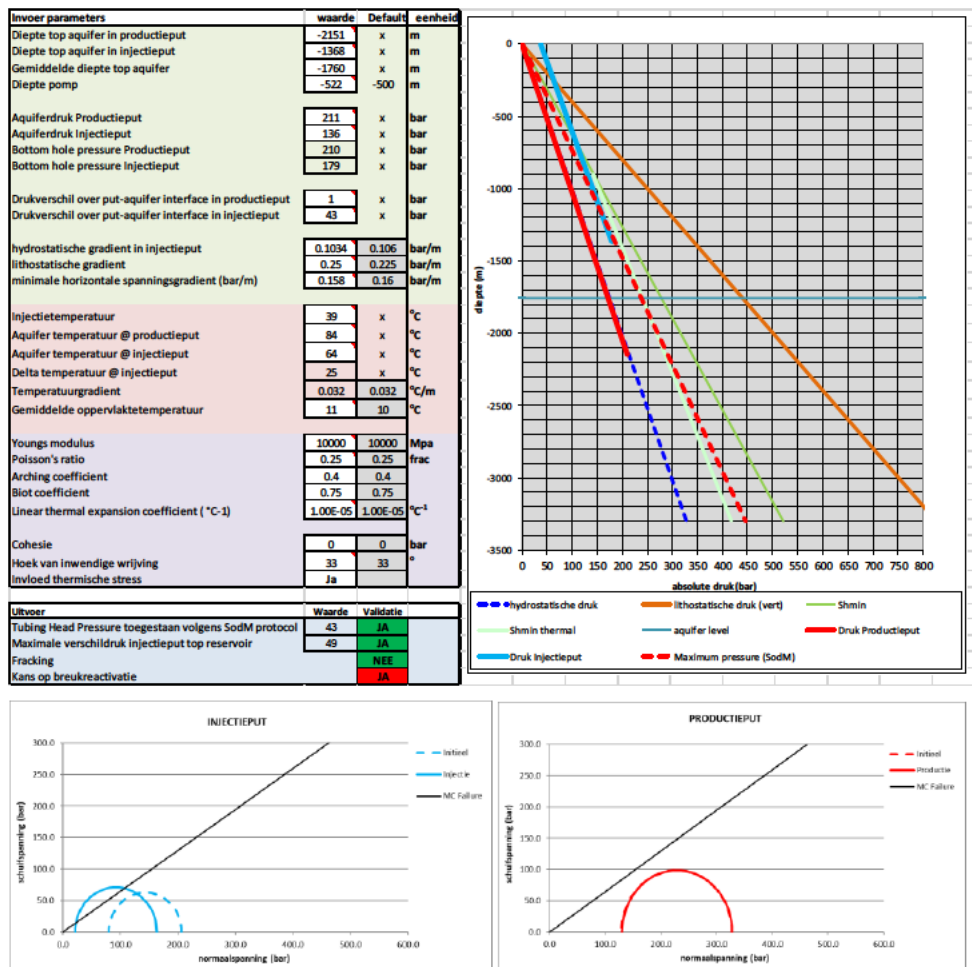


Figuur 18: Resultaat van eerstelijns geomechanische evaluatie op het effect van optreden van breukinitiatie en -reactivatie met gebruik van door vergunninghouder aangeleverde gegevens en onder aanname van een aantal geomechanische parameters. De Sh_{min} lijn ligt relatief dicht bij de hydrostatische lijn en de gebruikte injectiedruk op de injectiediepte is al hoger dan de berekende Sh_{min} druk. Ook is er een kans op breukreactivatie in beide putten met en zonder aardwarmteproductie.

Datum
7 april 2020

Onze referentie
AGE 20-10.037

Blad
49/55



Figuur 19: Resultaat van eerstelijns geomechanische evaluatie op het effect van optreden van breukinitiatie en reactivatie met gebruik van de TNO-AGE gegevens en onder aanname van een aantal geomechanische parameters. De Sh_{min} lijn ligt nagenoeg op de SodM pinjectieprotocol gradient. De gebruikte injectiedruk op de injectiediepte ligt onder de berekende Sh_{min} druk. Toch blijft er tijdens injectie kans op breukreactivatie bij de injector.

De opgelegde injectiedruk respecteert ruwweg de begrenzing van het injectieprotocol en is nagenoeg gelijk is aan de Sh_{min} zonder dat afkoelingseffecten worden meegenomen. Als dat effect wel wordt meegenomen, overschrijdt de injectiedruk het protocol in het geval dat wordt uitgegaan van een Sv van 0,3 bar/m en Sh_{min} van 0,13, gegeven door Q-con. Alleen als er wordt uitgegaan van hogere Sh_{min} waarden van de FIT (0,157-0,158 bar/m), overschrijdt het doublet het injectieprotocol niet.

Het geomech sheet gaat uit van breuken die een optimale oriëntatie hebben ten opzichte van het stressveld en daardoor mogelijk zouden kunnen reactiveren. Op basis van Levandowski et al. (2018) [30] heeft TNO-AGE de mogelijkheid op breukreactivatie bepaald voor alle mogelijke breukoriëntaties en -hellingshoeken en voor dieptes tussen de 1,8 (reservoirniveau) en 9 km. Gezien de locatie van Californië V in de tektonisch actieve Roerdalslenk wordt aangenomen dat reactivatie mogelijk is zonder significante drukverandering ($\Delta P = 0$) op te leggen.

Voor deze berekening zijn de spanningsgradiënten van zowel Q-con als de FIT gebruikt, zonder een injectiedruk op te leggen. Hieruit blijkt dat in beide gevallen breukreactivatie zou kunnen plaatsvinden voor gekarteerde breukoriëntaties (zie Figuur 11) en -hellingshoeken. De spanningstoestand wordt kritischer met toenemende diepte (groter verschil tussen S_v en S_{hmin}).

Q-con heeft voor de vergunninghouder geomechanische modellen opgesteld (zie [3]) om de spanningsveranderingen van aardwarmtewinning te modelleren op verschillende gekarteerde breuken (Figuur 11). Hierbij worden directe drukeffecten en het thermo-elastische effect meegenomen. Daarin toont Q-con aan dat deze effecten het sterkst zijn op breukvlakken op reservoirniveau nabij de injectieputten. Hierbij zijn de gemodelleerde spanningsveranderingen het grootst voor het model van de injectie van CAL-GT-03 van het CWG-doublet nabij de Tegelenbreuk (Figuur 34 [3]). De Coulomb spanningsverandering is hier op reservoirniveau groter dan 10 bar voor grote delen van het breukvlak.

Omdat in het reservoirmodel van Q-con wordt uitgegaan van de gekarteerde breuken uit Figuur 11, heeft het thermo-elastische effect veroorzaakt door het CLG-doublet nauwelijks effect op de breuken (Figuren 26-33 [3]). Dit komt door de beperkte uitbreiding van het koudwaterfront bij de injectieput CAL-GT-05 in relatie tot de afstand van de breuken (minimaal 2 km).

Ook het directe drukeffect op de Tegelenbreuk is klein, in de orde van maximaal 0.5 bar (Figuur 20 en 25 [3]). Het effect op de Veldenbreuk en parallel lopende breuken 6 en 7 is aanzienlijk groter, in de orde van 0,8 tot 1,8 bar met een constante druk randvoorwaarde aan de randen van het model (Figuur 25 [3]). In het geval dat er geen stroming kan plaatsvinden buiten het model, loopt de druk op tot zelfs 3,5 tot 5 bar (Figuur 20 [3]).

Mede door het plaatsvinden van beving 8 nabij de injector CAL-GT-05 acht TNO-AGE het waarschijnlijk dat er een of meerdere breuken nabij deze put liggen. Gezien het effect op de Veldenbreuk en parallel lopende breuken 6 en 7, zal het directe drukeffect en thermo-elastisch effect op nabije breuken aanzienlijk groter kunnen zijn (Figuur 24 en 34 [3]). Mogelijk zou het vergelijkbaar kunnen zijn met de injectie van CAL-GT-03 van het CWG-doublet nabij de Tegelenbreuk.

Hoewel de gemodelleerde spanningsveranderingen het sterkst zijn op reservoirniveau, is het niet mogelijk om het scenario van diepe bevingen uit te sluiten. Vanwege de natuurlijke spanningsgradiënten, is het mogelijk dat de breukstabiliteit afneemt met diepte waardoor ook kleine spanningsveranderingen een beving zouden kunnen veroorzaken (Figuur 17).

5.2.4.7 Breukdiffusiviteit en de mogelijke afstand tussen haarddieptelocaties en drukperturbaties

Uit puttasten, zoals ook benoemd in [2], blijkt dat er drukcommunicatie mogelijk is tussen putten van het CLG- en CWG-doublet. In Figuur 22 in [2] is een druktoename zichtbaar in put CAL-GT-01 circa 10 uur na het stilzetten van het CLG-doublet.

De formule $r_t = \sqrt{4\pi Dt}$ uit [31] beschrijft de eendimensionale afstand r_t die een drukgolf kan afleggen, gegeven een breukdiffusiviteit D en tijd t . D is afhankelijk van permeabiliteit k , porositeit ϕ , viscositeit μ en compressibiliteit c van water.

Op basis van een vertragingstijd van 10 uur, de afstand tussen CAL-GT-04 en CAL-GT-01 putten van 1136 meter en een doorlatendheid van 85 mD voor de Tegelenbreuk 85 mD, is door TNO-AGE een porositeit van ca. 4% voor de Tegelenbreuk bepaald.

Dezelfde formule is door TNO-AGE gebruikt om te berekenen of een drukperturbatie bij CLG de haarddieptelocaties van de bevingen bij CAL-GT-03 zou kunnen bereiken. Als dezelfde breukeigenschappen worden aangenomen voor de andere breuken in het reservoir kan met de vertragingstijd tussen de productiestop van CLG en het optreden van beving 11 worden berekend wat de ordegrootte van de afstand zou kunnen zijn.

Een vertragingstijd van 6 dagen resulteert in een afstand van circa 4,5 km, ongeveer gelijk aan de afstand tussen de injector CAL-GT-04 van CWG en de bevingshaardlocatie van beving 11 (haardiepte van 5,9 km).

Dit resultaat laat zien is dat drukperturbaties veroorzaakt door het stilleggen van CLG, in theorie afstanden kunnen afleggen van meerdere kilometers. Op basis van dit model kan het scenario van diepe bevingen niet direct worden bewezen, maar ook niet worden ontkracht.

Op basis van de beschikbare gegevens heeft TNO-AGE de spanningstoestand in de ondergrond bepaald en heeft voor de twee mogelijke scenario's de door aardwarmtewinning opgelegde spanningsveranderingen vergeleken met de natuurlijke. Voor het scenario van bevingen op dieptes van meer dan 2 km onder het reservoir, zou alleen het weglekken van geïnjecteerd koud water naar grote diepte langs doorlatende breuken voor een significante spanningsverandering kunnen zorgen. Deze oorzaak wordt echter niet direct ondersteund door de beschikbare gegevens. Plotselinge productiestops zouden mogelijk voor een kleine spanningsverandering kunnen zorgen op dieptes rond de 6 km. Deze zouden dezelfde ordegrootte kunnen hebben als natuurlijke triggers.

Voor het scenario van bevingen op reservoirniveau zijn de mogelijk opgelegde spanningsveranderingen door aardwarmtewinning significant groter dan natuurlijke triggers. Hierbij wordt de grootste spanningsverandering veroorzaakt door de combinatie van het thermo-elastische effect door de koudwaterinjectie in CAL-GT-03 van CWG in de Tegelenbreuk en koudwaterinjectie in CAL-GT-05 van CLG in een niet gekarteerde breuk, samen met de directe drukdiffusie-effecten na het stilleggen of opstarten van het CLG-doublet. Het effect van poro-elasticiteit is door de lage porositeit en permeabiliteit van de matrix te verwaarlozen.

5.2.4.8 Bevindingen TNO-AGE scenario 1

In het geval van diepe bevingen conform scenario 1, duidt enkel de spatio-temporele correlatie op een mogelijk verband tussen de bevingen en de aardwarmtewinning. De opgelegde spanningsveranderingen door aardwarmtewinning op dieptes rond de 6 km zijn niet significant groter dan de natuurlijke. Hierdoor is het niet eenduidig dat de bevingen direct zijn geïnduceerd door aardwarmtewinning.

*Het antwoord op vraag 4 in de beslisboom (Figuur 12) is daarom **NEE**.*

5.2.4.9 *Bevingingen TNO-AGE scenario 2*

In het geval van ondiepe bevingen conform scenario 2, is de ruimtelijke correlatie sterker en de grootte van de door aardwarmtewinning opgelegde spanningsveranderingen groter dan de natuurlijke. Hierdoor is het waarschijnlijker dat de bevingen zijn geïnduceerd door aardwarmtewinning.

Het antwoord op vraag 4 in de beslisboom (Figuur 12) is daarom JA.

5.3 Conclusie

Het is plausibel dat de bevingen bij Californië gerelateerd zijn aan aardwarmtewinning. Dit wordt met name ondersteund door de spatio-temporele correlatie tussen de bevingen en aardwarmtewinning. De afwezigheid van bevingen (voor zover bij TNO-AGE bekend) na het compleet stilleggen van de winning versterkt deze correlatie.

Door de grote onzekerheid over de haarddieptelocatie van de bevingen is het haardmechanisme niet eenduidig vast te stellen, waardoor ook een natuurlijke oorzaak niet volledig kan worden uitgesloten. Wel is een natuurlijke oorzaak minder waarschijnlijk bij het scenario van ondiepere bevingshaarden. Het gebrek aan een afdoende gedetailleerd ondergrondmodel, gebaseerd op een voldoende dicht netwerk van 2D-seismische lijnen of 3D-seismiek, en door grote onzekerheid over de haardlocatiebepaling van bevingen, maken het onmogelijk om met voldoende zekerheid de bevingen aan (delen van) specifieke gekarteerde dan wel ongekarteerde breuken toe te wijzen.

Referenties

- [1] Californië Lipzig Gielen Geothermie BV, „Aardwarmtewinningsplan CAL-GT-04 & CAL-GT-05. Opgesteld in het kader van het Mijnbouwbesluit in de Mijnbouwregeling,” april 2019.
- [2] Q-con GmbH, „Interpretation of the Earthquakes Near the Californie Geothermal Site: August 2015 – November 2018,” Report no. CLG005 version 190207, 7 februari 2019.
- [3] Q-con GmbH, „Seismic Hazard Assessment for the CLG-Geothermal System – Study Update March 2019,” Report no. CLG006 version 190322, 22 maart 2019.
- [4] TNO-AGE, „Technische evaluatie claim RNES aardwarmte project AARD03001,” Referentie: AGE 18-10.091, 3 december 2018.
- [5] Californië Lipzig Gielen Geothermie BV, „Historische productiedata 2017-2018,” 2020.
- [6] Q-con GmbH, „Data monitoringsstations Californië,” 2020.
- [7] Q-con GmbH & IF Technology B.V., „Defining the Framework for Seismic Hazard Assessment in Geothermal Projects V0.1,” 5 oktober 2016.
- [8] C. L. Gielen, „Addendum Aardwarmte Winningsplan CAL-GT-04 & CAL-GT-05. Opgesteld in het kader van het Mijnbouwbesluit in de Mijnbouwregeling Winningskosten - vertrouwelijk,” 3 mei 2019.
- [9] Kappa, „Well Test Report Geothermal Wells CAL-GT-05 and CAL-GT-04, Well tests February March 2016,” 12 December 2016.
- [10] VITO, „Update reservoir model for Californië Geothermal Wells (Horst a/d Maas, Netherlands),” Report no. 2018/RMA/R/1575, maart 2018.
- [11] VITO, „Execution and interpretation of the Pump Tests on Geothermal Well CAL-GT-01 (S2),” Report for the SEI Application, september 2012.
- [12] VITO, „Het geothermieproject Nieuw Erf / Californië (Horst a/d Maas, Nederland) Geologische rapportage voor de SDE en SEI Garantierregeling,” Rapport nr. 2013/ETE/R/25, 2013.
- [13] SCAN, „Seismic Interpretation and Depth Conversion of the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface,” september 2019.
- [14] DAGO, „SHRA Richtlijn richtinggevende suggesties,” 2018.
- [15] De Crook, „Probabilistic seismic hazard assessment for The Netherlands,” *Geologie en Mijnbouw*, vol. 72, pp. 1-13, 1993.
- [16] KNMI, „KNMI aardbevingscatalogus,” 2019. [Online]. Available: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus>.
- [17] SCAN, „Burial and Structural Analysis of the Dinantian Carbonates in the Dutch Subsurface,” september 2019.
- [18] L. Buijze, L. van Bijsterveldt, H. Cremer, B. Paap, H. Veldkamp, B. Wassing, J.-D. van Wees, G. van Yperen en J. ter Heege, „Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands,” *Netherlands Journal of Geosciences*, vol. 98, pp. 1-27, 2019.

Datum

7 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.037

Blad

54/55

- [19] S. Davis en C. Frohlich, „Did (Or Will) Fluid Injection Cause Earthquakes? - Criteria for a Rational Assessment,” *Seismological Research Letters*, vol. 64, nr. 3-4, pp. 207-224, 1993.
- [20] P. Jousset, „IMAGE-D7.02 Passive seismic at Basement and Sedimentary. Final Report,” IMAGE, 2016.
- [21] Projectgroep GS-ZL, „Na-ijlende gevolgen steenkolenwinning Zuid-Limburg,” december 2016.
- [22] KNMI, „Hypocenter Estimation of Detected Event near Venlo on September 3rd 2018,” Technical report 369, De Bilt, 2018.
- [23] J. Martins, E. Ruigrok, D. Draganov, R. Hanssen, R. White en H. Sooslaui, „Imaging Torfajökull's Magmatic Plumbing System With,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 124, pp. 2920-2940, 2019.
- [24] SCAN, „Stress field characterization in the Dinantian carbonates in the Dutch subsurface,” oktober 2019.
- [25] J. Van Wees, L. Buijze, K. Van Thienen-Visser, M. Nepveu, B. Wassing, B. Orlic en P. Fokker, „Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands,” *Geothermics*, vol. 52, pp. 206-219, 2014.
- [26] K. Hinzen, „Stress field in the Northern Rhine area, Central Europe, from earthquake fault plane solutions,” *Tectonophysics*, vol. 377, pp. 325-356, 2003.
- [27] Californië Lipzig Gielen Geothermie BV, „Koepelnotitie injectiedrukken - CAL-GT-05,” 28 maart 2017.
- [28] A. Nur en Z. Wang, *Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks: Experimental studies*, Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1989.
- [29] TNO, „Geomech_V2,” <https://www.nlog.nl/tools>, Utrecht, 2015.
- [30] W. Levandowski, M. Weingarten en R. Walsh III, „Geomechanical Sensitivities of Injection-Induced Earthquakes,” *Geophysical Research Letters*, vol. 45, p. 8958–8965, 2018.
- [31] S. Shapiro en C. Dinske, „Fluid-induced seismicity: Pressure diffusion and hydraulic fracturing,” *Geophysical Prospecting*, vol. 57, pp. 301-310, 2009.

Datum

7 april 2020

Onze referentie

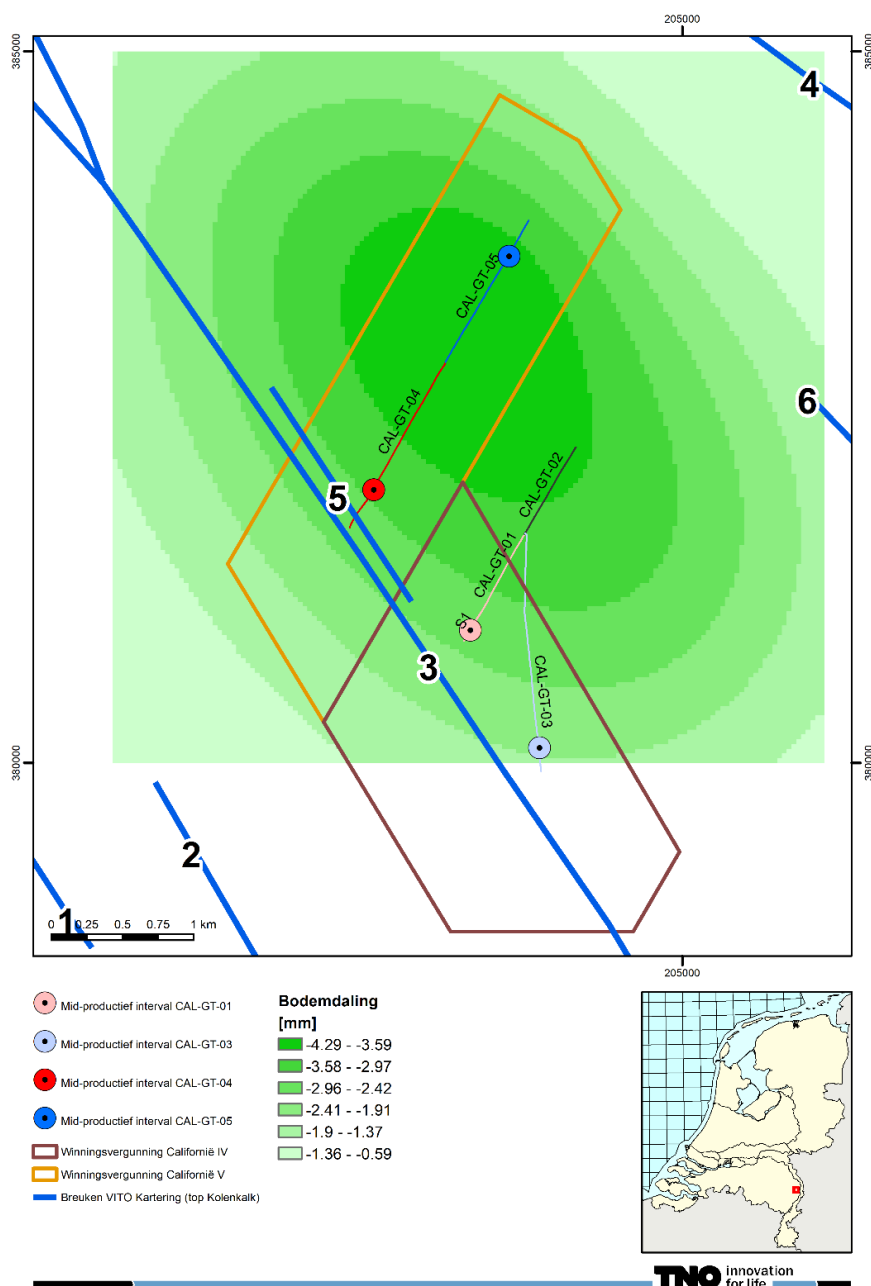
AGE 20-10.037

Blad

55/55

Bijlage 2: Bodemdalingskaart

In deze bijlage wordt het resultaat van de modelberekening van de bodemdaling met DoubletCalc2D gepresenteerd.



Figuur 20: DoubletCalc2D uitvoer van het TNO-AGE scenario op basis van de productieprognose van de vergunninghouder, met de door vergunninghouder gekarteerde breken. De kaart toont de mate van bodemdaling aan het eind van de huidige winningsvergunningsduur in 2052.