

Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat  
Warmte & Ondergrond  
T.a.v. de heer J.H. van Tol  
Postbus 20401  
2500 EK DEN HAAG

**Onderwerp**

Risico's van eventuele seismiciteit bij geothermie

Geachte heer Van Tol,

Naar aanleiding van uw verzoek (email d.d. 11 december 2018) om een overzicht van de voornaamste risico's met betrekking tot seismiciteit, welke mogelijk kunnen optreden bij de exploratie en exploitatie van geothermie, sturen wij u deze rapportage. In de bijlage wordt antwoord gegeven op de vragen, zoals door u gesteld aan TNO.

De gerapporteerde bevindingen dienen enerzijds als input voor beleidsvorming en anderzijds ter ondersteuning van de studie naar de voornaamste veiligheidsrisico's van de energietransitie en hun relatieve omvang, die momenteel wordt uitgevoerd door het Analistennetwerk Nationale Veiligheid (ANV). Deze studie door het ANV heeft als doel om de risico's van nieuwe energiebronnen in kaart te brengen, onderling te vergelijken en te vergelijken met huidige fossiele energiebronnen. De resultaten van de studie door ANV dienen ter ondersteuning van beleidsvragen omtrent de risico's van nieuwe energiebronnen, zoals voorgesteld in het voorlopige Klimaatakkoord.

Met vriendelijke groet,

Drs. J.A.J. Zegwaard  
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken

Bijlage 1 Risico's van eventuele seismiciteit bij geothermie.  
Bijlage 2 Uitgebreide toelichting

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

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

T +31 88 866 42 56

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Contactpersoon**

MSc B.M.M. van Kempen

**E-mail**

[bart.vankempen@tno.nl](mailto:bart.vankempen@tno.nl)

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

Handelsregisternummer 27376655.

**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
2/77

## Bijlage 1

# Risico's van eventuele seismiciteit bij geothermie

## Samenvatting

Deze rapportage beschrijft de voornaamste risico's van seismiciteit, welke mogelijk kunnen optreden bij de exploratie en exploitatie van geothermie in Nederland. De uitwerking van deze risico's is gedaan aan de hand van een aantal vragen, die door het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat aan TNO zijn gesteld. De bevindingen in deze rapportage dienen enerzijds als input voor beleidsvorming en anderzijds ter ondersteuning van de studie naar de voornaamste veiligheidsrisico's van de energietransitie en hun relatieve omvang, momenteel uitgevoerd door het Analistennetwerk Nationale Veiligheid (ANV).

De voornaamste bevindingen uit deze rapportage worden hieronder beknopt samengevat. Ten eerste is gekeken naar de ervaring met seismiciteit bij buitenlandse geothermiesystemen en de mate waarin deze ervaring van toepassing is op de Nederlandse situatie. Daarna wordt ingegaan op de kans op seismiciteit bij de verschillende vormen van geothermie. En vervolgens op de effecten van eventuele seismiciteit. Aansluitend is gekeken naar beschikbare modellen, de mogelijkheid om te komen tot een Hand-aan-de-Kraan voor geothermie en monitoring. Als afsluiting de bevindingen naar aanleiding van een analyse van de huidige methodiek voor de Seismisch Risico Analyse (SRA).

### Internationale analogie

In deze rapportage is een inventarisatie gemaakt van (inter)nationale geothermieprojecten. Deze projecten zijn vervolgens ingedeeld naar type ondergrond (*play type*) om ze op die wijze te kunnen vergelijken met gelijke ondergrondsituaties (*play types*) in Nederland. Voor een geothermische *play type* geldt dat de tektonische setting en geologie grotendeels vergelijkbaar zijn.

De geothermische systemen die momenteel in Nederland zijn gerealiseerd kunnen worden ingedeeld in twee verschillende geothermische *play types*:

- 1) *Conductive Intracratonic Basin play* met matrix gedomineerde stroming. Daarbij is stroming van water mogelijk door relatief hoog permeabel matrixgesteente.
- 2) *Conductive Rift Basin play* met *fracture* gedomineerde stroming. Daarbij is stroming van water mogelijk door breuken en spleten in het gesteente.

Uit de inventarisatie van internationale geothermieprojecten blijkt dat er drie sedimentaire bekkens zijn waarvan het *play type* een geschikte analoog vormt voor de Nederlandse *play types*. Het Noord-Duitse en Noors-Deense Bekken vormen een goede analoog voor de systemen met matrix gedomineerde stroming (Conductive Intracratonic play). Bij de projecten in deze twee bekkens is tot op heden geen seismiciteit ( $M > 2$ ) waargenomen. Ook bij Nederlandse systemen met matrix gedomineerde stroming zijn tot op heden geen bevingen ( $M > 1,5$ ) geregistreerd.

Het Molasse Bekken (ten noorden van de Alpen in Zwitserland, Duitsland en Oostenrijk, zie Figuur 12 in Bijlage 2A) is op bepaalde vlakken een redelijke analoog voor de systemen in Nederland met *fracture* gedomineerde stroming, maar kent ook verschillen. Bij 3 van de 27 projecten in het Molasse Bekken is seismiciteit waargenomen. De maximale magnitude van waargenomen bevingen bij deze drie projecten varieert van 2,1 tot 3,5.

In het verleden zijn enkele substantiële bevingen opgetreden bij geothermische systemen in andere dan de bovengenoemde drie sedimentaire bekkens, maar dit zijn Enhanced/Engineered Geothermal Systems (EGS) of systemen waarbij de operationele condities niet vergelijkbaar zijn met die toegepast in Nederland. EGS systemen zijn momenteel niet gerealiseerd in Nederland en dit wordt ook niet voorzien in de nabije toekomst.

### **Kans op seismiciteit**

Voor geothermie wordt vooralsnog een magnitude 3,5 aangenomen als grenswaarde voor het mogelijk optreden van schadecategorie DS2 volgens de EMS-98 Europese Macroseismische Schaal. In deze rapportage wordt een grenswaarde van  $M=3,5$  als substantieel beschouwd.

De kans op het optreden van seismiciteit met  $M>3,5$  is waarschijnlijk zeer gering voor de reservoirs met matrix gedomineerde stroming zonder kritisch voorgespannen breuken. Dit wordt ondersteund door de beschikbare kennis m.b.t. de mechanismen die leiden tot spanningsveranderingen op breuken en de afwezigheid van waargenomen bevingen bij vergelijkbare projecten.

Bij ondiepe vormen van geothermie en warmte-opslag (tot ca. 1500 meter diepte), zoals Hoge Temperatuur Opslag (HTO), Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) of Warmte-Koude Opslag (WKO), is de kans op het optreden van waarneembare seismiciteit zelfs nog kleiner.

De Roerdalslenk in het zuidoosten van Nederland is een van nature seismisch actief gebied waarin breuken mogelijk kritisch voorgespannen zijn (spanning op breuken door natuurlijke seismische activiteit). Hierdoor is de kans op het optreden van (getriggerde) seismiciteit door geothermische operaties in dit gebied groter dan in de rest van Nederland, waar de kans veel geringer is dat breuken kritisch voorgespannen zijn.

In het geval van de reservoirs met *fracture* gedomineerde stroming in gebieden met kritisch voorgespannen breuken, zoals bijvoorbeeld in de Roerdalslenk, kan niet worden uitgesloten dat substantiële seismiciteit met mogelijk magnitudes  $>3,5$  optreedt. De kans op een dergelijke beving kan op dit moment namelijk nog niet met voldoende zekerheid worden gekwantificeerd.

De kans op substantiële seismiciteit is groter voor EGS systemen, waarbij op grote schaal reservoirstimulatie nodig is. Dit blijkt ook uit internationale ervaringen met seismiciteit bij dit type installaties. In Nederland wordt deze vorm van geothermie niet voorzien in de nabije toekomst.

### **Effecten**

Uitgaande van een vergelijkbare ondergrondse gesteldheid (toelichting in Bijlage 2B), is de kans op een aardbeving met magnitude  $M>3,5$ , en de maximale magnitude van een beving die eventueel zou kunnen optreden bij een geothermisch doublet, zeer klein vergeleken met gaswinning uit het Groningen veld.

De omvang van eventuele seismiciteit en het gebied waarin seismiciteit kan optreden is bij geothermie (behalve de *fracture* gedomineerde reservoirs in de Roerdalslenk) waarschijnlijk kleiner dan bij gaswinning. Echter, de effecten van een

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

5/77

beving aan het oppervlak zullen bij geothermie waarschijnlijk overeenkomstig zijn als bij gaswinning, bij bevingen van vergelijkbare magnitude en diepte.

De eigenschappen van de lokale ondiepe ondergrond bepalen in sterke mate het effect van bevingen aan het oppervlak. Een *site response* kaart kan worden gebruikt om een adequate inschatting te maken van de te verwachten effecten aan het oppervlak. De huidige *site response kaart* concentreert zich met name op de gebieden waarin gaswinning plaatsvindt. Omdat geothermie ook in gebieden daarbuiten kan worden ontwikkeld is een uitbreiding en actualisatie van de huidige *site response* kaart nodig. Hierbij kan mogelijk gebruik worden gemaakt van de methodiek die ten grondslag ligt aan de regionale *site response* kaart voor de provincie Groningen, opgesteld door Deltares.

## Modellen

Voor reservoirs met matrix gedomineerde stroming kan gebruik gemaakt worden van de fysische modelaanpakken en conceptuele modellen, welke zijn ontwikkeld voor gaswinning, indien deze worden uitgebreid met thermische effecten. Daarbij is het noodzakelijk om de modelvoorspelling te valideren, bijvoorbeeld met metingen bij doubletten die in productie zijn.

Er zijn veel internationale modelstudies gedaan naar aardbevingsrisico's van geothermieprojecten in *fracture* gedomineerde reservoirs. Deze studies zijn voornamelijk gericht op EGS systemen. Het is mogelijk om deze modellen te vertalen naar de Nederlandse situatie.

Er hebben zich nauwelijks bevingen voorgedaan, die zijn geassocieerd met geothermie: niet in vergelijkbare analogen in het buitenland, noch in Nederland (zie boven). Dit betekent dat er onvoldoende gegevens over seismiciteit bij geothermie beschikbaar zijn om de modellen te valideren of om grenswaarden te bepalen voor een Hand-aan-de-Kraan. Het ligt ook niet in de verwachting, dat dit in de nabije toekomst zal veranderen. Het is daarom de vraag of dergelijke beheers- en controlesystemen voor geothermie in Nederland op een zinvolle manier kunnen worden opgetuigd. Dit vergroot het belang van een adequate, eenduidige en praktisch uitvoerbare SRA methodiek.

## Monitoring

De vorm van monitoring, die kan leiden tot beter begrip van eventuele seismiciteit, is afhankelijk van het doel.

Seismische monitoring van de ondergrond richt zich op het mitigeren van het risico van met name hoge magnitude bevingen die voelbaar zijn en tot materiële schade kunnen leiden. Voor het uitvoeren van geothermieprojecten op lokale schaal is het van belang dat ook zwakkere bevingen kunnen worden gedetecteerd, omdat deze vaak een voorbode kunnen zijn op het voorkomen van een zwaardere beving. Het landelijke monitoringnetwerk is op de meeste plekken te schaars bedekt om zwakke bevingen waar te kunnen nemen. Daarom is vaak een verdichting nodig om de gewenste netwerkgevoeligheid te bereiken en om de locatie van de bevingen met voldoende nauwkeurigheid te kunnen bepalen. Hierbij is het uitvoeren van *baseline monitoring* voorafgaand aan aardwarmtewinning van belang om een afdoende beeld van de omgevingsruis en mogelijke natuurlijke seismiciteit te verkrijgen. Zo

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

6/77

kan het mogelijk voorkomen van seismiciteit tijdens de productiefase eerlijk vergeleken worden met referentiemetingen uit de baselinefase. Vervolgens kan in een Traffic Light System (TLS) gedefinieerd worden bij welke grenswaarden van seismiciteit (meestal gedefinieerd door de seismische piek trillingssnelheid en de magnitude) er tot een bepaalde wijziging van het productieplan moet worden overgegaan. Wanneer grenswaarden conservatief worden opgelegd in een verkeerslichtsysteem, zal er bij het optreden van relatief zwakke bevingen al direct worden overgegaan tot een wijziging in het productieplan, waarmee de kans op het voorkomen van zwaardere bevingen wordt verkleind en overlast op de omgeving wordt beperkt. Dit kan weer ten goede komen aan de publieke acceptatie van geothermie. Aan de andere kant kan een conservatief ingesteld verkeerslichtsysteem op korte termijn een remmende werking hebben op het commerciële succes van een specifiek geothermieproject.

### **Seismisch Risico Analyse**

Op basis van een analyse van de huidige methodiek voor de SRA, in combinatie met bovenstaande overwegingen, constateert TNO-AGE het volgende. Ten eerste is de huidige methodiek een goede, eerste stap. Ten tweede is doorontwikkeling van de SRA-methodiek wenselijk met het oog op de huidige ontwikkelingen omtrent geothermie. In het rapport worden daartoe een aantal suggesties gegeven. TNO-AGE beveelt aan om elke nieuwe ontwikkelstap van de SRA-methodiek te toetsen op eenduidigheid, ondubbelzinnigheid en praktische uitvoerbaarheid.

**1. Wat is er bekend over het optreden van seismiciteit bij de verschillende vormen van geothermie in binnen- en buitenland?**

- a) *Wat is er bekend over geïnduceerde seismiciteit? (door de activiteit zelf veroorzaakt)*
- b) *Wat is er bekend over getriggerde seismiciteit? (de activiteit geeft de laatste zet en bestaande spanningen op een naburige breuk worden getriggerd)*
- c) *In hoeverre zijn buitenlandse voorbeelden van opgetreden seismiciteit bij geothermie vergelijkbaar met de Nederlandse situatie?*
- d) *Welke omvang van seismiciteit kan optreden?*

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat er bekend is over het optreden van seismiciteit bij de verschillende vormen van geothermie in binnen- en buitenland. Deze vraag is verder onderverdeeld in de hierboven beschreven vier subvragen. De eerste twee subvragen (a & b) gaan over seismiciteit die is waargenomen bij geothermieprojecten. Om hier een duidelijk antwoord op te geven is het belangrijk om het verschil tussen geïnduceerde en getriggerde seismiciteit te duiden. Daarna wordt een zo volledig mogelijk overzicht gegeven van, in de literatuur goed beschreven, bekende voorbeelden van opgetreden seismiciteit bij geothermieprojecten die relevant zijn voor Nederland.

Op basis van het artikel van Moeck (2014) is een geothermische *play type* database opgezet. Het is hierdoor mogelijk om de verschillende geothermieprojecten met elkaar te vergelijken en uitspraken te doen over het optreden van seismiciteit bij geothermieprojecten die vergelijkbaar zijn met de Nederlandse situatie (subvraag c). De laatste subvraag (d) overlapt met vraag 2 en zal daarom in Hoofdstuk 2 behandeld worden.

## 1.1 Wat is er bekend over geïnduceerde en getriggerde seismiciteit?

### 1.1.1 Definitie van seismiciteit in dit hoofdstuk

De magnitude ( $M$ ) van aardbevingen (seismiciteit) wordt over het algemeen weergegeven door de magnitudeschaal van Richter, ook wel lokale magnitude ( $M_L$ ) genoemd. Een andere magnitudeschaal die vaak gebruikt wordt is de momentmagnitude ( $M_w$ ). In tegenstelling tot de lokale magnitude kan deze ook gebruikt worden voor bevingen met een hoge magnitude.

Nederland heeft een uitgebreid netwerk van seismometers om de seismiciteit in en rondom Nederland te meten. Dit netwerk is zodanig dat voor de meeste regio's aardbevingen met  $M_L > 1,5$  gedetecteerd kunnen worden. Dit wordt de *magnitude of completeness* ( $M_c$ ) genoemd, ofwel de minimale magnitude waarboven alle aardbevingen binnen een bepaald gebied betrouwbaar worden geregistreerd. Echter dat wil nog niet zeggen dat de locatie (epicentrum, hypocentrum) goed kan worden bepaald. Alleen het zuidwestelijke deel van Nederland (de provincie Zeeland) is een uitzondering met een *magnitude of completeness* van  $M_c > 2$  (TNO, 2019). Dit betekent dat seismiciteit in deze studie gedefinieerd is als  $M > 2,0$ .

Deze drempelwaarde is daarnaast ook een praktische keuze omdat in het buitenland de regionale seismische monitoringsnetwerken vaak niet gevoeliger zijn dan  $M_2$  of  $M_3$ . Hoewel de drempelwaarde van  $M_2$  voor veel regio's over de hele wereld als laag kan worden beschouwd, is gebleken dat frequente gebeurtenissen met  $M < 2$  problematisch gebleken zijn voor de continuïteit van ondergrondse operaties in Nederland (van Thienen-Visser & Breunese, 2015). Daarom zal in dit hoofdstuk seismiciteit in Nederland met een kleinere magnitude ( $M < 2$ ) ook vermeld worden.

In dit overzicht zal de term seismisch potentieel gebruikt worden om aan te geven wat de waarschijnlijkheid is van het voorkomen van seismiciteit. Het seismisch potentieel van een geothermiesysteem is gebaseerd op de analyse van verschillende mechanismen en relevante geothermiesystemen in het buitenland.

### 1.1.2 Geïnduceerde seismiciteit

Geïnduceerde seismiciteit verwijst naar het optreden van aardbevingen die worden veroorzaakt door menselijke ondergrondse activiteiten. Het wordt onderscheiden van aardbevingen veroorzaakt door natuurlijke (tektonische) processen, die vaak worden aangeduid als natuurlijke seismiciteit of tektonische seismiciteit (Giardini et al., 1999; TNO, 2019).

Geïnduceerde seismiciteit heeft in Nederland bijzondere aandacht vanwege het frequent voorkomen van seismiciteit geassocieerd met de winning van gas, in het bijzonder in het Groningen gasveld. Het hoofdmechanisme dat verantwoordelijk is voor deze vorm van geïnduceerde seismiciteit is de differentiële compactie van poreuze zandsteenreservoirs veroorzaakt door drukverlaging door het winnen van gas. Dit mechanisme speelt echter geen rol bij geothermische projecten. Daar is het mechanisme dat verantwoordelijk is voor eventuele geïnduceerde seismiciteit een combinatie van de volgende effecten:



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

9/77

- **Direct druk effect:** Bij de productie en injectie van water kunnen plaatselijke druk veranderingen in het reservoir de effectieve normaal spanning op breuken beïnvloeden.
- **Poro-elastisch effect:** Productie en injectie van water kunnen plaatselijke vloeistofvolume-veranderingen veroorzaken in het reservoir, dit kan drukverandering en elastische vervorming van het reservoir veroorzaken. Dit kan de spanningstoestand van breuken beïnvloeden en mogelijk leiden tot de heractivering en beweging van breuken.
- **Thermo-elastisch effect:** Bij de winning van aardwarmte neemt de temperatuur van het reservoir af. Afkoeling van het reservoir resulteert in elastische vervorming (contractie) van het reservoir en hierdoor kan de spanningstoestand van een breuk veranderen.

### 1.1.3 Getriggerde seismiciteit

Getriggerde seismiciteit kan worden gezien als een effect waarin menselijke activiteiten het optreden van natuurlijke seismiciteit beïnvloeden. In dit geval kunnen getriggerde bevingen alleen optreden als de natuurlijke spanningen op de aanwezige breuken hoog zijn. En wel zo hoog dat een beving, die begint bij een breuk in het reservoir, de breuk in omliggende gesteentelagen ook in beweging kan brengen. Als dit gebeurt, komt een groter breukoppervlak in beweging tijdens een beving en dat leidt tot een sterkere beving (KNMI & TNO, 2017) dan wanneer de beving qua locatie zich enkel zou beperken tot het reservoir. Of wel het triggeren van seismiciteit is het naar voren (in tijd) halen van een natuurlijke beving.

Het verschil met geïnduceerde seismiciteit zit voornamelijk in de spanningstoestand van breuken voorafgaand aan de ondergrondse activiteiten en de veranderingen in die spanningstoestand veroorzaakt door die activiteiten (Candela et al., 2018). Bij geïnduceerde seismiciteit beïnvloeden menselijke activiteiten in de ondergrond de spanningstoestand van breuken op een zodanige manier dat ze kritisch gespannen worden en daardoor seismisch actief worden. In het geval van getriggerde seismiciteit is slechts een kleine verstoring van de spanningstoestand van reeds kritisch gespannen breuken genoeg om breukactivering en seismische slip te veroorzaken. Het is in de praktijk lastig om geïnduceerde seismiciteit te onderscheiden van natuurlijke (tektonische) of getriggerde seismiciteit, aangezien de analyse van de natuurlijke spanningstoestand van breuken een hoge mate van onzekerheid kent.

Voor de inventarisatie van seismiciteit bij geothermieprojecten in dit hoofdstuk, zal vanwege de complexiteit en onzekerheid van het bestaande spanningsveld, geen onderscheid gemaakt worden tussen geïnduceerde en getriggerde seismiciteit. Daarom zal er gesproken worden over seismiciteit in plaats van geïnduceerde of getriggerde seismiciteit.

### 1.1.4 Tektonische seismiciteit in Nederland

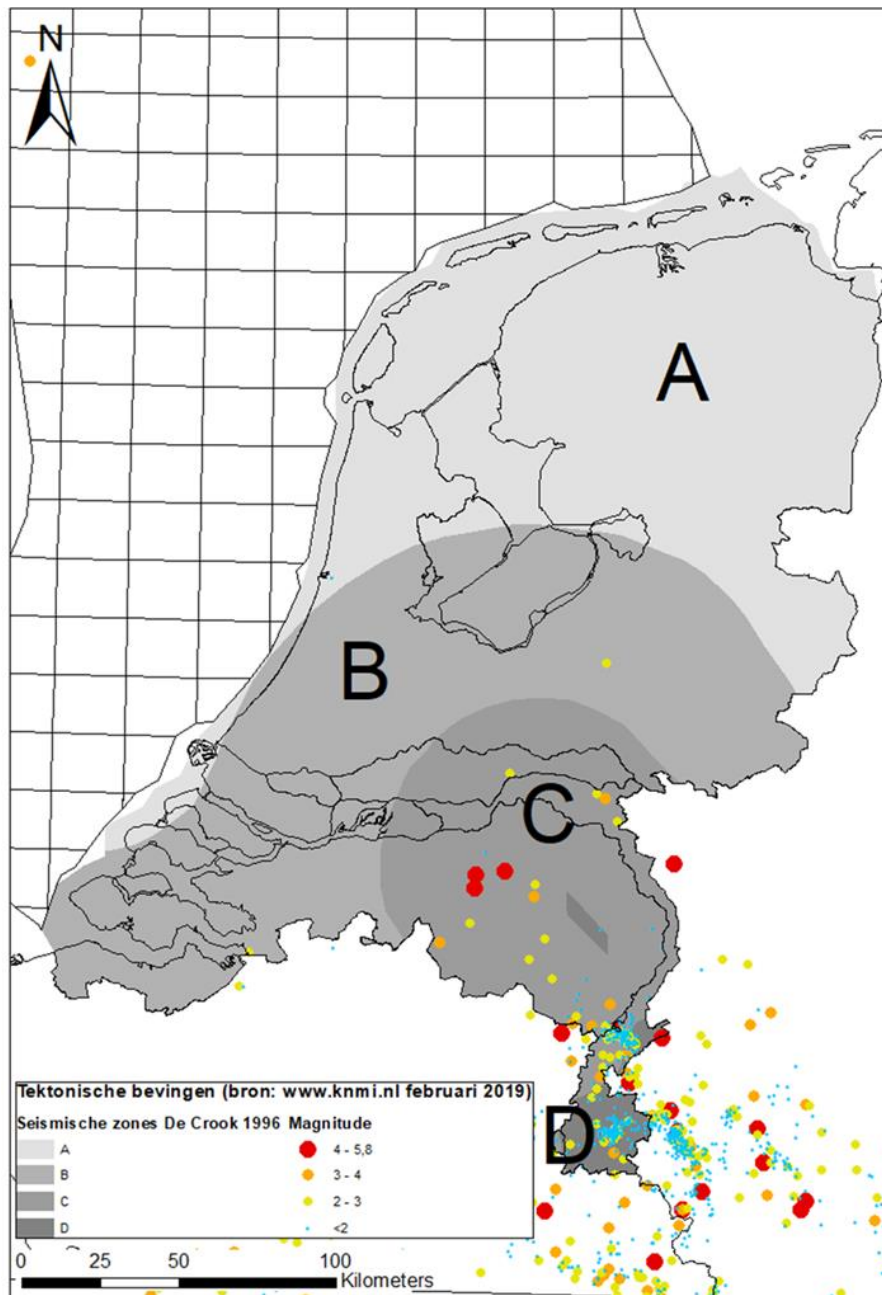
Nederland ligt ten noordwesten van het Europees Cenozoïsch Rift Systeem. Dit systeem bestaat uit verschillende aftakkingen zoals de Boven-Rijnslenk en Roerdalslenk in Nederland. In Nederland zijn de grootste breuken uit het Cenozoïcum de grensbreuken van de Roerdalslenk, de Peelrandbreuk en de

**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
10/77

Feldbissbreuk. Tektonische aardbevingen zijn voornamelijk waargenomen in het zuidoosten van Nederland en de tektonische seismiciteit neemt af naar het noordwesten (Houtgast, 1991). De sterkste tektonische bevingen vonden plaats bij Uden in 1932 ( $M_L = 5,0$ ) en bij Roermond in 1992 ( $M_L = 5,8$ ). Van alle overige tektonische aardbevingen was de magnitude kleiner dan 4,5 (de Crook, 1996).



Figuur 1: Indeling van Nederland naar zones van seismische activiteit op basis van kans op het overschrijden van bepaalde horizontale piek grondversnellingen. Deze versnellingen zijn respectievelijk 0,01, 0,02, 0,05 en 0,10 g voor zones A, B, C en D (bron: de Crook, 1996 en TNO, 2014). De punten op de kaart geven de magnitude en ligging weer van waargenomen natuurlijke aardbevingen (bron: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl), registratie t/m 18 januari 2018).

Figuur 1 laat zien hoe Nederland ingedeeld kan worden in zones van natuurlijke seismische activiteit op basis van de kans op het overschrijden van bepaalde horizontale piek grondversnellingen (de Crook 1996; TNO, 2014). De punten op de kaart geven de ligging en magnitude van geregistreerde tektonische aardbevingen weer. De grenzen van de zones zijn met enige onzekerheid omgeven vanwege de beperkte hoeveelheid datapunten (buiten het zuiden van Limburg).

In Zone A zijn geen natuurlijke bevingen geregistreerd in de laatste 100 jaar. Er zijn slechts enkele bevingen geregistreerd in Zone B. De geïdentificeerde breuken in deze zone hebben geen merkbaar verzet (verschuiving van de breuk in meter) aan het maaiveld, maar een aantal breuken hebben wel een verzet binnen de Vroeg-Tertiaire en Pleistocene eenheden.

Zone C wordt gekenmerkt door een gebied dat tot op heden seismisch actief is. In deze zone liggen breuken die verzet tonen tot in Tertiaire en Pleistocene eenheden en enkele zelfs tot aan het maaiveld.

Zone D wordt gedefinieerd in het zuiden van Limburg en wordt gekenmerkt door breuken die merkbaar verzet hebben aan maaiveld. Zone D is het deel van Nederland waar de meeste natuurlijke (tektonische) bevingen voorkomen. Gezien de seismiteit en het regionale spanningsveld in dit gebied kan gesteld worden dat er al een zekere mate van spanning op de bestaande breuken staat waardoor deze breuken sneller de neiging hebben tot bewegen dan breuken in andere delen van Nederland. In de Zones A en B is de kans veel geringer op het bestaan van een kritisch voorgespannen breuk, die mogelijk getriggerde seismiteit kan veroorzaken, dan in Zone D.

### 1.1.5 Seismiciteit bij geothermieprojecten

In dit deel wordt een overzicht gegeven van geothermieprojecten waar seismiciteit is waargenomen, ook worden projecten vermeld waar geen seismiciteit is gemeten.

Voor elk project wordt het systeem, de operationele parameters en waargenomen seismiciteit, of juist de afwezigheid daarvan beschreven. Om deze stap te maken, is het nodig om de geothermische projecten te categoriseren in *play types*, waarbij geologie een belangrijke rol speelt. Binnen een geothermisch *play type* zijn de tektonische setting en geologie grotendeels vergelijkbaar. Hierdoor wordt het eenvoudiger om systemen met hetzelfde *play type* onderling met elkaar te vergelijken. Een geothermisch systeem (of project) ligt binnen een geothermische *play* en bestaat uit alle onder- en bovengrondse installaties. Binnen een geothermische *play* kunnen meerdere geothermische systemen ontwikkeld worden.

#### 1.1.5.1 Geothermische plays

De geothermische *plays* in Tabel 1 zijn gebaseerd op de classificatie van Moeck (2014). Deze classificatie gebruikt de invloed van de geologie op het thermische regime, de warmtestromen en de hydrogeologie. Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen convectie respectievelijk conductie gedomineerde mechanismen van warmteoverdracht in een structureel geologische context.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

12/77

Tabel 1: Geothermische *play* indeling gebaseerd op de classificatie van Moeck (2014). Groen: *play types* van huidige gerealiseerde geothermische systemen in Nederland.

Play type	Plate tectonic setting	Sub type	Play code	Perm type
Conductive play (CD)	Intracratonic type (CD1)	Intracratonic (/ sag?) basin	CD1_I	Matrix
				Fracture
		Rift basin	CD1_R	Matrix
				Fracture
	Orogenic Belt (CD2)	Passive margin	CD1_P	Matrix
				Fracture
		Fold & Thrust belt	CD2_FT	Matrix
				Fracture
	Basement type (CD3)	Foreland basin	CD_FB	Matrix
				Fracture
Intrusion in flat terrain		CD3_P		
Convective Play (CV)	Volcanic type (CV1)	Magmatic arc	CV1_MA	
		Mid oceanic ridges	CV1_MO	
		Hot spots	CV1_HS	
	Plutonic type (CV2)	Young orogens	CV2_YO	
		Post-orogenic phase	CV2_PO	
	Extensional domain type (CV3)	Metamorphic core complexes	CV3_MC	
		Back arc extension	CV3_BA	
		Pull apart basins	CV3_PA	
		Intracontinental rifts	CV3_IR	

Convectie gedomineerde *play types* (CV) liggen vaak in gebieden gekenmerkt door een hoge temperatuurgradiënt, waar actieve plaattektonische processen optreden of waar actief magmatisme of vulkanisme optreedt. Deze actieve tektonische gebieden worden gekenmerkt doordat er veel natuurlijke seismiciteit voorkomt. In convectie gedomineerde *play types* spelen breuken en verbreekt gesteente een grote rol in de vloeistofstroming en convectieve warmtestroming. Putconfiguraties in deze *plays* zijn vaak gebaseerd op een *single producing well* of op meerdere productie- en injectieputten, die gebruikt worden voor zowel elektriciteitsopwekking als stadsverwarming. Voorbeelden hiervan zijn o.a. te vinden in IJsland en Italië.

Conductie gedomineerde *play types* (CD) zijn vooral te vinden in gebieden waar het tektonisch rustig is, *passive plate tectonic settings*. In deze gebieden komt minder

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

13/77

natuurlijke seismiciteit voor dan in gebieden waar actieve plaattektonische processen een rol spelen. De temperatuurgradiënt in conductie gedomineerde systemen is normaal en wordt beïnvloed door conductie. Hierbij zijn putconfiguraties vaak in de vorm van een circulatie systemen bijvoorbeeld een doublet, bestaande uit twee of meer putten om warm water te produceren en afgekoeld water opnieuw te injecteren. Voorbeelden hiervan zijn o.a. te vinden in Nederland, Duitsland en Frankrijk.

In Moeck (2014) wordt binnen beide *play types* (*convective* en *conductive*) een verdere indeling in hoofdgroepen en subtypes gemaakt, zie Tabel 1. Het subtype is beschrijvend voor de geologische regio waarin het geothermische systeem zich bevindt.

In deze studie wordt, binnen de *Conductive play*, een verdere indeling gemaakt op basis van stromingsregimes binnen het geothermisch reservoir (zie kolom "perm type" in Tabel 1). Vloeistoffen kunnen op twee manieren door een gesteente stromen. Het eerste regime is stroming door de matrix van het gesteente en wordt de stroming gedomineerd door de matrix permeabiliteit. Het tweede type stroming is door breuken in het gesteente, waarbij de mate van stroming afhankelijk is van de *fracture* permeabiliteit. Deze twee stromingsregimes kunnen worden gezien als twee uitersten. In de realiteit worden gesteentereservoirs vaak gekenmerkt door een combinatie van beide regimes omdat breuken veelvuldig voorkomen in de Nederlandse ondergrond en omdat de meeste gesteentelagen tenminste enige mate van matrixpermeabiliteit hebben.

#### *1.1.5.2 Voorbeelden geothermische plays*

Tabel 2 geeft een overzicht van alle geothermische gebieden die in dit document en in TNO (2019) worden beschreven. Hieruit blijkt dat er drie *case studies* zijn die het meest relevant zijn voor Nederland. Dit zijn het Noord-Duitse Bekken, het Noors-Deense Bekken en het Molasse Bekken. De algemene bevindingen van deze drie bekkens worden in Bijlage 2A beschreven. Voor een beschrijving van de overige *case studies* wordt verwezen naar TNO (2019).

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

14/77

Tabel 2: Overzicht van alle geothermische *plays* die behandeld zijn in dit rapport en in TNO (2019). 1: *play type* gebaseerd op Moeck (2014), zie tabel 1. 2: CIR = circulatie (zonder stimulatie), ZB = Zuurbehandeling, HS = hydraulische stimulatie. (bron: aangepast uit TNO (2019). Donkerblauw: Nederlandse CD1\_I\_matrix *play*, en lichtblauw: buitenlandse bekkens die vallen onder de CD1\_I\_matrix *play*. Donkergroen: Nederlandse CD1\_R\_fracture *play*, en lichtgroen: buitenlandse analogen voor Nederlandse CD1\_R\_fracture *play*. Oranje en grijs: overige buitenlandse geothermische gebieden.

Geothermisch gebied / Bekken	Play Type <sup>1</sup>	Perm. type	Temp	Gesteente	Diepte [km]	Stimulatie <sup>2</sup>	# systemen	# systemen met M > 2.0 (Mmax)
<b>Nederland (overig)</b>	CD1_I	Matrix	Laag	zandsteen	1.5 – 2.5	CIR	verwarming kassen (11)	Niet gerapporteerd
<b>Noord-Duits Bekken</b>	CD1_I	Matrix	Laag	zandsteen	2 – 4	CIR, CS, some HF	warmtenet (3), onderzoek (3)	Niet gerapporteerd
<b>Noors-Deens Bekken</b>	CD1_I	Matrix	Laag	zandsteen	1 – 3	CIR	2	Niet gerapporteerd
<b>Parijs Bekken<sup>1</sup></b>	CD1_I	Matrix	Laag	carbonaat	1.5 – 2.5	CIR, some CS	35	Niet gerapporteerd
<b>Roerdalslenk (Nederland)</b>	CD1_R	Fracture, karst	Laag	carbonaat, zandsteen	2 – 3	CIR	verwarming kassen (2)	2 (M <sub>1</sub> 1.7) <sup>2</sup> (in onderzoek)
<b>Molasse Bekken</b>	CD2_FB	Fracture, karst	Laag	carbonaat	2 – 3	CIR, some CS	27	3 (M <sub>1</sub> 3.5)
<b>Pohang Basin*</b>	CD3		Medium	granodioriet	4 – 4.5	HS	1	1 (M 5.4)
<b>Cooper Basin*</b>	CD3		Hoog	graniet	4 – 5	HS	2	2 (M <sub>1</sub> 3.7)
<b>Iceland Volcanic Zones*</b>	CV1		Hoog	vulkanisch	1 - 2	CIR, some HS	vulkanische velden (9)	3 (M 4.0)
<b>Taupo Volcanic Zone*</b>	CV1		Hoog	vulkanisch	1 – 2	CIR	vulkanische velden (19)	4 (M <sub>1</sub> 3.5)
<b>Geysers*</b>	CV2		Hoog	metamorf, overig	< 2.5	none, HS	1 veld	1 (M 4.6)
<b>Tuscan-Lazio*</b>	CV2		Hoog	carbonaat	< 2.5	CIR, some HS	vulkanische velden (5)	3 (M 3.2)
<b>Boven-Rijn slenk*</b>	CV3_IR	Fracture	Hoog	graniet, zandsteen	2 – 5	CIR, HS, CS	8	5 (M <sub>1</sub> 3.4)
<b>Great Basin*</b>	CV3		Hoog	carbonaat	1 - 2	CIR, HS	geothermische velden (>25)	1 (M <sub>w</sub> 2.2)
<b>Salton Sea*</b>	CV3		Hoog	zandsteen, overig	1 – 2.5	some HS	vulkanische veld (1)	1 (M <sub>w</sub> 5.1)

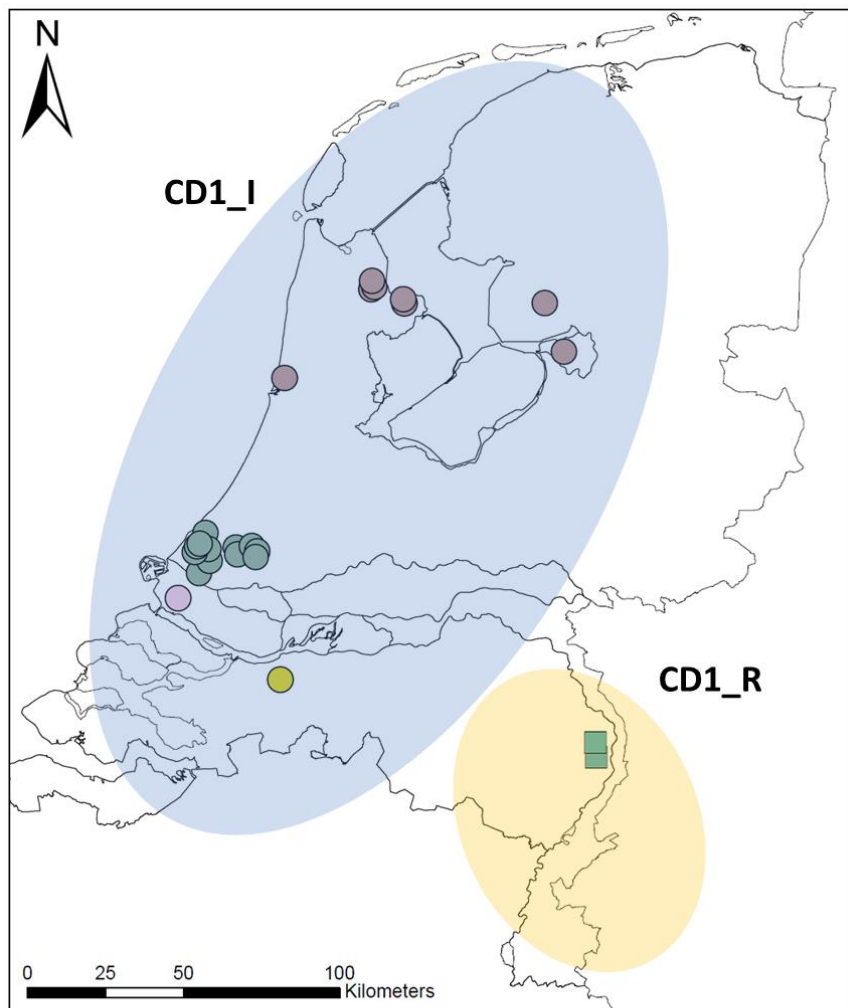
<sup>1</sup> Wordt beschreven in TNO, 2019.

<sup>2</sup> Bevingen geregistreerd door lokaal monitoringnetwerk; M<2.0, maar wel voelbaar.

**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
15/77



- |  |  |   |
|--|--|---|
|  Onder-Noordzee Groep, Matrix |  Trias, Matrix      |  Onder Carboon, Fracture/Karst |
|  Jura-Krijt, Matrix           |  Rotliegend, Matrix |   |

Figuur 2: Overzichtsk kaart van de locaties van momenteel gerealiseerde geothermie-systemen in Nederland. De kleur van de symbolen geeft het doelreservoir, de vorm van de symbolen geeft het stromingsconcept en de gekleurde ovalen geven aan binnen welke *play type* categorie de gerealiseerde systemen vallen.

### 1.1.5.3 Geothermische *play types* in Nederland

In Nederland werd het eerste geothermie doublet in 2007 gerealiseerd en in 2008 in productie genomen. Op 1 januari 2019 zijn 24 doubletten (exclusief Heerlen Mijwater) gerealiseerd (Figuur 2). Hiervan zijn 13 doubletten actief en 7 doubletten in de opstartfase. De warmte wordt geproduceerd uit laagpakketten van verschillende geologische eenheden op diepten tussen de 1600 en 2800 meter. Het merendeel van de aardwarmte komt uit de laagpakketten van de Boven-Jura en Onder-Krijt. Dit geldt voor alle installaties, behalve één, die gesitueerd zijn in Zuid-Holland. Die uitzondering produceert uit de aquifers van Trias ouderdom. De vijf productie-installaties in Noord-Holland en Overijssel produceren uit de laagpakketten van het Rotliegend. De twee installaties in Noord-Limburg produceren uit de laagpakketten van het Onder-Carboon tot Devoon.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

16/77

Momenteel worden meerdere doubletten ontwikkeld in de laagpakketten van het Rotliegend, Boven-Jura/Onder-Krijt en Tertiair (Brussel Zandsteen Formatie). De geproduceerde warmte wordt bij alle installaties primair ingezet voor de verwarming van kassen in de glastuinbouw. Eén project levert ook warmte aan een nutsvoorziening en bebouwde omgeving. Eén ander project beoogt warmte te gaan leveren aan een warmtenetwerk in de bebouwde omgeving.

Op dit moment worden alle bestaande geothermische systemen in Nederland ingedeeld in het *Conductive play type*. De meeste systemen bestaan uit twee putten, hoewel sommige systemen met meerdere productie- of injectieputten werken. Al deze geothermische systemen produceren zonder stimulatie (fracking) van het reservoirgesteente. De geothermiesystemen in Nederland worden standaard schoongespoeld en in sommige gevallen licht aangezuurd. Twee geothermieprojecten hebben een zuurbehandeling/*acid job* ondergaan.

In Nederland produceert het overgrote deel van de geothermische systemen uit poreuze zandsteenlagen van Krijt/Jura tot Perm ouderdom. Watercirculatie wordt mogelijk gemaakt door een relatief hoge matrixpermeabiliteit van het gesteente. Deze systemen worden ingedeeld in het **Conductive Intracratonic basin – Matrix** (CD1\_I\_Matrix) *play type*. Er is geen seismiteit gemeten bij deze systemen.

#### 1.1.5.4 Geothermie in Noord-Limburg

Twee systemen in Noord-Limburg liggen nabij de Roerdalslenk (*Roer Valley Graben*). Het reservoir bestaat uit gekarstificeerde en verbreukte kalksteenlagen van Dinantien ouderdom en mogelijk verbreukt siliciklastisch gesteente van Devoon ouderdom. Deze twee systemen verschillen met de andere geothermische systemen in Nederland, vanwege de ligging in de Roerdalslenk, het type reservoirgesteente en permeabiliteitstype. Op basis hiervan kunnen deze systemen ingedeeld worden in het **Conductive Rift basin – Fracture** (CD1\_R\_Fracture) *play type*.

Op dit moment ligt de productie van beide systemen in Noord-Limburg stil. Eén van deze systemen produceerde, gedurende ca. 5 jaar, vlakbij een seismisch actieve breuk (Tegelenbreuk). Tijdens deze productieperiode is bij dit systeem geen seismiteit gemeten. Onder strenge voorwaarden mocht de uitvoerder tijdelijk geproduceerd formatiewater herinjecteren via een voormalige tweede productieput die zich dichtbij de breukzone bevindt. De uitvoerder heeft in deze periode de gelegenheid gekregen om de originele injectieput weer in werking te krijgen, maar is daar niet in geslaagd. Om die reden is de tijdelijke winningsvergunning verlopen en de productie van warm water gestaakt.

Het tweede doublet in Noord-Limburg mocht aardwarmte produceren onder de strikte voorwaarde dat de productie zou worden gestaakt zodra er een aardbeving plaats zou vinden in het gebied. Op 25 augustus 2018 werd in de nabijheid van dit geothermisch systeem een kleine aardbeving waargenomen. Als gevolg hiervan werd de installatie op 28 augustus 2018 door de uitvoerder stilgelegd. Op 3 september 2018 vond opnieuw een aardbeving plaats, ditmaal met een magnitude van 1,7. Onderzoek moet nog uitwijzen of de aardbevingen wel of niet het gevolg zijn van de winning van aardwarmte.



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

17/77

#### 1.1.5.5 Geothermie in België

In de Belgische gemeente Mol, vlak over de Nederlandse grens, wordt een geothermiecentrale (Balmatt-centrale) gebouwd, die op termijn uit vijf boorputten zal bestaan. Eind juli 2018 is de derde boring op een verticale diepte van 4235 meter afgerond. Dit project richt zich op de verbreukte kalksteenlagen van Dinantien ouderdom (meer specifiek is het doel een verbreukte zone in een hard/competent bros gesteente). Dit gesteente is in tegenstelling tot de Noord-Limburgse projecten alleen verbreukt en niet gekarstificeerd. Wellicht is het gesteente door hydrothermale processen gekarstificeerd, anders dan de meteorische karst in Noord-Limburg. Vloeistofstroming in dit gesteente wordt gefaciliteerd door breuken en *fracture* permeabiliteit. De Balmatt-centrale ligt in de nabijheid van het breuksysteem van de Roerdalslenk en kan om deze reden ingedeeld worden in het **Conductive Rift basin – Fracture** (CD1\_R\_Fracture). Echter, het is niet geheel duidelijk hoe de breuken doorlopen in België, het is daarom ook mogelijk om de Balmatt-centrale in te delen in het **Conductive Intracratonic Basin – Fracture type** (CD1\_I\_Fracture).

Op 18 december 2018 deden zich in de omgeving van Dessel, nabij de Balmatt-centrale, twee kleine aardbevingen voor. De bevingen vonden plaats op een diepte van respectievelijk 5,6 en 4,9 kilometer en hadden een grootte van  $M_L$  0,9 en 1,2 (Koninklijke Sterrenwacht van België<sup>1,2</sup>). Op 18 januari 2019 vond een derde beving plaats, wederom in de omgeving van Dessel. Ditmaal werd een magnitude van  $M_L$  1,5 gemeten op een diepte van 5,9 kilometer (Koninklijke Sterrenwacht van België<sup>3</sup>). In het vervolg zijn er een aantal kleinere bevingen opgetreden, met tenslotte een beving van  $M_L$  2,1 op 23 juni 2019. De lokalisatie en timing van de aardbevingen lijkt aan te tonen dat het optreden ervan verband houdt met de injectie van koud water.

#### 1.1.5.6 Toekomstige geothermiesystemen en play types in Nederland

Verwacht wordt dat het merendeel van de toekomstige doubletten in Nederland ontwikkeld zullen worden in poreuze zandsteen reservoirs. Deze systemen kunnen gezien worden als de conventionele geothermiesystemen voor Nederland met een diepte van 0,5 tot 4 kilometer. Huidige doelreservoirs voor deze systemen zijn de zandsteenlagen van Jura/Krijt, Trias en Perm ouderdom.

Momenteel wordt er één geothermiesysteem ontwikkeld in de ondiepe zanden van het Zand van Brussel Laagpakket (van de Noordzee Groep). Dit laagpakket komt in Nederland voor op een diepte van 500 tot 1250 meter. Dit systeem gaat water produceren via de matrixpermeabiliteit van het gesteente en gebruikt hiervoor twee horizontale putten. De gewonnen “Lage Temperatuur Aardwarmte” (LTA) wordt gecombineerd met een warmtepomp en hierdoor kan LTA toegepast worden voor de verwarming van kassen, woningbouw en utiliteitsbouw. Mocht dit systeem succesvol zijn, dan is de verwachting dat ondiepe geothermie op meer plaatsen ontwikkeld zal worden. Ondiepe geothermie kan net als de “conventionele” geothermie ingedeeld worden in het **Conductive Intracratonic basin – Matrix** (CD1\_I\_Matrix) play type.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

18/77

Een versnelde ontwikkeling van geothermie in Nederland kan er voor zorgen dat geothermieprojecten steeds diepere gesteente lagen zullen exploiteren. Diepere reservoirs (dieper dan 4 kilometer) hebben een hogere temperatuur, maar het gesteente zal over het algemeen ook compacter en competenter (harder en brosser) zijn in vergelijking met ondieper gesteente. Hierdoor zal voor siliciklastisch gesteente de porositeit en permeabiliteit gering zijn en zal de vloeistofstroming door, al dan niet natuurlijk, verbreekt gesteente moeten plaatsvinden. Een gesteente dat mogelijk geschikte reservoir eigenschappen heeft op een diepte van >4 kilometer zijn de kalksteenlagen van Dinantien ouderdom. Afhankelijk van de locatie in Nederland kan vloeistofstroming plaatsvinden via karst- en/of breukpermeabiliteit. In Nederland kunnen deze diepe geothermische systemen ingedeeld worden in de volgende *play* types **Conductive Intracratonic basin – Fracture** (CD1\_I\_Fracture) of **Conductive Rift basin – Fracture** (CD1\_R\_Fracture).

Een voorbeeld van geothermie op >4 kilometer diepte in Nederland is het “Ultra-diepe Geothermie” (UDG) concept. Het geothermisch potentieel en de geologische risico's worden momenteel onderzocht in een onderzoeksproject (Green Deal UDG). Bij UDG wordt getracht water van meer dan 120°C te exploiteren en te gebruiken voor industriële toepassingen. Echter, vanwege deze diepte (>4 kilometer) zijn er technologische uitdagingen voor UDG, die er in mindere mate zijn voor “conventionele” geothermie (geothermie tussen de 0,5 en 4 kilometer). Zo zijn de druk en temperatuur hoger en is het gesteente compacter. Het primaire doelreservoir voor het UDG concept zijn de kalksteenlagen van Dinantien ouderdom en vloeistofstroming zal plaatsvinden via karst- en breukpermeabiliteit. Het is nog niet duidelijk of hydraulisch en/of chemisch stimuleren nodig is bij UDG. De potentiële UDG projecten richten zich op gebieden waar het reservoirgesteente mogelijk van nature permeabel is, waardoor stimulatie niet nodig zou zijn. Echter, het kan zijn dat uit de eerste exploratieboring blijkt dat het gesteente minder permeabel is dan verwacht waardoor stimulatie alsnog nodig is.

#### *1.1.5.7 Toekomstige geothermie play types en seismiciteit*

Het ondiepe geothermieconcept (ca. 0,5 – 1,5 kilometer diepte), gericht op de ongeconsolideerde zanden van de Noordzee Groep, valt binnen het bereik van de conventionele geothermie (0,5 tot 4 kilometer diepte) en heeft een vergelijkbaar stromingsconcept (matrix gedomineerde permeabiliteit). De Noordzee Groep is overal aanwezig in de ondergrond van het Nederlandse vaste land, behalve in het zuiden van Limburg. In het zuiden van Nederland heeft dit interval de hoogste geothermische potentie. Er wordt gebruik gemaakt van de matrixpermeabiliteit van het gesteente. Water wordt geproduceerd en geïnjecteerd, waardoor de vloeistofbalans in de ondergrond gelijk blijft. De aardlagen die hiervoor gebruikt worden zijn ongeconsolideerd en zacht in vergelijking met de aardlagen die gebruikt worden bij conventionele geothermie. Bij conventionele (poreuze zandsteen) geothermie is in Nederland geen seismiciteit gemeten. De verwachting is, mede op basis van bovenstaand, dat de kans op seismiciteit bij ondiepe geothermie nihil is.

Een mogelijk nieuwe ontwikkeling in Nederland zijn geothermie projecten op dieptes van meer dan 4 kilometer. Vloeistofstroming op deze diepte vindt plaats via breuken en verbreekt sedimentair gesteente, dat compacter en competenter is. Mocht het

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

19/77

aangetroffen gesteente van nature onvoldoende doorlatend zijn dan kan het gesteente gestimuleerd worden. Figuur 3 geeft een overzicht van de porositeit van geothermiereservoirs tegen de diepte van geothermiesystemen. Dit figuur laat zien dat bij projecten met een hoge porositeit geen seismiciteit is gemeten. Daarnaast laat Figuur 3 ook zien dat seismiciteit is waargenomen bij diepe (>4 kilometer) geothermieprojecten en meer in *fractured* reservoirs. Diepe geothermiesystemen van dit type *play* hebben, in vergelijking tot de poreuze zandsteen systemen, een middel seismisch potentieel.

### 1.2 *In hoeverre zijn buitenlandse voorbeelden van opgetreden seismiciteit bij geothermie vergelijkbaar met de Nederlandse situatie?*

De geothermische *case studies* zijn gegroepeerd op basis van hun specifieke *play* type (Moeck, 2014). Binnen een geothermische *play* zijn de tektonische en geologische parameters grotendeels vergelijkbaar. Hierdoor is het mogelijk om geothermische systemen te clusteren in zogenaamde *plays*, waardoor vergelijkingen tussen *play* types binnen Nederland en het buitenland gemaakt kunnen worden.

Uit deze vergelijking blijkt dat de systemen in het Noord-Duitse Bekken en het Deens-Noorse Bekken goede analogen zijn voor de poreuze siliciklastische systemen in Nederland. Bij deze analogen is geen seismiciteit ( $M > 2$ ) waargenomen (TNO, 2019). Het seismisch potentieel van dit type geothermie *play* is laag (TNO, 2019).

Het Molasse Bekken in het zuiden van Duitsland is een redelijke analoog voor de Nederlandse Dinantien systemen in Limburg. In zowel het Molasse Bekken als in Limburg produceren geothermische systemen middels een productie- en injectieput uit verbreukte zones en gekarstificeerde kalksteenlagen. Vanwege de hoge permeabiliteit, doordat direct uit breuken wordt gewonnen, is stimulatie van deze systemen niet nodig. In zowel het Molasse Bekken als de Roerdalslenk komt natuurlijke (tektonische) seismiciteit voor. Naast deze overeenkomsten zijn er ook grote verschillen tussen beide *play* types. In het Molasse Bekken bevindt het kristallijne *basement* zich op kleinere diepte, is de reservoirtemperatuur hoger, het is een ander type bekken (het Molasse Bekken is een voorland bekken) en de spanningstoestand is waarschijnlijk erg verschillend. Door de nabijheid van de tektonisch actieve Alpen ligt de spanningstoestand in het Molasse Bekken waarschijnlijk dichterbij de kritische toestand voor breukbeweging dan in de Roerdalslenk. In het Molasse bekken is bij 3 van de 27 geothermische systemen seismiciteit waargenomen (Magnitude 2,1 – 3,5, TNO 2019). Voor deze *play* types is er een middelmatig seismisch potentieel.

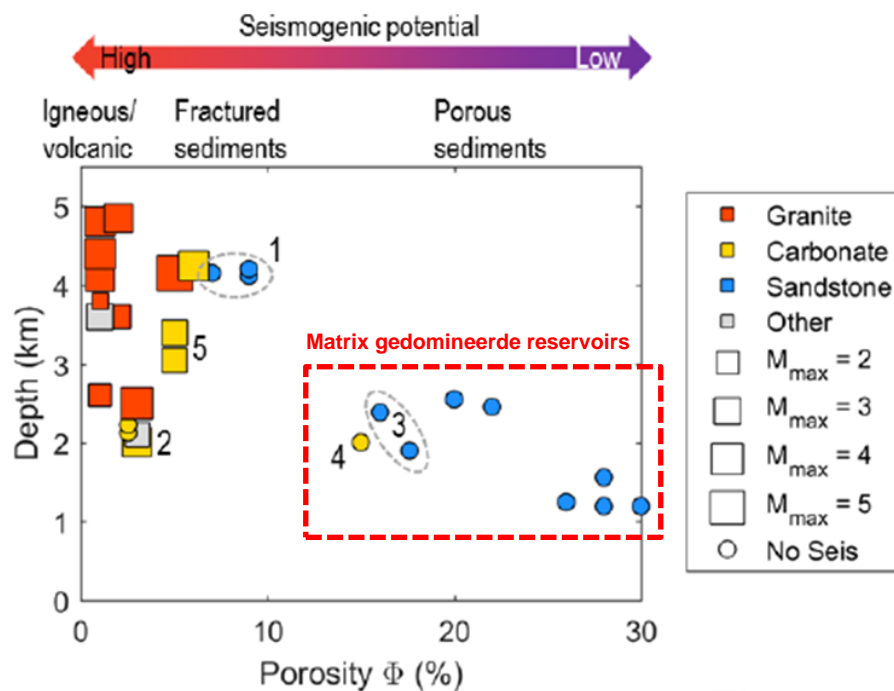
Het Molasse Bekken is een minder geschikte analoog voor mogelijk toekomstige UDG systemen omdat de het UDG onderzoeksprogramma niet specifiek is gericht op seismisch actieve gebieden, terwijl het Molasse Bekken dat wel is.

Datum  
2 april 2020

Onze referentie  
AGE 20-10.036

Blad  
20/77

Uit Figuur 3 en Tabel 2 blijkt dat de meeste wereldwijde gevallen van seismiciteit zich voordeden bij geothermische systemen met een hoge geothermische gradiënt of onder operationele condities die niet vergelijkbaar zijn met die toegepast in Nederland. Deze systemen produceren uit kristallijn of vulkanisch gesteente en hebben vaak reservoirstimulatie nodig om voldoende debiet te halen. Hier gaat het bijvoorbeeld om diepe EGS projecten als Soutz-sous-Forêts in Frankrijk, Basel in Zwitserland en Pohang in Zuid-Korea, of ondiepere convectie gedomineerde projecten, waar geen reservoirstimulatie nodig is, als Larderello in Italië, Hellisheiði in IJsland en The Geysers in de Verenigde Staten. Bij The Geysers is getest met een EGS pilot. Tijdens deze pilot is seismiciteit waargenomen bij de injectieput. De bovengenoemde geothermische systemen met seismiciteit zijn niet vergelijkbaar met wat kan worden verwacht in Nederland, omdat dergelijke vulkanische/kristallijne gesteenten niet beschikbaar of op korte termijn niet bereikbaar zijn voor geothermie in Nederland, en omdat het type EGS zoals toegepast in deze systemen voorlopig niet wordt voorzien. Daarnaast laat Figuur 3 zien dat poreuze, niet gestimuleerde zandsteenaquifers, zoals projecten in het Noord-Duitse Bekken, Noors-Deense Bekken en Nederland, een laag seismisch potentieel hebben en niet eerder gebeefd hebben.



Figuur 3: Porositeit van geothermiereservoirs tegen de diepte van het geothermiesysteem. De kleur van de datapunten geeft het type reservoirgesteente. Vierkantjes geven aan dat er  $M > 2$  seismiciteit heeft opgetreden en de grootte van het vierkant geeft aan wat de magnitude was. Cirkels zijn gebruikt voor systemen waar geen seismiciteit is gemeten. De rode rechthoek geeft aan welke data relevant zijn voor de matrix gedomineerde systemen zoals gerealiseerd en beoogd in Nederland. 1) dichte zandstenen in het Noord-Duitse Bekken (Horstberg, Hannover en Gross Schönebeck), 2) vulkanische velden die relatief ondiep zijn (Húsmúli en Larderello), 3) geothermiedoubletten in Nederland (Honselersdijk, Koekoekspolder), 4) de gemiddelde waarde voor de 35 systemen in het Parijs Bekken, 5) Molasse Bekken (Poing en Unterhaching). (bron: TNO, 2019).

## 1.4 Conclusies

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

21/77

Uit bovenstaande uiteenzetting kunnen de volgende conclusies worden afgeleid:

- In Nederland wordt momenteel onderscheid gemaakt tussen twee verschillende *play types*:
  - 1) Conductive Intracratonic Basin, met matrix gedomineerde permeabiliteit.
  - 2) Conductive Rift Basin, met *fracture* gedomineerde permeabiliteit.

### Matrix gedomineerde *play*

- Een internationale inventarisatie en categorisering van geothermische projecten laat zien dat er twee bekkens zijn die als analoog voor het Nederlandse matrix gedomineerde *play type* kunnen worden gezien: het Noord-Duitse en Noors-Deense Bekken.
- Bij de Nederlandse geothermiesystemen in de matrix gedomineerde *play* zijn tot op heden geen bevingen met een  $M > 1,5$  geregistreerd. Ook in het Noord-Duitse en Noors-Deense Bekken zijn geen bevingen met een  $M > 2$  geregistreerd. Zelfs niet na ca. 30 jaar productie in enkele systemen.

### Fracture gedomineerde *play*

- Een internationale inventarisatie en categorisering van geothermische projecten laat zien dat het Molasse Bekken als een redelijk geschikte analoog kan worden gezien voor de Nederlandse *fracture* gedomineerde *play* in de Roerdalslenk, mede omdat beide bekkens van nature seismisch actief zijn. Daardoor is het Molasse Bekken wellicht minder representatief voor de *fracture* gedomineerde *play* in de niet-seismisch actieve gebieden in Nederland.
- In het Molasse Bekken is bij 3 van de 27 systemen seismiciteit geregistreerd. De maximale magnitude van de bevingen bij deze drie systemen varieert tussen 2,1 en 3,5. Ook nabij geothermische projecten in Venlo en Mol (België) zijn bevingen tot een magnitude 2,1 waargenomen, maar hiervan is momenteel nog niet duidelijk of er een relatie is met de geothermische activiteiten.
- In het verleden zijn in het buitenland enkele substantiële bevingen opgetreden bij geothermische systemen, maar dit zijn EGS systemen of systemen waarbij de operationele condities niet vergelijkbaar zijn met de huidige Nederlandse situatie. EGS is een vorm van geothermie waarbij het reservoirgesteente op grote schaal hydraulisch wordt gestimuleerd. Deze vorm van geothermie vindt niet plaats in Nederland en wordt ook niet voorzien in de nabije toekomst.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

22/77

**2. Wat voor substantiële nadelige effecten zouden kunnen voorkomen bij bevingen door geothermie?**

- a) *Welke omvang van seismiciteit kan als substantieel worden beschouwd?*
- b) *Is er iets te zeggen over de kans dat er substantiële seismiciteit plaatsvindt?*
- c) *Welke nadelige effecten kunnen voorkomen?*
- d) *Wat is de ervaring in binnen- en buitenland?*
- e) *Kan er iets worden gezegd over de kans op een substantiële beving bij de verschillende vormen van geothermie?*

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat de nadelige effecten kunnen zijn van eventuele bevingen gerelateerd aan geothermische activiteiten. Als eerste wordt gedefinieerd wat wordt verstaan onder substantiële seismiciteit en wat de kans is dat dit optreedt bij systemen zoals deze momenteel in Nederland zijn gerealiseerd. Daarna wordt een toelichting gegeven op de mogelijke nadelige effecten en de ervaringen met substantiële seismiciteit in binnen- en buitenland. Als laatste wordt een inzicht gegeven in de kans op substantiële seismiciteit bij verschillende vormen van geothermie, ook die mogelijk in de toekomst kunnen worden gerealiseerd in Nederland.

In Bijlage 2B wordt een technische toelichting gegeven, welke dient als extra onderbouwing voor de bevindingen zoals in dit hoofdstuk gepresenteerd.

Datum

2 april 2020

Onze referentie

AGE 20-10.036

Blad

23/77

## 2.1 Welke omvang van seismiciteit kan als substantieel worden beschouwd?

### 2.1.1 Damage state en relatie met magnitude

De vorm en mate van schade kan worden ingedeeld volgens de EMS-98 Europese Macroseismische Schaal (Figuur 4). Deze schaal geldt alleen voor gebouwschade: voor schade aan bijvoorbeeld industrie is een dergelijke schaal nog niet beschikbaar. Op basis van deze schaal kunnen vijf categorieën (*Damage States*) worden onderscheiden:

- DS1: verwaarloosbare tot kleine schade (V-VI)
- DS2: beperkte, herstelbare schade (VI)
- DS3: substantiële tot zware schade (VII)
- DS4: zeer zware schade (VII-VIII)
- DS5: verwoesting (VIII-XII)

PGV [cm/s]	0.01-0.02	0.03-0.09	0.07-.23	0.2-0.6	0.5-1.6	1.3-4.4	3.5-11.6	9-31	25-82	66-219	176-584	> 412
PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	0.2-1.2	0.6-3.0	1.5-7.3	4-18	9-43	21-105	51-258	126-630	310-1540	750-3540	1830-9170	> 4470
EMS Intensity	I not felt	II scarcly felt	III weakly felt	IV largely observed	V strongly felt, hair cracks	VI slight damages	VII dama- ging	VIII heavy damages	IX destructive	X very distruc- tive	XI devas- tating	XII complete devas- tating
Depth [km]												
D [cm]	0.2 - 0.6	0.6 - 1.9	1.9 - 5.9	5.9 - 18.6	18.6 - 59	59 - 184	184 - 583	> 583				
L [km]	0.01 - 0.04	0.04 - 0.16	0.16 - 0.64	0.64 - 2.6	2.6 - 10	10 - 40	40 - 160	> 160				
Energy	1	× 32	× 1000	× 32,000	× 1,000,000	× 32,000,000	× 1,000,000,000	× 32,000,000,000				

Figuur 4: Relatie tussen breuklengte L, verplaatsing D, magnitude en diepte van bevingen en de macro-seismische intensiteit conform EMS-98, met bijbehorende bandbreedtes van Peak Ground Acceleration (PGA) en Peak Ground Velocity (PGV). Geselecteerde bevingen bij EGS operaties (groene sterren) en natuurlijke bevingen (rode sterren) zijn weergegeven op hun diepte (bron: Zang, 2014). De relatie tussen magnitude en intensiteit is representatief voor gebieden met EGS systemen. De magnitudes van bevingen in het Groningen veld worden over het algemeen gekenmerkt door een hogere intensiteit dan de relatie in deze tabel, vanwege afwijkende lokale condities (b.v. door relatief grote kwetsbaarheid van huizen).

De Romeinse cijfers tussen haakjes geven de corresponderende EMS-98 intensiteitswaarden aan van bevingen. Deze kunnen kwantitatief worden gerelateerd aan grondversnellingen (PGA) of -snelheden (PGV). De magnitudegrens waarbij deze intensiteiten kunnen optreden is afhankelijk van de diepte van de beving, de spanningsval bij de beving en het opslingeringsgedrag van de ondiepe ondergrond (afhankelijk van de aard van de ondiepe ondergrond kan een aardbevingsgolf lokaal worden versterkt of verzwakt en zodoende een sterkere of juist zwakkere groundbeweging veroorzaken). Maar ook de kwetsbaarheid van

gebouwen bepaalt de intensiteit. In het Groningen gasveld is er sprake van veel huizen met schade in categorie DS1, enkele huizen met een schadecategorie DS2 en mogelijk DS3 voor zeer kwetsbare gebouwen (bron: NAM, 2019), ten gevolge van vele honderden bevingen met een magnitude boven  $M=1,5$  tot ca.  $M=3,5$ . De hogere DS niveaus (4-5) vormen serieuze veiligheidsrisico's (Figuur 4).

### 2.1.2 Toepassing op geothermie

Voor geothermie wordt vooralsnog een vergelijkbare waarde ( $M=3,5$ ) aangenomen als grenswaarde voor mogelijk optreden van DS2, welke bijgesteld dient te worden naar aanleiding van locatie-specifieke factoren (b.v. opslingeringsgedrag van de ondiepe ondergrond). Deze grenswaarde van  $M=3,5$  wordt als substantieel beschouwd in dit rapport.

## 2.2 *Is er iets te zeggen over de kans dat er substantiële seismiciteit plaatsvindt?*

### 2.2.1 Gebieden zonder natuurlijke kritische voorspanning van breuken

Alle huidige doubletten in Nederland, behalve die in de provincie Limburg, winnen warmte uit geothermische reservoirs met matrix gedomineerde stroming in gebieden A en B (zie Hoofdstuk 1, Figuur 1). De kans dat breuken in deze reservoirs kritisch voorgespannen zijn is zeer gering. Daardoor is de kans dat substantiële seismiciteit op zal treden in deze *play* naar verwachting zeer beperkt. Dit blijkt ook uit de ervaringen elders met geothermische systemen in deze en vergelijkbare *plays* (zie paragraaf 1.1.5.2 en 1.1.5.3) en voorspanning van breuken.

In de bestaande operationele systemen wordt de maximale spanningsverstoring bereikt in de eerste periode van productie, dus in de eerste maanden tot een jaar. Het gebied van spanningsverstoring breidt zich gedurende productie uit in de afkoelende reservoirzone rondom de injectieput. De mogelijkheid dat door afkoeling op termijn bevingen ontstaan kan op basis van de huidige inzichten en modellen niet uitgesloten worden, maar als er al bevingen optreden is de kans zeer klein dat deze substantieel zijn (dit wordt nader onderbouwd in Bijlage 2A en 2B).

### 2.2.2 Gebieden met natuurlijke kritische voorspanning van breuken

Voor geothermische installaties in gebieden waar breuken kritisch voorgespannen zijn en waar water wordt geproduceerd uit *fracture* gedomineerde reservoirs, zoals de huidige systemen in de provincie Limburg, is de situatie anders. Uit een analyse van aardbevingen rondom geothermieprojecten in verschillende Europese bekkens blijkt dat relatief kleine spanningsveranderingen dan kunnen leiden tot bevingen in kritisch voorgespannen breuken. Dit geldt voor gebied C en D. Ten opzichte van de gebieden A en B staan de breuken in de *fracture* gedomineerde reservoirs in gebied C en D met een hogere waarschijnlijkheid in verbinding met diepere kritisch voorgespannen breuksystemen en kunnen daarom leiden tot een verhoogde kans op substantiële bevingen in vergelijking met injectie in matrix gedomineerde reservoirs.



### 2.2.3 Geïnduceerde kritische spanning op breuken door gaswinning

Daarnaast kan een breuk op reservoirniveau in de directe nabijheid van gedepleteerde gasvelden ook kritisch gespannen zijn geraakt door de drukdaling van gaswinning. Een door geothermie veroorzaakte additionele verstoring van het stressveld door veranderingen in temperatuur of druk zou de breuk dan doen kunnen bewegen.

### 2.3 Welke nadelige effecten kunnen voorkomen?

De nadelige effecten van eventuele aardbevingen bij geothermie verschillen qua aard niet van andere geïnduceerde bevingen, zoals bijvoorbeeld ten gevolge van gaswinning. Relatief kleine bevingen, tot ongeveer  $M \sim 2,5$ , leiden volgens de EMS-98 schaal niet tot nadelige effecten in termen van materiële schade en tot  $M \sim 3,5$  zijn de nadelige effecten beperkt tot eenvoudig herstelbare schade (meestal DS1, beperkt DS2). Bevingen van  $M > 3,5$  kunnen mogelijk leiden tot meer schade (DS2 of hoger). Deze grenzen zijn gebaseerd op een relatie tussen bevingen en grondversnelling, en kwetsbaarheid van gebouwen die vergelijkbaar is met Groningen. Zoals in paragraaf 2.1 genoemd dient deze waarde te worden bijgesteld naar aanleiding van locatie specifieke factoren.

### 2.4 Wat is de ervaring in binnen- en buitenland?

#### 2.4.1 Gebieden zonder natuurlijke kritische voorspanning van breuken

In matrix gedomineerde reservoirs zoals het Bekken van Parijs (met tientallen geothermische systemen die al tientallen jaren operationeel zijn, zie Tabel 1), het Noord-Duitse Bekken en het Noors-Deense Bekken zijn geen aardbevingen met een  $M > 2$  geregistreerd. Dit komt overeen met de ervaring met matrix gedomineerde geothermiesystemen in Nederland (zie hoofdstuk 1) waar geen bevingen  $M > 2$  zijn geregistreerd.

#### 2.4.2 Gebieden met natuurlijke kritische voorspanning van breuken

In *fracture* gedomineerde reservoirs met natuurlijke kritische voorspanning van breuken, zoals het Molasse Bekken, zijn bij 3 van de 27 systemen bevingen met  $M > 2$  geregistreerd, maar ook deze zijn niet van substantiële omvang (zoals gedefinieerd in paragraaf 2.1). In Nederland hebben zich nog geen substantiële bevingen voorgedaan bij *fracture* gedomineerde systemen. Er zijn wel enkele kleine bevingen ( $M < 2$ ) opgetreden in de nabijheid van de *fracture* gedomineerde systemen, maar onderzoek moet nog uitwijzen of deze gerelateerd zijn aan de geothermische activiteiten.

Met EGS systemen in *fracture* gedomineerde systemen in gebieden met kritisch gespannen breuken is ervaring in het buitenland (bijvoorbeeld: Soultz-sous-Forêts, Rittershoffen en Basel). In Europa zijn tot nu geen substantiële bevingen geregistreerd in dergelijke systemen. Wel is er sprake (geweest) van een groot aantal kleinere bevingen.

Meer informatie omtrent de ervaringen met seismiciteit bij geothermie in binnen- en buitenland wordt gegeven in Hoofdstuk 1 en TNO (2019).

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

26/77

## 2.5 Kan er iets worden gezegd over de kans op een substantiële beving bij de verschillende vormen van geothermie?

Onderstaand antwoord is gericht op de vormen van geothermie die momenteel in Nederland zijn gerealiseerd of mogelijk in de toekomst gerealiseerd gaan worden.

### 2.5.1 Gebieden zonder natuurlijke kritische voorspanning van breuken

De kans op het optreden van substantiële seismiciteit is waarschijnlijk zeer gering bij geothermiesystemen die gericht zijn op reservoirs met matrix gedomineerde stroming in gebieden waar breuken niet kritisch voorgespannen zijn. Dit geldt voor de meeste bestaande doubletten in Nederland. Ook in de toekomst zal de kans op het optreden van substantiële seismiciteit waarschijnlijk zeer beperkt zijn, aangezien de meeste potentiële nieuwe geothermiesystemen ook worden voorzien in deze reservoirs en buiten de seismisch actieve gebieden (gebieden A en B en mogelijk ook delen van gebied C van Figuur 1 en het Masterplan Aardwarmte in Nederland (EBN, 2018)).

### 2.5.2 Gebieden met natuurlijke kritische voorspanning van breuken

Voor gebieden met kritisch voorgespannen breuken en waarbij *fracture* gedomineerde stroming plaatsvindt (zoals de huidige systemen in de provincie Limburg) is de kans op het optreden van substantiële seismiciteit hoger. De omvang en mate van gespannen (delen van) breuken is echter grotendeels onbekend. Het kan niet volledig uitgesloten worden dat een natuurlijke beving met een magnitude vergelijkbaar met de beving in Roermond in 1992 ( $M=5,8$ ) wordt getriggered omdat de kans op een dergelijke beving op dit moment nog niet met voldoende zekerheid gekwantificeerd kan worden.

### 2.5.3 Ondiepe geothermie

Voor geothermie in ondiepe reservoirs in Nederland (ca. 500-1500m diepte) is de kans op het optreden van substantiële seismiciteit zeer klein. Dit wordt verklaard doordat de spanningsverandering die optreedt, door verschillen in druk en temperatuur, kleiner is dan bij diepere systemen (druk en temperatuur nemen toe met diepte). Maar ook omdat het gesteente zelf de stressverandering aseismisch kan accommoderen (bijvoorbeeld d.m.v. *creep*) en dus een lagere seismische potentie heeft.

### 2.5.4 Warmte-opslag

Ook in het geval van hoge temperatuur opslag in ondiepe reservoirs (tot ca. 1000m diepte) is de kans op substantiële seismiciteit zeer klein. Er is namelijk geen sprake van destabilisatie door temperatuureffecten omdat de temperatuur na opwarming en afkoeling nooit lager wordt dan de oorspronkelijke temperatuur. Daarnaast zijn de drukeffecten beperkt en na de eerste weken gestabiliseerd zodat er daarna geen nieuwe bevingen worden verwacht. Ook in dit geval zijn de gesteenten over het algemeen niet competent en hebben daardoor een lage seismische potentie.

### 2.5.5 Ultra-Diepe Geothermie (UDG)

Ook bij UDG systemen is de kans op het optreden van substantiële seismiciteit hoger dan bij ondiepere systemen door een combinatie van meer competent gedrag

van het gesteente, een sterkere afkoeling van het reservoir en omdat UDG een karst/*fracture* gedomineerd reservoir nodig heeft om voldoende productie te genereren. Een *fracture* gedomineerd reservoir is vaak gerelateerd aan de nabijheid van breuksystemen.

## 2.6 Conclusies

Uit bovenstaande uiteenzetting kunnen de volgende conclusies worden afgeleid:

- De kans op het optreden van substantiële seismiciteit (aanname: EMS-98 schadeklasse  $\geq$ DS2 en  $\sim M > 3,5$ ) voor de matrix gedomineerde reservoirs zonder kritisch voorgespannen breuken is zeer gering. Dit wordt ondersteund door de beschikbare kennis m.b.t. de mechanismen die leiden tot spanningsveranderingen op breuken en de afwezigheid van waargenomen bevingen bij vergelijkbare projecten.
- Bij ondiepe vormen van geothermie, zoals Hoge Temperatuur Opslag (HTO), Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) of Warmte-Koude Opslag (WKO), is de kans op het optreden van substantiële seismiciteit eveneens zeer gering.
- De Roerdalslenk in het zuidoosten van Nederland (gebied C en D in Figuur 1) is een van nature seismisch actief gebied waarin breuken mogelijk kritisch voorgespannen kunnen zijn. Hierdoor is de kans op het optreden van (getriggerde) seismiciteit door geothermische operaties in dit gebied groter dan in de rest van Nederland, waar de kans veel geringer is dat breuken kritisch voorgespannen zijn. Ondanks de geringere kans op kritisch voorgespannen breuken buiten de Roerdalslenk, is het niet uitgesloten dat elders enkele breuken ook kritisch gespannen zijn of door druk- en temperatuureffecten die optreden bij geothermische operaties kritisch gespannen worden.
- In het geval van de *fracture* gedomineerde reservoirs in gebieden met kritisch voorgespannen breuken kan niet worden uitgesloten dat substantiële seismiciteit mogelijk optreedt omdat de kans op het optreden van dergelijke bevingen op dit moment nog niet met voldoende zekerheid kan worden gekwantificeerd.
- Ook bij UDG systemen is de kans op het optreden van substantiële seismiciteit hoger door een combinatie van competent gedrag van het gesteente, een sterke afkoeling van het reservoir en omdat UDG een karst/*fracture* gedomineerd reservoir nodig heeft om voldoende energieproductie te genereren. Een *fracture* gedomineerd reservoir is vaak gerelateerd aan de nabijheid van breuksystemen. UDG is daarentegen niet specifiek gericht op gebieden met van nature kritisch voorgespannen breuken.
- De kans op substantiële seismiciteit is groter bij EGS systemen, waarbij reservoirstimulatie nodig is. Dit blijkt ook uit internationale ervaringen met seismiciteit bij dit type installaties. In Nederland wordt deze vorm van geothermie niet voorzien in de nabije toekomst.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

28/77

**3. Zijn de effecten van eventuele seismiciteit door geothermie te vergelijken met de effecten van seismiciteit ten gevolge van gaswinning in Groningen of uit de kleine velden? Denk hierbij aan:**

- a) Omvang van de seismiciteit (zou er bij geothermie eenmalig een aardbeving optreden of meerdere aardbevingen en wat zijn de mogelijke magnitudes?)*
- b) Is het mogelijk om de bestaande site response kaart uit 2012 uit te breiden met de gebieden die niet in de gaswinningszone zitten? Zijn er gebieden waar de ondiepe ondergrond zorgt voor extra versnellingen aan het oppervlak en in welke orde van grootte zou dat kunnen zijn?*
- c) Het gebied rondom een geothermie activiteit waarbinnen een beving kan plaatsvinden (straal rondom put of doublet).*
- d) Effect op het oppervlak (gebouwen, industrie).*

In dit hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen de effecten van eventuele seismiciteit bij geothermie ten opzichte van die bij gaswinning, in termen van omvang, de grootte van het beïnvloedingsgebied en effecten op het oppervlak.

In Bijlage 2C wordt een meer gedetailleerde en technische toelichting gegeven op de onderbouwende argumenten voor de beantwoording van bovenstaande vragen.

### 3.1 *Is de omvang van eventuele seismiciteit door geothermie te vergelijken met de omvang van seismiciteit ten gevolge van gaswinning in Groningen of uit de kleine velden?*

#### **3.1.1 Matrix gedomineerde stroming**

De kans op een substantiële beving met  $M > 3,5$  voor een geothermisch doublet is naar verwachting zeer klein vergeleken met gaswinning uit het Groningen veld, in een overigens vergelijkbare ondergrondse gesteldheid. Dit geldt voor matrix gedomineerde reservoirs in de gebieden A en B (Figuur 1).

##### *3.1.1.1 Mechanismen*

Bij gaswinning wordt de spanningsverandering op breuken veroorzaakt door drukdaling binnen het reservoirgesteente bij overigens gelijkblijvende temperatuur. Bij geothermie wordt de spanningsverandering op breuken veroorzaakt door thermische 'krimp' door afkoeling van het gesteente aan de kant van de injectieput en de verhoging van de vloeistofdruk in de nabijheid van de injectieput.

##### *3.1.1.2 Vergelijking spanningsveranderingen*

In vergelijking met geothermie is de differentiële spanningsverandering op breuken bij gaswinning:

- 1) verspreid over een veel grotere oppervlakte (met name in het geval van Groningen), en daarmee ook over een groter breukoppervlak.
- 2) een orde van grootte hoger,
- 3) toenemend in de tijd, en
- 4) in veel gevallen permanent.

##### *3.1.1.3 Gevolg voor seismiciteit*

Omdat afkoeling bij geothermie slechts in een zeer beperkt deel van de ondergrond optreedt (radius van ca. 750 m om de injectieput bij een onderlinge putafstand van het doublet van 1500 m, in geval van een homogeen reservoir), kan slechts een relatief beperkt breukoppervlak worden gedestabiliseerd. Daardoor blijft de magnitude van eventuele bevingen bij geothermie naar verwachting zeer gering vergeleken met gaswinning. Echter, de temperatuurdaling bij geothermie, die eveneens leidt tot een verandering in differentiële spanning op breuken, zorgt mogelijk voor een verhoogde kans op het optreden van bevingen vergeleken met gaswinning omdat bij gaswinning de reservoirtemperatuur nagenoeg constant blijft.

Per saldo is het verwachte effect van progressieve drukdaling bij gaswinning in veel gevallen groter dan het gecombineerde effect van temperatuurafname en drukverhoging bij geothermie. Hierdoor is de verwachting dat de kans op bevingen met  $M > 3,5$  zeer klein is (zie voor details Appendix C en 3.3), zeker in vergelijking met Groningen en relatief grote 'kleine' gasvelden met een cumulatief productievolume van meer dan 10 miljard kubieke meter gas.

Voor kleine gasvelden is de verwachting dat de kans op aardbevingen bij geothermie voor matrix gedomineerde systemen kleiner is dan bij gaswinning. De vergelijking is in dit geval moeilijker omdat het beïnvloede reservoirvolume voor

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

30/77

geothermie in orde grootte vergelijkbaar kan zijn met kleine gasvelden met een cumulatief productievolume van 1 kubieke meter gas, maar het mechanisme en aard van spanningsverandering sterk verschilt. Een indicator die in dit geval gebruikt kan worden is de cumulatieve volumeverandering, die ook wel als maat wordt genomen voor indicatie van kansen op bevingen in andere studies. Deze kunnen wel rechtstreeks vergeleken worden. In een eerste indicatieve vergelijking komt naar voren dat de volumeverandering bij geothermie (compactie door afkoeling), beduidend kleiner is dan de compactie door drukdaling bij zulke kleine gasvelden.

### **3.1.2 Fracture gedomineerde stroming**

Bij de geothermische projecten in Limburg, die gericht zijn op de verbreukte kalksteenlagen van Dinantiën ouderdom en gelegen in de seismisch actieve Roerdalslenk (*Conductive Rift basin – Fracture* (CD1\_R\_Fracture) *play*, zie hoofdstuk 1), is een beving van  $M > 3,5$  niet uit te sluiten.

De aardbevingen bij geothermie in het buitenland (Tabel 2) tonen een verdeling in magnitudes, waaronder bevingen van  $M > 3,5$ . Echter, nagenoeg al deze bevingen zijn opgetreden in van nature seismisch actieve gebieden, bij projecten waarbij merendeels *fracture* gedomineerde stroming van water plaatsvindt en/of bij projecten waar ook hydraulische stimulatie is toegepast om de permeabiliteit te stimuleren. Voor de huidige Nederlandse doubletten in Limburg spelen alleen de eerste twee factoren een rol. De verhoogde kans op een mogelijk optreden van (kleine) bevingen in van nature seismische actieve gebieden in *fracture* gedomineerde reservoirs is in lijn met de internationale database (Tabel 2).

*3.2 Is het mogelijk om de bestaande site response kaart uit 2012 uit te breiden met de gebieden die niet in de gaswinningszone zitten? Zijn er gebieden waar de ondiepe ondergrond zorgt voor extra versnellingen aan het oppervlak en in welke orde van grootte zou dat kunnen zijn?*

De eigenschappen van de lokale ondiepe ondergrond bepalen in sterke mate het effect van bevingen aan het oppervlak. Een landsdekkende *site response* kaart kan worden gebruikt om een adequate inschatting te maken van de te verwachten effecten aan het oppervlak. In dit hoofdstuk wordt beschreven wat nodig is om de bestaande *site response* kaart te verbeteren en uit te breiden.

De indeling in *site response* klassen van de huidige *site response* kaart (Wassing et al. 2003; Wassing et al. 2004) en de bijbehorende amplificatiefactoren is grotendeels gebaseerd op een methode beschreven in de literatuur, waarbij voor het bepalen van de amplificatiefactoren een beperkt aantal modelberekeningen is gemaakt. Voor de kaart zelf is gebruik gemaakt van boorgegevens uit de DINO database van TNO.

Recent is door Deltares een uitgebreider onderzoek uitgevoerd naar de *site response* van Groningen (gebaseerd op het lithologische GeoTop model van TNO).

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

31/77

Dit heeft geresulteerd in een nieuwe *site response* kaart en een nieuwe inschatting van de *response* van de ondiepe ondergrond van Groningen.

Voor het opzetten van een nieuwe landelijke *site response* kaart, die ook de gebieden buiten de gaswinningszones beslaat, zou gebruik moeten worden gemaakt van de nieuw opgedane inzichten en zou gekeken moeten worden of de methodiek voor Groningen (eventueel in vereenvoudigde vorm) gebruikt kan worden. De belangrijkste elementen van deze aanpak zijn:

- Opzetten methodiek: analyse van de methodiek voor het opzetten van *site response* klassen en bijbehorende inschatting van de *soil response*, zoals gebruikt voor de kaart van Groningen. Onderzoeken of deze methodiek in vereenvoudigde vorm gebruikt kan worden voor overige gebieden in Nederland.
- Op basis van nieuw opgezette methode: classificatie van *response* klassen op basis van het GeoTop model en modellering van de *site response* in verschillende klassen.
- Waarborgen van een goede aansluiting van de *site response* kaart op *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE) en *attenuation* (propagatie en demping van golven door de diepere ondergrond) volgens de nieuwe inzichten opgedaan in Groningen.

Met behulp van deze nieuwe *site response* kaart zou een analyse kunnen worden gemaakt van de ondiepe ondergrond om te bepalen of er gebieden zijn in Nederland waar de ondiepe ondergrond zorgt voor extra versnellingen aan het oppervlak en van welke grootte deze zijn.

### 3.3 *Is het gebied rondom een geothermie activiteit waarbinnen eventuele seismiciteit kan plaatsvinden te vergelijken met dat in het geval van gaswinning in Groningen of uit de kleine velden?*

De destabiliserende spanningsverandering bij geothermieprojecten treedt op rondom de injectieput van een doublet. Uitgaande van een homogeen reservoir, is de thermische verstoring over de levensduur beperkt tot een cirkel rondom de injectieput die een radius heeft van de helft van de putafstand (doorgaans ca. 750 m bij een onderlinge putafstand van het doublet van 1500 m). De radius van destabiliserende drukverandering is kleiner voor systemen met matrix gedomineerde stroming, maar groter voor systemen met *fracture* gedomineerde stroming.

Door de beperkte afkoelingscirkel om een injectieput van een geothermiesysteem is ook het gebied waarover spanningsveranderingen optreden, en dus waarin eventuele seismiciteit kan plaatsvinden, beperkt en in de orde van ca. 2-3 km<sup>2</sup>. Gasvelden kunnen een veel groter oppervlak beslaan (met name het Groningen gasveld) waarin spanningsveranderingen optreden. Hierdoor is het gebied waarin eventuele seismiciteit kan optreden bij gaswinning (voor Groningen en relatief grote velden) vele malen groter dan bij geothermieprojecten.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

32/77

3.4 *Zijn de effecten op het oppervlak van eventuele seismiciteit door geothermie te vergelijken met de effecten van seismiciteit ten gevolge van gaswinning in Groningen of uit de kleine velden?*

De effecten op het oppervlak ten gevolge van eventuele seismiciteit bij geothermie zullen, bij één of enkele bevingen van vergelijkbare magnitude en diepte, overeenkomstig zijn met die ten gevolge van gaswinning.

3.5 *Conclusies*

Uit bovenstaande uiteenzetting kunnen de volgende conclusies worden afgeleid:

- Uitgaande van een vergelijkbare ondergrondse gesteldheid, is de kans op een aardbeving met magnitude  $M > 3,5$  zeer klein vergeleken met gaswinning uit het Groningen veld. Ook de maximale magnitude zal zeer waarschijnlijk lager zijn.
- De omvang van eventuele seismiciteit en de omvang van het gebied waarin seismiciteit kan optreden is bij geothermie (behalve de *fracture* gedomineerde reservoirs in de Roerdalslenk) waarschijnlijk kleiner dan bij gaswinning.
- De effecten van een beving aan het oppervlak zullen bij geothermie waarschijnlijk overeenkomstig zijn als bij gaswinning, bij bevingen van vergelijkbare magnitude en diepte.
- Om een goede inschatting te maken van de effecten op het oppervlak is een uitbreiding en actualisatie van de huidige *site response* kaart nodig. Dit kan mogelijk middels een methodiek die reeds is gebruikt voor een regionale *site response* kaart voor de provincie Groningen, opgesteld door Deltares.



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

33/77

**4. Zijn er methoden bekend in binnen- of buitenland waarmee seismiciteit door geothermie adequaat kan worden ingeschat?**

- a) Waar kan seismiciteit plaatsvinden en waar niet?*
- b) Waar of onder welke omstandigheden blijft eventuele seismiciteit beperkt?*
- c) Hoe kan seismiciteit worden beheerst? Kan er worden gewerkt met een soort Hand-aan-de-Kraan?*

Dit hoofdstuk gaat in op de beschikbare methoden, waarmee het optreden van seismiciteit, gerelateerd aan geothermische activiteiten in de Nederlandse ondergrond, kan worden ingeschat en waar nodig beperkt.

In Bijlage 2D wordt duiding gegeven aan een aantal zaken die hierbij van belang zijn. Allereerst het bestaan van (zeer) verschillende varianten van geothermie in de Nederlandse ondergrond. In samenhang daarmee is het zinvol onderscheid te maken tussen de bestaande geothermieprojecten in Nederland ([www.nlog.nl](http://www.nlog.nl)) en de verwachte ontwikkelingen in het kader van realisatie van de energietransitie in de komende decennia (zie Hoofdstuk 1).

#### 4.1 Waar kan seismiciteit plaatsvinden en waar niet?

Er zijn twee typen modellen: 1) modellen die gebaseerd zijn op statistische analyse van historische data van (geothermische) projecten in vergelijkbare condities in het buitenland en 2) fysische modellen.

- 1) De ervaringsdatabase voor geothermie in Nederland is nog te beperkt om een relatie te leggen tussen aspecten van ondergrondse gesteldheid of operationele condities in Nederlandse geothermische projecten en de kans op seismiciteit. In het buitenland is voor geothermische projecten de ervaringsdatabase ook beperkt. Wat in algemene zin wel gesteld kan worden is dat er een relatie is tussen bepaalde factoren (zie TNO, 2019). Een positieve indicator is dat in de vergelijkbare matrix gedomineerde systemen in het buitenland, die al jaren operationeel zijn, geen seismiciteit is geregistreerd. Echter, dat is onvoldoende basis voor een kwantitatief raamwerk dat voor Nederland gebruikt zou kunnen worden, zoals de Deterministische Hazard Analyse voor Geïnduceerde Seismiciteit voor gasvelden (DHAIS) (TNO, 2004; TNO, 2012).
- 2) Er zijn verschillende fysisch gebaseerde modellen ontwikkeld voor geothermie in *fracture* gedomineerde systemen en EGS, en voor gaswinning in matrix gedomineerde reservoirs. Deze modellen maken inzichtelijk welke factoren, zoals reservoir- en breukgeometrie, druk- en temperatuurverandering, van invloed zijn op verstoring van spanningen op breuken en het effect hiervan op een verhoogde kans op bevingen.

Er zijn veel *state of the art* modelstudies gedaan naar aardbevingsrisico's bij geothermieprojecten voor *fracture* gedomineerde reservoirs. En daarmee ook veel studies naar de specifieke vraag, of aardbevingen zich bij een specifiek project wel of niet kunnen voordoen. Deze studies richten zich vooral EGS. De modellen die ontwikkeld zijn voor EGS, kunnen worden vertaald naar de Nederlandse situatie voor *fracture* gedomineerde reservoirs. De verwachting is dat eventuele toepassing van dergelijke modellen demonstreren dat er een verhoogde kans is op bevingen voor *fracture* gedomineerde systemen in de provincie Limburg, vanwege het natuurlijke voorkomen van kritisch gespannen breuken en een relatief grote kans op destabilisatie van spanning op breuken door waterinjectie.

Voor matrix gedomineerde, geothermische reservoirs kan gebruik worden gemaakt van de fysische modelaanpakken en conceptuele modellen, zoals ontwikkeld voor gaswinning. Wat betreft drukeffecten, kunnen bestaande modellen worden gebruikt. Op basis hiervan is de verwachting dat seismiciteit niet of nauwelijks kan voorkomen, in de situatie dat de ondergrond niet kritisch is gespannen.

Voor geothermie zijn de lange-termijn thermische effecten voor de Nederlandse *play* systemen nog onvoldoende robuust voorspelbaar met de bestaande modellen. Theoretisch kunnen deze effecten leiden tot bevingen, onder bepaalde condities van ondergrondse gesteldheid.

In Nederland is vanuit de gaswinning veel ervaring opgedaan met dit type modellering en bestaat er kennis van de geologische parameters van een deel van

de voor geothermie het meest in aanmerking komende *plays*. De grootste uitdaging hier ligt op het vlak van het vaststellen van realistische parameters voor de (relatief) nieuwe *plays* en – op termijn – het terugdringen van de onzekerheid hierin (zie paragraaf 4.3.2).

#### 4.2 *Waar of onder welke omstandigheden blijft eventuele seismiciteit beperkt?*

Het antwoord op de vraag, of aardbevingen zich bij een specifiek project (waarvan is vastgesteld dat er een kans is dat bevingen kunnen plaatsvinden) zullen beperken tot lage magnitudes, is – naast inzicht in de onderliggende processen – sterk afhankelijk van lokale factoren, zoals de geologie (b.v. breuksystemen, initiële spanning) en de operationele omstandigheden.

##### **4.2.1 Reservoirs met matrix gedomineerde stroming**

Voor de nu ontwikkelde matrix gedomineerde geothermische reservoirs kan gebruik worden gemaakt van de modelaanpakken, welke zijn ontwikkeld voor gaswinning indien ze worden uitgebreid met thermische effecten.

Op basis van generiek inzicht in modelmatige concepten is de verwachting dat de seismiciteit in matrix gedomineerde systemen in van nature seismisch niet actieve gebieden beperkt zal zijn tot de door thermische- en drukverandering beïnvloede reservoirzone. Een beperking van seismiciteit tot de reservoirzone wordt tot nu toe ook geobserveerd in aan gaswinning gerelateerde seismiciteit, zij het dat de beïnvloede zone in Groningen volumetrisch gezien enorm veel groter is. De verwachting is verder dat de seismische *event-rate* niet accelereert, aangezien alleen het gebied van spanningsverstoring toeneemt met de jaren door uitbreiding van de koudwaterbel, maar niet de spanningsverstoring zelf. Bovendien wordt de gebiedstoename alleen beïnvloed door de progressieve afkoeling en blijft de druk stationair bij gelijkblijvend debiet. Bij gaswinning blijft het gebied van spanningsverandering nagenoeg gelijk, maar neemt de spanningsverandering progressief toe door verlaging van de druk in het reservoir.

##### **4.2.2 Reservoirs met *fracture* gedomineerde stroming**

Voor *fracture* gedomineerde systemen en/of seismisch actieve gebieden, zoals in Limburg, is een voorspelling veel moeilijker te maken. De verwachte *event-rate* bij gelijke spanningsverandering is hoger dan bij de andere *plays* evenals de potentiële maximale magnitude vanwege triggering van bevingen.

### 4.3 Hoe kan seismiciteit worden beheerst? Kan er worden gewerkt met een soort Hand-aan-de-Kraan?

#### 4.3.1 Beheerscyclus

Voor het beheersen van seismiciteit of andere gevaren is minimaal een betrouwbare prognose plus een onzekerheidsmarge / modelonzekerheid nodig, waarbij de onzekerheid niet zodanig ruim mag zijn, dat “alles” mogelijk is. Er moet immers op kunnen worden gestuurd middels het nemen van maatregelen. De praktijk leert dat de onzekerheid bij aanvang over het algemeen eerder te krap dan te ruim wordt genomen.

Een proces kan alleen beheerst worden, als er sprake is van effectieve maatregelen, waarbij een gewenst effect (bijvoorbeeld het voldoen aan een norm) kan worden geborgd. Goed inzicht in de maatregelen en hun effectiviteit is dus essentieel.

Zowel de effectiviteit van te nemen maatregelen (bij (dreigende) overschrijding van een norm) als het optreden van seismiciteit kunnen enige mate van vertraging vertonen. Idealiter is bij aanvang een beheerscyclus vastgesteld, zodat de stuurbaarheid van het systeem bestand is tegen deze vertragingseffecten.

De beheerscyclus is rond als de prognose (periodiek of real time) wordt vergeleken met voldoende (relevante) observaties uit de monitoring en is vastgelegd op grond waarvan, wanneer en hoe wordt ingegrepen middels welke maatregel.

Het verdient aanbeveling om externe evaluatie of toetsing te verbinden aan de beheerscyclus.

#### 4.3.2 Verbeterstappen

##### 4.3.2.1 Modellen

De volgende generieke verbeterstappen voor modellen en hun parameterisatie zijn nodig, om potentiële bevingrisico's (voldoende) goed te kunnen inschatten:

- Voor matrix gedomineerde systemen, moeten modellen worden aangepast voor het voorspellen van lange-termijn thermische effecten. Dat kan op basis van bestaande modellen, met kleine aanpassingen.
- De modelparameters dienen te worden gekalibreerd op basis van laboratoriumanalyse van relevante gesteente-eigenschappen (uitzettingscoëfficiënt ( $\alpha$ ), Young's modulus ( $E$ )) die van grote invloed zijn voor thermische spanningen en seismogene eigenschappen moeten worden vastgesteld voor het aandeel *creep vs rupture response*.
- Voor Nederland is het nodig nader inzicht te verkrijgen in de eerste orde relatie tussen sterkte van bevingen en de maximale versnelling van de ondiepe bodem (PGA) in gebieden van seismische risico's samenhangend met geothermie.

Naast verbetering van modellen voor de inschatting van bevingrisico's, zijn metingen in actieve geothermische doubletten nodig om de modelinzichten wat betreft risicofactoren wetenschappelijk te vergroten en te toetsen. Daarnaast is

reguliere monitoring nodig in doubletten met potentiële risico's om tijdig maatregelen te kunnen nemen.

Het is echter de vraag of een Hand-aan-de-Kraan kan werken voor geothermie gezien het gebrek aan seismiciteit om de modellen te valideren en grenswaarden te bepalen.

#### 4.3.2.2 Monitoring

##### Wetenschappelijke monitoring om inschattingen te valideren

Voor een goede voorspelling van lange termijn effecten, is het noodzakelijk de modelvoorspelling te valideren met metingen in actieve doubletten. Voor deze validatie wordt aanbevolen om geselecteerde doubletten te monitoren, primair om te leren of überhaupt sprake is van seismische activiteit en hoe deze zich verspreidt gedurende exploitatie en als functie van debiet, die seizoensgebonden fluctueert. Dergelijke monitoringssystemen moeten bij voorkeur in staat zijn kleine bevingen ( $M > 1$ ) te kunnen detecteren en hun locatie in 3D nauwkeurig kunnen vaststellen. Aanbevolen wordt om deze monitoring te doen in gebieden waar de kans op thermische spanningsverandering theoretisch groot is en daarbij te toetsen of seismiciteit optreedt.

##### Baseline monitoring en Traffic Light Systems (TLS)

Naast wetenschappelijke monitoring is het noodzakelijk vast te stellen welke eisen van monitoring nodig zijn om substantiële bevingen te kunnen voorkomen. Deze kunnen gedefinieerd worden als functie van ondergrondse gesteldheid en operationele condities en identificatie van het risicoprofiel op basis van modelvoorspellingen. De monitoring is primair bedoeld om te toetsen of bepaalde grenswaarden van magnitudes worden overschreden die samenhangen met de exploitatie van geothermie, en om tijdig maatregelen te nemen.

#### 4.4 Conclusies

Uit bovenstaande uiteenzetting kunnen de volgende conclusies worden afgeleid:

- Er zijn veel internationale modelstudies gedaan naar aardbevingsrisico's van geothermieprojecten in *fracture* gedomineerde reservoirs, voornamelijk gericht op EGS systemen.
- Voor matrix gedomineerde reservoirs kan gebruik gemaakt worden van de fysische modelaanpakken en conceptuele modellen ontwikkeld voor gaswinning, indien deze op een aantal punten worden verbeterd:
  - uitbreiding met thermische effecten.
  - kalibratie van modelparameters.
  - inzicht verkrijgen in eerste orde relatie tussen sterkte van bevingen en maximale versnelling van ondiepe bodem (PGA).
- Daarnaast is het noodzakelijk om de modelvoorspelling te valideren met metingen in actieve doubletten.
- Het is echter de vraag of een Hand-aan-de-Kraan kan werken voor geothermie gezien het gebrek aan seismiciteit om de modellen te valideren en grenswaarden te bepalen.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

38/77

**5. Welke vormen van monitoring zouden kunnen leiden tot beter begrip van het optreden van hogere magnitudes of grondversnellingen bij de verschillende vormen van geothermie? En hoeveel moeite zou zulke monitoring kosten?**

Dit hoofdstuk geeft antwoord op bovenstaande twee vragen. Voor de beantwoording hiervan worden de volgende deelvragen behandeld:

- Welk doel heeft monitoring bij geothermie in het algemeen?
- Welke vormen van monitoring bestaan er?
- Welke rol heeft monitoring in de begripsvorming?
- Hoeveelheid moeite (inspanning en middelen) kost monitoring in geothermie context?

5.1 *Welke vormen van monitoring zouden kunnen leiden tot beter begrip van het optreden van hogere magnitudes of grondversnellingen bij de verschillende vormen van geothermie? En hoeveel moeite zou zulke monitoring kosten?*

#### **5.1.1 Wat is het doel van monitoring?**

Monitoring in het kader van geothermie heeft meerdere doelstellingen.

##### *Afwijkingen detecteren t.o.v. de vastgestelde baseline*

Een van de doelstellingen van monitoring is het in de gaten houden van seismische activiteit in de ondergrond en het waarnemen van afwijkingen vanuit de 'baseline monitoringsfase' (zie paragraaf 5.1.2.2).

##### *Monitoring als middel voor begripsvorming van de ondergrond*

In Nederland worden geen systemen toegepast die het reeds verbroekte reservoir artificieel sterker verbreken om de doorlatendheid te verhogen EGS. In het algemeen is in Nederland dan ook het uitgangspunt dat geothermie geen seismische activiteit opwekt. Eventueel toch waar te nemen seismische activiteit noodzaakt dan ook tot vergroting van het begrip van de ondergrond. Deze (wetenschappelijke) monitoring dient dus ter validatie van het begrip van de ondergrond uit de verkenningsfase en kan aanleiding geven tot vergroting van de kennis van de lokale ondergrond.

#### **5.1.2 De rol van sensoren in de levenscyclus van een geothermieproject**

De rol van sensoren verschilt per fase gedurende de ontwikkeling van een geothermie site. De levenscyclus van een geothermie site kan worden onderverdeeld in 5 fases:

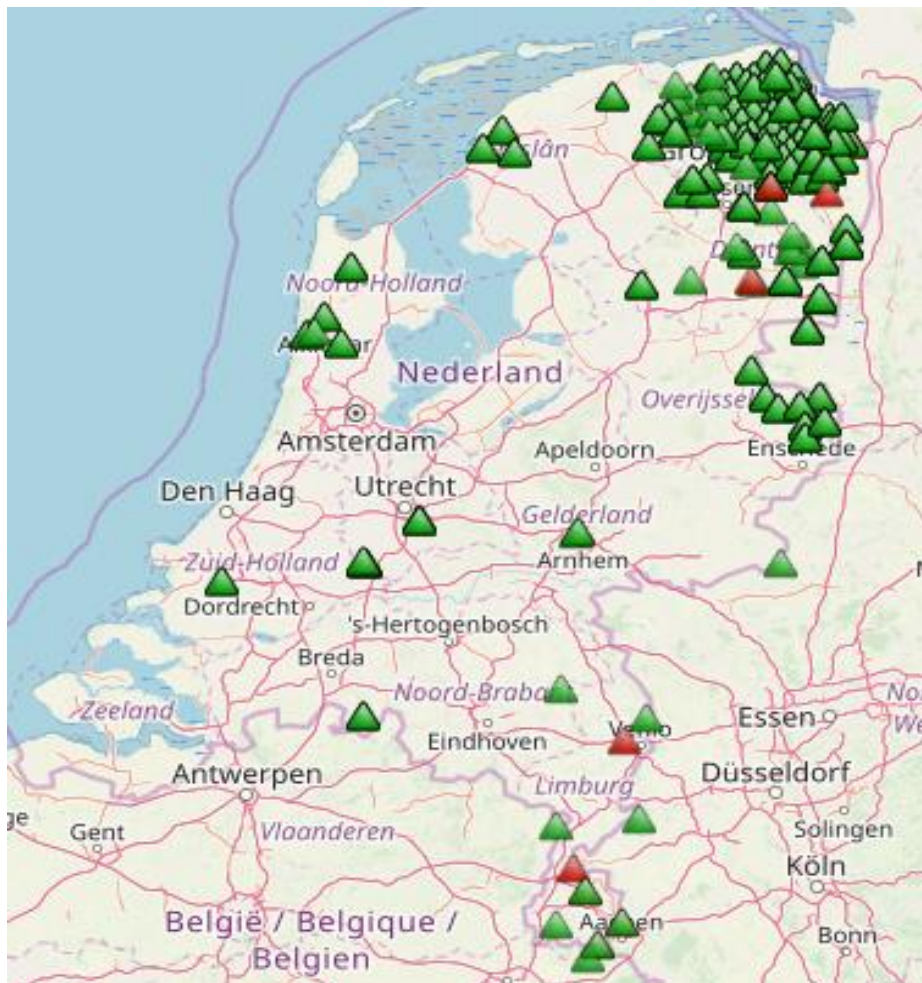
- 1) locatieverkenning
- 2) pre-productie
- 3) uitvoering van boringen
- 4) productie
- 5) post-productie.

De monitoringsdoelstellingen zijn per fase vaak verschillend, hoewel de opzet van de gebruikte sensorsystemen overlappend kan zijn (niet elke fase vraagt een andere inrichting van het sensornetwerk). De seismische monitoring kan worden geplaatst in een overkoepelend monitoring programma, waarbij ook aanvullende reservoirparameters (b.v. temperatuur, druk en spanning) gemonitord worden. Hiermee kan beter begrip worden verkregen van de samenhang tussen productie, reservoir gedrag en seismiciteit, zodat productieplannen geoptimaliseerd kunnen worden. Echter, een nadere beschouwing van een dergelijk overkoepelend meetprogramma valt buiten de doelstelling van dit rapport.

**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
40/77



Figuur 5: Het huidige meetnet van KNMI bestaat uit 15 breedband seismometers, 99 boorgat stations en 97 versnellingsopnemers (bron: KNMI).

#### 5.1.2.1 Fase: locatieverkenning

In deze fase ligt de nadruk op verkenning van een geschikte locatie zonder dat een sensorsysteem wordt geïnstalleerd op een specifieke locatie. Deze fase richt zich vooral op het inzichtelijk krijgen van de aanwezigheid van breuksystemen door het interpreteren van seismische secties in de bredere omgeving van een potentieel toepassingsgebied en evaluatie van de aanwezigheid van eventuele natuurlijke seismiteit op basis van de KNMI registraties.

Het doel van deze fase is vooral het uitvoeren van een geotechnische verkenning naar een geschikte locatie.

In zekere mate is basis monitoring al aanwezig in Nederland in de vorm van het nationale netwerk van het KNMI (Figuur 5). Dit netwerk kan bij geothermie projecten een rol spelen in het vaststellen van grootschalige achtergrondseismiciteit, maar heeft doorgaans niet de gevoeligheid en nauwkeurigheid die nodig is om zwakkere bevingen ( $M < 1,5-2,0$ ) waar te nemen, die kunnen voorkomen bij aardwarmtewinning op lokale schaal.



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

41/77

#### *5.1.2.2 Fase: pre-productie (voor start boring)*

Als uit de verkenningsfase potentieel geschikte locaties zijn gekomen dan volgt een fase van 'baseline monitoring' waarin in een periode van typisch 6 tot 12 maanden lokale ruiscondities en het optreden van mogelijke zwakke natuurlijke seismiciteit wordt vastgesteld om te bepalen wat de minimaal detecteerbare magnitude is gegeven een aanwezige achtergrondruis (Bohnhoff et al., 2018; TNO, 2019; Kraaijpoel et al., 2013). In stedelijke gebieden, met meer achtergrondruis door menselijke activiteit, is het moeilijker om lage magnitudes te registreren, omdat deze overstemd kunnen worden door trillingen veroorzaakt door menselijke activiteit.

Naast het monitoren van de achtergrondruis dient de baseline periode ook voor het vaststellen van aanwezige natuurlijke/tektonische seismiciteit met een hoge optreedfrequentie.

De toegepaste sensorsystemen in deze fase bestaan typisch uit enkele oppervlaktestations, eventueel aangevuld met geofoons in ondiepe boorgaten om een hogere gevoeligheid van het netwerk te kunnen bereiken. De gegevens die in deze fase worden verzameld zijn essentiële input voor het in de productiefase onderscheiden van achtergrond signalen van door geothermie geïnduceerde signalen.

#### *5.1.2.3 Fase: Uitvoering van boringen (pre-productie)*

Als men in de fase is beland dat er overgegaan kan worden tot het zetten van een boring, dan kunnen de sensoren opgesteld tijdens de baseline monitoring fase worden gebruikt (mogelijk aangevuld met een aantal extra sensoren) om het boorproces te monitoren. Boringen hebben mogelijk trillingen tot gevolg. Tijdelijk kunnen dan hogere PGV (*Peak Ground Velocity* – piek trillingssnelheden op maaiveld niveau) waardes toegestaan worden. Na voltooiing van de boring vinden er doorgaans productietesten plaats alvorens er wordt overgegaan tot de productiefase. Bij stimulatie van EGS systemen wordt vaak aanvullende seismische reservoirmonitoring toegepast om inzicht te krijgen in seismogene processen tijdens het stimulatieproces. Dit vergt doorgaans een grotere inspanning om zwakke events tot  $M=2$  te kunnen detecteren.

#### *5.1.2.4 Fase: Productie*

In de productiefase kunnen sensoren uit de baseline monitoring een rol hebben. Zo nodig moet het netwerk worden aangevuld, b.v. in het geval van een "*Traffic Light System* (TLS)" (zie Hoofdstuk 6).

#### *5.1.2.5 Fase: Post-productie*

In de fase na productie dient monitoring om te zien of het reservoir terugkomt in zijn natuurlijke toestand, voor zover het daar al in de productiefase blijktens de monitoring-resultaten vandaan is gekomen.

### 5.1.3 Categorieën geothermie monitoring

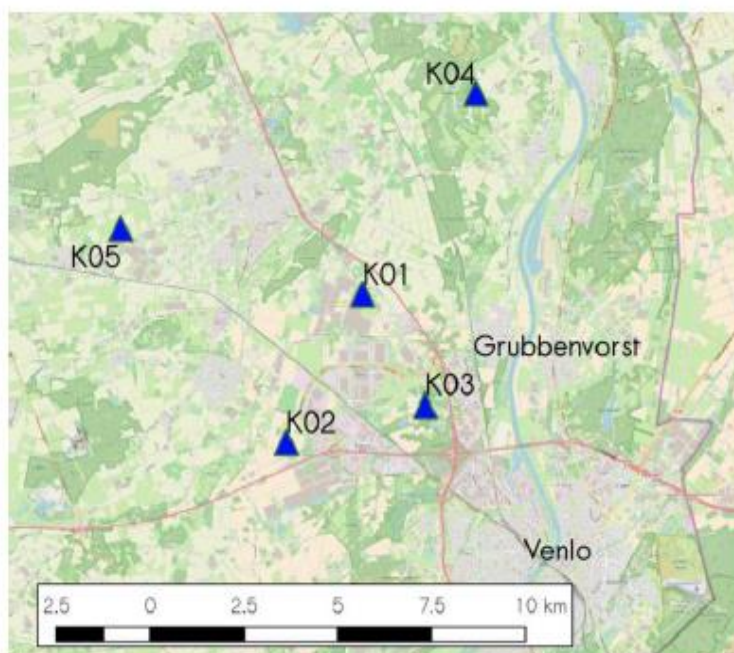
Per geothermieproject wordt een locatie-specifiek monitoringsplan gemaakt omdat een voor dat project noodzakelijke inrichting van het meetnetwerk nodig is. Het ontwerp van het meetnetwerk moet worden afgestemd op de lokale geologie, reservoir-dimensies en de mate van omgevingsruis (e.g. landelijk, stedelijk, industrieel), zodat de gewenste gevoeligheid en nauwkeurigheid voor het waarnemen en duiden van seismiciteit kan worden bereikt. De inrichting van het meetnetwerk (zoals de verdichting of verdunning van sensoren) kan gedurende een geothermieproject worden aangepast indien de waarnemingen aangeven dat hier noodzaak toe is.

Hier zijn 3 categorieën van sensornetwerken te onderscheiden (TNO, 2019), die gaan van relatief eenvoudig tot uitgebreid en ook toenemen in de kosten en inspanning die er mee gepaard gaan.

1. Toepassing van sensoren op maaiveld niveau (€)
2. Sensoren in ondiepe boorgaten (tot een maximum van 200m) (€ €)
3. Sensoren op reservoirniveau (€ € €)

Naast het type meetsysteem zijn de kosten sterk afhankelijk van de dichtheid van het meetgrid (aantal sensoren per oppervlakte). Het gewenste meetnetwerk kan ook uit een combinatie van de 3 categorieën bestaan.

Een voorbeeld van in Nederland toegepaste categorie 1 monitoring (alleen maaiveld sensoren) is de geothermie locatie Venlo/Californië (Figuur 6) (Spetzler, Ruigrok, Dost, & Evers, 2018). Bij geothermieprojecten in Nederland wordt momenteel geen categorie 2 of 3 monitoring toegepast.



Figuur 6: Toepassing van 5 maaiveld sensoren op de geothermie locatie Venlo/Californië (bron: KNMI).

**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

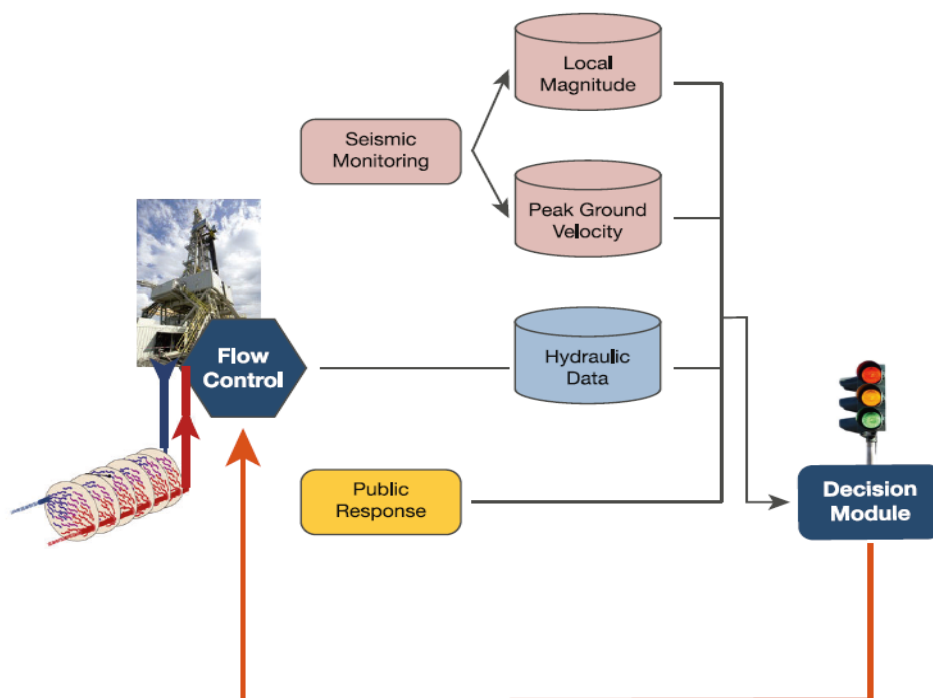
**Blad**  
43/77

#### 5.1.4 Verkeerslichtsysteem (TLS) als beheersinstrument

Geothermische projecten die, volgens de huidige methodiek voor de Seismisch Risico Analyse (Hoofdstuk 6), in Level-2 of Level-3 wordt geschaald dienen een verkeerslichtsysteem (TLS - Traffic Light System) toe te voegen aan de sensorsystemen. Een TLS wordt ingericht aan de hand van het vooronderzoek uit de "baseline fase". Een uitwerking van een TLS is weergegeven in Figuur 7.

Een TLS werkt op basis van vastgestelde drempelwaarden voor te meten parameters, ontleend aan acceptabele trillingsnormen. Meestal zijn PGV en Magnitude onderdeel van een TLS, samen met waarnemingen van burgers. Eventueel kan dit worden uitgebreid met de frequentie van optreden van bevingen binnen een tijdsperiode (i.e. seismicity rate).

Er bestaan ook adaptieve TLS (ATLS) systemen (Hirschberg et al., 2015) die in combinatie met modellen en probabilistiek (om onzekerheden te wegen) ook een voorspellende component bevatten. Deze combinatie wordt vaak gebruikt bij vormen van geothermie waarbij seismische activiteit wordt gebruikt om de doorlaatbaarheid te stimuleren (nog niet toegepast in Nederland).



Figuur 7: Traffic Light System (TLS). Bron: Figure 126a uit (Hirschberg, Wiemer, & Burgherr, 2015).

**Datum**  
2 april 2020

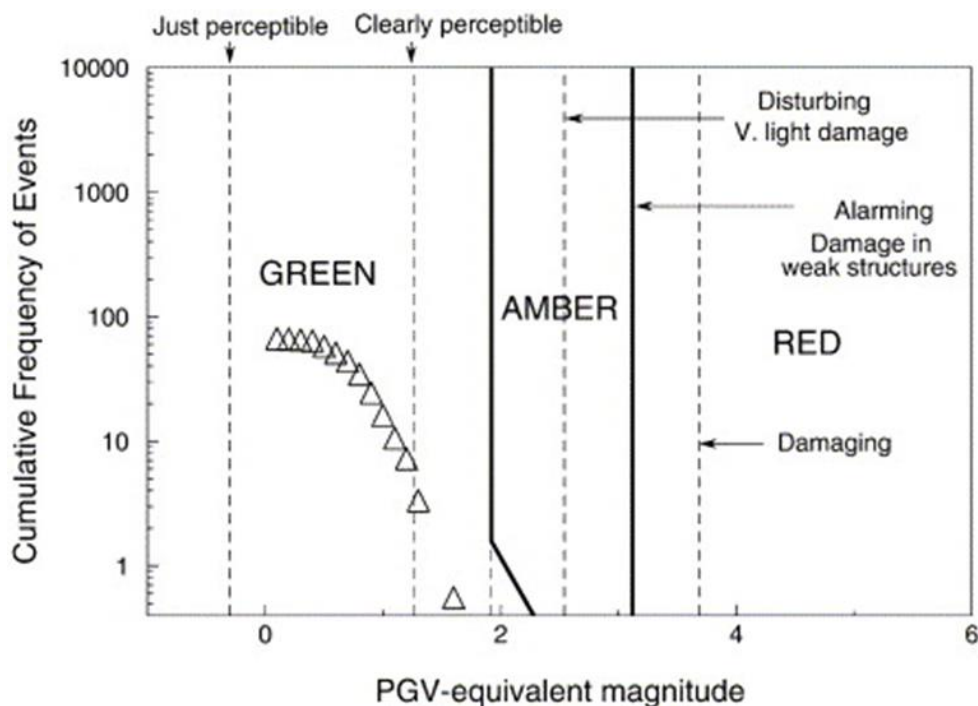
**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
44/77

#### 5.1.4.1 Menselijke waarneming van trillingen versus schade domein

PGV (*Peak Ground Velocity*) is als parameter vaak onderdeel van TLS-systemen omdat die een duidelijk verband heeft met bovengrondse schade. Menselijke waarnemingen van trillingen en het optreden van trillingen of PGV houden niet direct verband met elkaar. Mensen zijn gevoelig voor trillingen van hogere frequenties. Gebouwen krijgen juist meer schade bij lagere frequenties. Hogere frequenties geven dus minder schade, terwijl mensen deze trillingen veel meer voelen. Figuur 8 geeft verschillende trillingsgebieden aan in context van een toegepast TLS-systeem (Bommer et al., 2006). In de groene zone (geen verandering in het TLS-systeem) kunnen trillingen goed waarneembaar zijn door de mens, terwijl de kans op schade heel laag is.

Figuur 9 geeft de menselijke waarneming van trillingen uitgedrukt in trillingsfrequentie – en trillingspiekwaarde (rode lijnen). De blauwe lijnen geven aan bij welke pieken en frequenties (cosmetische) schade aan muren verwacht kan worden.

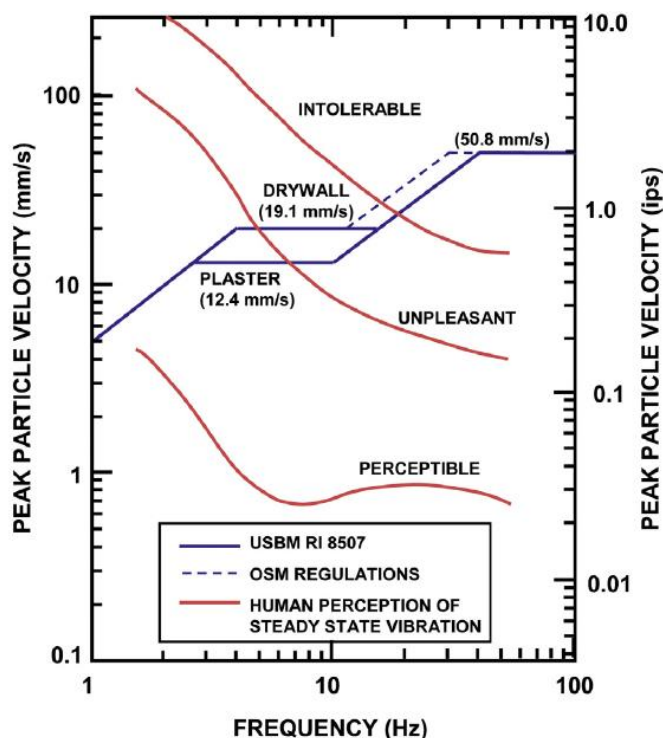


Figuur 8: TLS systeem zoals ontworpen voor een specifiek geothermieproject op basis van piek snelheidswaarde (PGV). De driehoeken in de figuur staan voor pompactiviteit (Bommer et al., 2006).

Datum  
2 april 2020

Onze referentie  
AGE 20-10.036

Blad  
45/77



Figuur 9: De rode lijnen geven de menselijke waarneming aan van trillingen uitgedrukt in trillingsfrequentie en -pieksnelheid aan, de blauwe lijnen geven de ondergrens aan vanaf welke trillingsniveau en schade aan muren is te verwachten (Rutqvist, Cappa, Rinaldi, & Godano, 2014).

#### 5.1.4.2 Overwegingen bij het gebruik van een TLS

Een verkeerslichtsysteem moet gezien worden als een methode om seismische risico's te verminderen, maar kan geen garantie geven dat bevingen altijd onder een bepaalde magnitude waarde zullen blijven. Het bepalen van grenswaarden voor parameters binnen verkeerslichtsystemen is niet altijd eenduidig en is afhankelijk van de specifieke locatie. Wanneer grenswaarden conservatief worden opgelegd in een verkeerslichtsysteem, zal er bij het optreden van relatief zwakke bevingen al direct worden overgegaan tot een wijziging in het productieplan, waarmee de kans op het voorkomen van zwaardere bevingen wordt verkleind en overlast op de omgeving wordt beperkt. Dit kan weer ten goede komen aan de publieke acceptatie van geothermie. Aan de andere kant kan een conservatief ingesteld verkeerslichtsysteem op korte termijn een remmende werking hebben op het commerciële succes van een specifiek geothermieproject (Wiemer et al., 2017, TNO, 2019).

In dichtbevolkte gebieden is het waarschijnlijker dat seismiciteit wordt gevoeld door mensen en tot overlast kan leiden, en daarom is het aan te raden om hier met een conservatievere instelling van het verkeerslichtsysteem te werken.

Bij het optreden van geïnduceerde seismiciteit kan een TLS een adequate beheersmaatregel zijn, maar dat geldt niet wanneer seismiciteit getriggerd is. In het geval van getriggerde seismiciteit kan een breukoppervlak geactiveerd worden dat groter is dan de invloedssfeer van druk- en temperatuurveranderingen. Daarnaast zou een kleine aardbeving in theorie ook een serie aardbevingen kunnen triggeren, waaronder mogelijk bevingen met hogere magnitudes.

### 5.1.5 Beantwoording van de vraag

Afhankelijk van het doel van seismische monitoring is een beantwoording van bovenstaande vraagstelling langs twee richtingen mogelijk:

1) *Doel: Afwijkingen detecteren t.o.v. de vastgestelde baseline*

Bij het waarnemen van alleen hoge magnitudes (en dus hogere grondversnellingen/PGV's), die afwijken van de 'baseline monitoringsfase', kan er relatief eenvoudig worden gemonitord. Mogelijk is het landelijk meetnet van KNMI hier voldoende voor.

2) *Doel: Monitoring als middel voor begripsvorming van de ondergrond*

Bij het waarnemen van lagere magnitudes om daarmee een trend vast te stellen die mogelijk aanleiding geeft tot een verwachting van een hogere magnitude aardbeving (Gutenberg-Richter relatie) kost monitoring meer inspanning in termen van tijdsduur en kosten.

Geothermieprojecten zullen doorgaans in de nabijheid van bebouwde gebieden worden gerealiseerd, omdat hier doorgaans de grootste vraag is. In bebouwde gebieden vergt het kunnen meten van lagere magnitude bevingen vaak meer inspanning vanwege de verhoogde omgevingsruis door menselijke activiteit. Om in een omgeving met verhoogde omgevingsruis toch lagere magnitudes te kunnen detecteren, kan het daarom nodig zijn om sensoren zowel aan het oppervlak als op diepte te installeren (zie monitoringscategorieën 1, 2, en 3).

Geothermische projecten die, volgens de huidige methodiek voor de Seismisch Risico Analyse (Hoofdstuk 6), in Level-2 of Level-3 worden geschaald dienen een verkeerslichtsysteem (TLS) toe te voegen aan de sensorsystemen. Een TLS wordt ingericht aan de hand van het vooronderzoek uit de "baseline fase".

### 5.1.6 Mogelijke verbetering door inzet moderne monitoringinstrumenten

Naast het gebruik van gestandaardiseerde seismische sensoren kan eventuele uitbreiding van monitoringnetwerken met nieuwe sensortypes uitkomst bieden in de nabije toekomst. Recente studies hebben de potentie van zogenaamde 'Distributed Acoustic Sensing systems' (DAS) aangetoond (Lindsey et al., 2017; Jousset et al., 2018), evenals het gebruik van goedkope 'Micro-ElektroMechanische Systeem' sensoren (MEMS, Dominquez et al., 2015). DAS-glasvezel systemen zijn relatief goedkoop en kunnen buiten de *casing* van de putten geplaatst worden. Vormveranderingen van de kabel als gevolg van trillingen (zoals aardbevingen) kunnen met een dicht interval tot 1 m langs de kabel worden gemeten. De mate van koppeling van de DAS-kabel met de omringende formatie is bepalend voor de kwaliteit van de metingen. Voorbeelden hiervan zijn het globale Quake Catcher netwerk (<http://quakecatcher.net/>) en het regionale Omnidots netwerk in Groningen (<https://www.omnidots.com/nl>). Uitbreiding van hoogwaardige geïnstumenteerde meetnetwerken met goedkopere sensortypes kan in principe tot een completere databedekking van een geothermische locatie zorgen. Hierbij is het van belang dat de signaal-ruis verhouding van de sensoren acceptabel blijft door ze goed te positioneren en te koppelen met de ondergrond.

**6 Geven de antwoorden op bovenstaande vragen aanleiding tot de conclusie dat er aanpassingen wenselijk zijn in de gangbare uitvoering van een seismische risico analyse (SRA) voor geothermie? En zo ja, welke aanpassingen?**

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

47/77

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op bovenstaande vraag. Als eerste wordt beschreven wat de huidige Seismisch Risico Analyse (SRA) is en in Bijlage 2E wordt deze in meer detail beschreven.

Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste bevindingen uit een analyse van deze SRA-methodiek, uitgevoerd door TNO in 2018, en uit de antwoorden op bovenstaande vragen.

De bevindingen leiden tot conclusies en aanbevelingen ter verbetering van de huidige methodiek.

Een meer gedetailleerde beschrijving van de resultaten van de analyse van de SRA methodiek door TNO gegeven in Bijlage 2E.

6.1 *Geven de antwoorden op bovenstaande vragen aanleiding tot de conclusie dat er aanpassingen wenselijk zijn in de gangbare uitvoering van een Seismisch Risico Analyse (SRA) voor geothermie?*

### 6.1.1 Huidige seismisch risico analyse

Er bestaat een SRA voor de gaswinning in Nederland (leidraad Staatstoezicht op de Mijnen, SodM (2016)), maar deze is, in zijn huidige vorm, niet geschikt voor geothermie omdat de mechanismen die een beving kunnen veroorzaken verschillend zijn (Bijlage 2C). Er bestaan nog geen SRA-richtlijnen die opgenomen zijn in het wettelijk kader en die gebruikt kunnen worden bij bijvoorbeeld de indiening van een winningsplan geothermie.

De op dit moment gebruikte SRA-methodiek, geïncorporeerd in het tijdelijk beleid voor aanlevering en behandeling van winningsplannen geothermie, is in 2016 opgesteld door Qcon en IF Technology (Baisch et al., 2016). Het rapport van Baisch et al. (2016) is opgesteld met als doel om de basis te vormen voor een SRA-geothermie voor Nederland (pers. communicatie Qcon).

Er is geen generieke SRA-methodiek voor geothermie in het buitenland gevonden. Wel zijn er locatie-specifieke procedures en "*best practices*" geïdentificeerd.

#### *Terminologie "seismisch risico"*

Seismisch risico in algemene zin is het gevolg van de seismische dreiging in termen van kans op overlijden, kans op schade aan gebouwen en infrastructuur, maar ook economische schade of milieuschade.

Er zijn verschillende parameters, die samen het seismisch risico bepalen:

1. Seismiciteit / aardbeving: het ontstaan van een beving in de diepe ondergrond met een bepaalde sterkte op de schaal van Richter.
2. Seismische dreiging (Seismic Hazard): de grondbeweging die eens in de 475 jaar kan optreden. Voornamelijk wordt in de SRA-methodiek de kans op optreden semi-kwantitatief ingeschat (Baisch et al., 2016).
3. Grondbeweging (Peak Ground Acceleration/Velocity PGA/V): de mate waarin het maaiveld beweegt door een aardbeving. Deze grondbeweging is afhankelijk van de diepte van de aardbeving, de sterkte van de aardbeving en de gesteentelagen waar de aardbevingsgolf doorheen gaat. Afhankelijk van de opbouw en eigenschappen van de ondiepe ondergrond kan de aardbevingsgolf lokaal worden versterkt of verzwakt en zodoende een sterke of juist zwakkere beweging van de ondiepe bodem veroorzaken (*site response*). De beweging aan het aardoppervlak kan schade veroorzaken. De mate van schade is bijvoorbeeld afhankelijk van de aard en sterkte van de gebouwen .

In de praktijk wordt in de beleving van TNO seismiciteit, seismische dreiging en 'seismisch risico' door elkaar gebruikt.



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

49/77

### **6.1.2 Bevindingen**

Een uitgebreid overzicht van de bevindingen per vraag in de Quick-Scan (onderdeel van Level 1 van de SRA methodiek van Qcon en IF Technology) is gegeven in Bijlage 2E. Samengevat zijn die bevindingen:

#### *Eenduidigheid: Definities, drempelwaarden & multi-parameter score-classes*

Uit de gebruikstest, waarbij verschillende kundige personen een aantal projecten heeft geëvalueerd, bleek dat de uitkomsten van de Quick-scan verschillend waren. Een van de redenen is dat de verschillende personen de te classificeren elementen anders definiëren. Bijvoorbeeld de definitie/omschrijving van een natuurlijke breuk voor deze specifieke toepassing. In Hoofdstuk 2 wordt gesteld dat er een minimaal breukoppervlak nodig is om tot een bepaalde magnitude beving te komen. Een tweede is dat de kwalitatieve tot semi-kwantitatieve klassegrenzen op een andere manier worden ingevuld. Bijvoorbeeld de hoeken van de breuk ten opzichte van het spanningsveld. Een derde is dat bij een aantal Quick-scan scores twee of meer elementen tesamen of separaat moeten worden beoordeeld om in een scoreklasse te landen. Niet alle multiparameter combinaties zijn geannoteerd met een scorewaarde. Daarnaast blijkt de kwaliteit van de seismische data ook relevant voor de “Druk communicatie tussen de productie en injectieput(ten)” en dit zou derhalve ook als aparte vraag in de beslisboom opgevoerd moeten worden.

#### *Onderlinge afhankelijkheid scoringscriteria*

Er zijn negen toetsingscriteria in het Quick-scan scoringsschema, waarbij bij sommige criteria ook nog sub-criteria zijn geïncorporeerd. Een aantal van deze criteria zijn (deels) afhankelijk van elkaar, bijvoorbeeld injectiedruk en debiet. Daarnaast lijkt het de bedoeling de verschillende criteria onafhankelijk van elkaar te scoren en niet een afhankelijkheid tussen bijvoorbeeld de score bij “de breukrichting ten opzichte van het spanningsveld” te combineren met de scoring “afstand tot natuurlijke breuken”. Er is gebleken in de gebruikstoetsing dat dit wel een neiging van de gebruikers is, hetgeen resulteert in verschillen in de scoring en dus seismisch potentieel.

#### *Redundantie*

Er komen vragen in de beslisboom voor die ook in een bepaalde vorm onderdeel zijn van de Quick-scan vragen. Bijvoorbeeld seismisch actief gebied van de Roerdalslenk en afstand tot natuurlijke seismiteit of nabij Groningen gasveld en nabijheid geïnduceerde seismiteit.

#### *Invloed koudwaterbel op breuk*

In Hoofdstuk 2 en 3 van deze rapportage wordt gesteld dat de geomechanische eigenschappen van een breuk beïnvloed worden door afkoeling als het afgekoelde injectiewater de breuklocatie heeft bereikt. Dit thermische effect wordt niet in de methodiek meegenomen.

#### *Project maturiteit: exploratie- vs productiefase*

De Quick-scan score systematiek lijkt ontworpen voor een “pre-drill assessment” en limiteert zich tot data, informatie en kennis die beschikbaar is tijdens de exploratiefase van een geothermieproject. Deze informatie is op het moment van

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

50/77

de aanvraag voor een opsporingsvergunning in het algemeen zeer beperkt verwerkt. De SRA zou dus op een hoog abstractieniveau adequaat uitgevoerd moeten kunnen worden, rekening houdend met veel onbekenden en onzekerheden. In de laatste stap van de exploratiefase, voordat er geboord gaat worden, is er al veel meer geanalyseerd en kan op grond van bijvoorbeeld de geologische onderbouwing van het boorplan, een SDE+ aanvraag of een garantiefonds aanvraag een veel betere inschatting gemaakt worden van het seismisch potentieel. Dit is een essentieel deel van de evaluatie om tot een "mature" producerend geothermieproject te komen. Daarna, in de productiefase of bij de start daarvan, zijn er al twee of meer putten geboord en is er lokale reservoirinformatie beschikbaar (bijvoorbeeld in het kader van het winningsplan geothermie), onder meer in de vorm van puttesten en mogelijk interferentietesten of zelfs een circulatietest. Op basis van de locatie specifieke informatie valt veel meer te zeggen over bijvoorbeeld de "hydraulische connectiviteit" en "het lokale spanningsveld". Deze data en informatie kan eventueel uitwijzen dat bepaalde toetsingscriteria overbodig zijn, *overruled* kunnen worden door een alternatieve analyse of dat een andere SRA-methodiek nodig is. Door de Quick-scan ook geschikt te maken voor wanneer er meer data beschikbaar is in de vorm van datadichtheid of datatype kan er beter onderscheid worden gemaakt in het dreiging- en risiconiveau van een geothermieproject. Hierdoor wordt de doelmatigheid van de SRA verhoogd.

#### *Monitoringstrategie*

De strategie die voor Level-2 en -3 wordt voorgesteld komt grotendeels overeen met de elementen genoemd in Hoofdstuk 5 van deze rapportage.

### **6.1.3 Conclusie**

Op basis van de analyse van de gangbare SRA-methodiek en de antwoorden op de eerder gestelde vragen kan het volgende worden geconcludeerd:

1. TNO-AGE ziet in de methodiek van Qcon en IF Technology een goede stap om tot een bruikbare *Seismic Risk Assessment* (SRA) geothermie te komen.
2. Bevindingen uit de bovenstaande vragen, alsmede een toepassingsevaluatie van de Q-Con en IF SRA-methodiek, geven aanleiding tot aanpassing van de huidige SRA-methodiek. Hierbij zou de ambitie moeten zijn dat die eenduidiger, ondubbelzinniger en beter praktisch uitvoerbaar wordt. Daarnaast zou er ook rekening gehouden moeten worden met de hoeveelheid en aard van relevante gegevens, gerelateerd aan de maturiteit van het project in het traject van exploratie naar productiestadia.

### **6.1.4 Aanbevelingen**

Het rapport van Baisch et al. (2016) vormt een goede basis om een generieke SHRA voor geothermie op te stellen. De voorstellen voor aanpassing zijn:

- Beter en strakker definiëren van de te scoren parameters. Dit bevordert de eenduidigheid.
- Het tabellieren van de combi-parameters, waarbij de parameters de rij- en kolomkoppen vormen en de relevante scores in de kruisende vakken wordt

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

51/77

geplaatst. Dit draagt bij aan het overzicht en zorgt dat geen combinatie vergeten wordt.

- Het presenteren van kaarten voor: top kristallijn *basement*, invloedssfeer Groningen veld, seismisch actieve gebied Roerdalslenk en spanningskaart Nederland zal de eenduidigheid van de analyses ten goede komen.
- Het her-evalueren van de partiële redundantie tussen de beslisboomvragen en de Quick-scan vragen.
- Het uit elkaar trekken van de multiparameter scoreklassen.
- Trachten een kwalitatieve beoordeling van “breukoriëntatie in het spanningsveld” te vervangen door een semi-kwantitatieve.
- Seismiciteit “key parameters”, zoals hydraulische connectiviteit, eenduidig noemen en, afhankelijk van de maturiteit van het geothermieproject, die benaderen met afgeleide parameters zoals gebruikt in Baisch et al. (2016). Of gebruik maken van locatie specifieke datasets die direct aan de connectiviteit gerelateerd zijn, zoals een interferentietest of circulatietest.
- Overwegen of de methode van scoring wel de meest adequate is omdat een aantal key-parameters die in de scoringstabel worden genoemd, net als de eerste drie vragen in de beslisboom, direct het project als een “Level-2” seismisch potentieel classificeert.
- Het incorporeren van de beïnvloeding van een natuurlijke breuk, indien die in het bereik van de koudwaterbel komt.
- Het seismisch potentieel van de ongeconsolideerde sedimenten van de Noordzee Groep is nihil. Het valt te overwegen projecten in deze geothermische *play* sneller door de beslisboom te laten lopen door hiervoor een specifieke vraag voor op te stellen.

## Referenties

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

52/77

Baisch, S., Koch, C., Stang, H., Pittens, B., Drijver, B., Buik, N., 2016. Defining the framework for Seismic Hazard assessment in Geothermal Projects V0.1, Technical report. Opgesteld door Qcon GmbH en IF Technology voor de KennisAgenda Aardwarmte.

Bohnhoff, M., Malin, P., Heege, J. t., Deflandre, J., & Sicking, C., 2018. Suggested best practice for seismic monitoring and characterization of non-conventional reservoirs *First Break*, 36 (2), 59.

Bommer, J. J., Oates, S., Cepeda, J. M., Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., ... Rivas, J., 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology*, 83(4), 287–306. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.11.002>

Candela, T., Wassing, B., ter Heege, J., & Buijze, L., 2018. How earthquakes are induced. *Science*, 360 (6389), 598-600.

De Crook, Th., 1996. A seismic zoning map conforming to Eurocode 8, and practical earthquake parameter relations for the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 75: 11 – 18.

Diehl, T., Kraft, T., Kissling, E., & Wiemer, S., 2017. The induced earthquake sequence related to the St. Gallen deep geothermal project (Switzerland): Fault reactivation and fluid interactions imaged by microseismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (9), 7272-7290.

Dominguez, L.A., Yildirim, B., Husker, A.L., Cochran, E.S., Christensen, C.M., Cruz-Atienza, V.M., and Lawrence, J.F., 2015. The Red Atrapa Sismos (Quake Catcher Network in Mexico): Assessing performance during large and damaging earthquakes, *Seis. Res. Letts.*, 86, 848-855.

EBN, DAGO, Stichting Platform Geothermie, Stichting Warmtenetwerk, 2018. Masterplan Aardwarmte in Nederland.

Frederiksen, S., Nielsen, S. B., & Balling, N., 2001. A numerical dynamic model for the Norwegian–Danish Basin. *Tectonophysics*, 343 (3-4), 165-183.

Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. M., & Zhang, P., 1999. The GSHAP Global Seismic Hazard Map. *Annals of Geophysics*, 42 (6).

Hirschberg, S., Wiemer, S., & Burgherr, P., 2015. Energy from the Earth Energy from the Earth Deep Geothermal as a Resource. <https://doi.org/10.3218/3655-8>

Houtgast, G., 1991. Catalogus Aardbevingen in Nederland – Royal Neth. Meteor. Inst. (KNMI) De Bilt, publ. 179: 166.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

53/77

Jousset, P., Reinsch, T., Ryberg, T., Blanck, H., Clarke, A., Aghayev, R., Hersir, G. P., Hennings, J., Weber, M. and Krawczyk, C.M., 2018. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features, *Nature Communications* **9**, 2509.

KNMI & TNO-AGE, 2017. Definitie, bepaling en functie maximale magnitude in seismische hazard bepaling. AGE 17-10.058.

Koninklijke Sterrenwacht van België1. Datum: 18-02-2019.

<http://seismologie.be/nl/seismologie/aardbevingen-in-belgie/dn1lx6g1k>.

Koninklijke Sterrenwacht van België2. Datum: 18-02-2019.

<http://seismologie.be/nl/seismologie/aardbevingen-in-belgie/xq18x7rm3>.

Koninklijke Sterrenwacht van België3. Datum: 18-02-2019.

<http://seismologie.be/nl/seismologie/aardbevingen-in-belgie/pgm94ld2d>.

Kraaijpoel, D., Kraft, T., Tramelli, A., De Natale, G., Troise, C., Orazi, M., Jupe, A, 2013. GEISER Deliverable D6.2 - Seismic Monitoring Strategies. INGV, ETHZ, BRGM, NORSAR, KNMI.

LIAG, 2018. Untersuchung der Seismizität am Standort des Geothermieprojekts Poing unter Einbeziehung von Strukturgeologie, Geohydraulik, Hydrochemie, Geomechanik und Dublettenbetrieb. Zusammenfassung , Hannover: LIAG (Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik).

Lindsey N.J., Martin, E.R., Dreger, D.S., Freifeld, B., Cole, S.R., James, S. Ajo-Franklin, J.B., 2017. Fiber-optic network observations of earthquake wavefields. *Geophysical Research Letters*, **44**, 11,792–11,799. <https://doi.org/10.1002/2017GL075722>.

Majer, E., Nelson, J., Robertson-tait, A., Savy, J., & Wong, I. (2012). Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. Report No. DOE/EE-0662, U.S. Department of energy.

Mechelse, E. 2017. The in-situ stress field in the Netherlands: Regional trends, local deviations and an analysis of the stress regimes in the northeast of the Netherlands. MSc thesis, TU Delft & EBN.

Megies, T., & Wassermann, J., 2014. Microseismicity observed at a non-pressure-stimulated geothermal power plant. *Geothermics*, **52** , 36-49.

Moeck, I. S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **37** , 867-882.

NAM, 2019. Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field – update for Production Profile GTS (raming 2019).

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

54/77

Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., & Heidbach, O., 2010. Present-day stress orientation in the Molasse Basin. *Tectonophysics*, 482 (1), 129-138.

Rutqvist, J., Cappa, F., Rinaldi, A. P., & Godano, M., 2014. Modeling of induced seismicity and ground vibrations associated with geologic CO<sub>2</sub> storage, and assessing their effects on surface structures and human perception. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 24, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.02.017>

Seibt, P., Kabus, F., & Hoth, P., 2015. The Neustadt-Glewe geothermal power plant—practical experience in the reinjection of cooled thermal waters into sandstone aquifers. *Proceedings World Geothermal Congress, Antalya (Turkey)*.

Spetzler, J., Ruigrok, E., Dost, B., & Evers, L., 2018. Hypocenter Estimation of Detected Event near Venlo on September 3rd.

SodM, 2016. Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning.

TNO, 2004. Deterministische Hazard Analyse voor Geïnduceerde Seismiciteit in Nederland. NITG 04-171-C.

TNO, 2012. Deterministische Hazard Analyse voor Geïnduceerde Seismiciteit in Nederland (update). TNO 2012 R10198.

TNO, 2014. Geologische evaluatie potentieel gasvoerende schalielagen: karakterisatie van breuken en afdekkend pakket. TNO 2014 R10599.

TNO, 2019. Seismicity in geothermal projects. Concept version 15 January 2019. TNO 2019 R100043.

Van Thienen-Visser, K., & Breunese, J., 2015. Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. *The Leading Edge*, 34 (6), 664-671.

Wiemer, S., Kraft, T., Trutnevyte, E., & Roth, P., 2017. “Good Practice” Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland. Report, Zürich: Swiss Seismological Service. Doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000254161>.

Zang, A., Oye, V., Jousset, P., Deichmann, N., Gritto, R., McGarr, A., Majer, E., Bruhn, D., 2014. Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs – an overview. *Geothermics*, 52, 6-21.

Zoback, M.D., and Gorelick, S.M., 2012. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 109. 10164-8. [10.1073/pnas.1202473109](https://doi.org/10.1073/pnas.1202473109).

# Begrippenlijst

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

55/77

## **Aquifer**

Een watervoerende, poreuze en goed doorlatende gesteentelaag.

## **(Kristallijne) Basement**

(Kristallijne) Moedergesteente waarop gedurende de geologische geschiedenis sedimenten kunnen zijn afgezet.

## **Breukrugositeit**

De "ruwheid" van een breukoppervlak. Deze zorgt voor een grotere weerstand tegen het verschuiven van een breuk en voor meer wrijving tijdens een dergelijke verschuiving.

## **Competent**

Een competent gesteente is een "hard" gesteente dat goed bestand is tegen erosie.

## **Conductie**

Transport van warmte via geleiding.

## **Convectie**

Transport van warmte door beweging van een bepaald materiaal (in dit geval water). Dit mechanisme kan optreden door temperatuurverschillen, die leiden tot een verschil in dichtheid en vervolgens een opwaartse beweging van het warmere materiaal.

## **Creep**

Geleidelijke a-seismische schuif langs breuken.

## **Debiet**

Hoeveelheid water die per tijdseenheid wordt geproduceerd.

## **Differentiële compactie**

Situatie waarbij de mate van compactie verschilt. Bijvoorbeeld in lateraal opzicht, wanneer compactie aan de ene kant van een breuk hoger is dan in het breukblok aan de andere kant van de breuk.

## **Doublet**

Geothermisch systeem met twee putten, een productieput en een injectieput.

## **EGS**

Met de afkorting EGS kan zowel een Enhanced Geothermal System als een Engineered Geothermal System worden bedoeld. In geval van een Enhanced Geothermal System is de permeabiliteit van het reservoir, die al in beperkte mate aanwezig was, verbeterd door stimulatie-acties. In geval van een Engineered Geothermal System is door stimulatie-acties permeabiliteit gecreëerd in een gesteente dat van origine non-permeabel was. In deze rapportage wordt geen onderscheid gemaakt tussen beide vormen wanneer over EGS wordt gesproken.

## **Event-rate**

De regelmaat waarmee een bepaalde gebeurtenis optreedt.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

56/77

## **Fracture**

In deze rapportage wordt hieronder verstaan: breuken en scheuren in een gesteente met een zeer klein verzet, welke over het algemeen “open” zijn en voor een verbeterde doorstroming van water zorgen.

## **Geothermieproject**

Ontwikkeling van geothermie in een bepaald gebied. Een geothermisch project kan bestaan uit meerdere geothermiesystemen.

## **Geothermiesysteem**

Een geothermie-installatie bestaande uit een of meerdere productieputten en een of meerdere injectieputten, waarbij via één zoutwater-circuit met elkaar in verbinding staan.

## **Grondversnelling**

De mate waarin het maaiveld beweegt door een aardbeving. Deze grondversnelling is afhankelijk van de diepte van de aardbeving, de grootte van de aardbeving en de gesteentelagen waar de aardbevingsgolf doorheen reist. Afhankelijk van de aard van de ondiepe ondergrond kan de aardbevingsgolf lokaal worden versterkt of verzwakt en zodoende een sterke of juist zwakkere beweging van de ondiepe bodem veroorzaken (site response is een technische term hiervoor). De beweging aan het aardoppervlak kan schade veroorzaken.

## **Hydraulische connectiviteit**

Als er connectie is tussen het water in verschillende gebieden binnen een aquifer. Hierdoor, en door een opgelegd drukverschil, is stroming van water van het ene gebied naar het andere mogelijk.

## **Karst**

Holtes in de ondergrond, ontstaan door de oplossing van kalksteen in vers water dat, voornamelijk langs reeds bestaande breuken en spleten, door het gesteente stroomt.

## **Karteerbare breuk**

Een breuk in de ondergrond, die geïdentificeerd en ingetekend kan worden o.b.v. seismiek. Of een breuk zichtbaar is in de seismiek hangt o.a. af van de breuklengte, het verzet en de kwaliteit van de seismiek.

## **Matrix**

In dit document wordt het woord “matrix” gerelateerd aan de wijze van stroming van water door een reservoir. Water kan stromen door breuken of spleten in het reservoir, of door de ruimtes tussen de korrels (porositeit) van het gesteente zelf, ook wel de matrix genoemd.

## **Play (type)**

Gebied waarbinnen de tektonische setting en geologie grotendeels vergelijkbaar zijn.

## **Rupture**

Abrupte breukvorming die leidt tot seismiciteit.



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

57/77

### **Seismiciteit**

Het ontstaan van een aardbeving in de diepe ondergrond doordat twee blokken gesteente schoksgewijs langs een breukvlak langs elkaar bewegen. De aardbeving/schokgolf heeft een bepaalde sterkte die vaak in een getal op de schaal van Richter wordt uitgedrukt. Er zijn ook andere aardbevingsschalen zoals de intensiteit of Mercalli schaal.

### **Seismische dreiging**

De grondversnelling (Peak Ground Acceleration PGA) die eens in de 475 jaar kan optreden.

### **Seismisch potentieel**

Waarschijnlijkheid van het voorkomen van seismiciteit.

### **Seismische slip**

Bewegingen langs een breuk die seismiciteit veroorzaken.

### **Spanningstoestand**

Het samenspel van spanningen in verschillende richtingen op een bepaald gebied of element (breuk) in de ondergrond.

### **Stressverandering**

Drukveranderingen in de ondergrond.

### **Stromingsregime**

Wijze waarop water door een formatie stroomt. Dat kan o.a. via breuken en/of *fractures*, of via het matrixgesteente.

### **Verzet**

De afstand langs een breuk waarmee een breukblok is verplaatst t.o.v. een naastgelegen breukblok.

### **(Kritisch) Voorgespannen breuk**

Breuken in de ondergrond die door natuurlijk tektonische processen reeds onder spanning zijn komen te staan. In het geval een breuk kritisch voorgespannen is, kan een relatief kleine spanningsverandering leiden tot het verschuiven van de breuk en dus een aardbeving.

**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
58/77

## Bijlage 2

### A. Voorbeelden geothermische plays als analoog voor Nederlandse play types

In deze bijlage worden de algemene bevindingen van de *case studies*, die voor Nederland relevant zijn, samengevat. Voor elke geothermische *play* worden de regionale geologie, geothermische systemen en het optreden van geïnduceerde seismiteit beschreven.

Het Noord-Duitse Bekken, het Noors-Deense Bekken en het Molasse Bekken zijn drie *case studies* die het meest relevant zijn voor Nederland en zij worden beschreven in deze bijlage. Het Parijs Bekken, waar na tientallen jaren van geothermische operaties nog geen seismiteit is geregistreerd, valt eveneens onder de CD1\_I\_matrix *play*. Dit bekken wordt echter niet gezien als een directe analoog voor de Nederlandse geothermiesystemen omdat het reservoirgesteente in het Bekken van Parijs wordt gevormd door kalksteenlagen, met andere geomechanische eigenschappen dan de zandsteenlagen die in Nederland voornamelijk het reservoirgesteente vormen. Voor een beschrijving van de overige *case studies* wordt verwezen naar TNO (2019). Tabel 2 geeft een overzicht van alle geothermische gebieden/bekkens die in dit document en TNO (2019) worden beschreven.

#### Noord-Duitse Bekken (CD1\_I Matrix)

Het Noord-Duitse Bekken is een passief-rift bekken (*intracratonic basin type*) van Perm ouderdom en bedekt Noord-Duitsland grotendeels (Figuur 10). Het bekken is gevuld met sedimenten van Mesozoïsche en Cenozoïsche ouderdom. Er wordt sinds 1984 aardwarmte gewonnen. De belangrijkste geothermische doelreservoirs zijn de watervoerende zandsteenlagen van Jura en Trias ouderdom en zij hebben een relatief lage geothermische gradiënt. De geothermische systemen gaan tot een diepte van 1 – 2,5 kilometer en bereiken temperaturen van 45 tot 100°C. De doelreservoirs in het Noord-Duitse Bekken hebben over het algemeen een hoge porositeit en permeabiliteit. In bijvoorbeeld Neustadt-Glewe is een porositeit van 25% gemeten op een diepte van 2,5 kilometer (Seibt et al., 2005). Hierdoor wordt het Noord-Duitse Bekken ingedeeld in de matrix permeabiliteitsklasse.

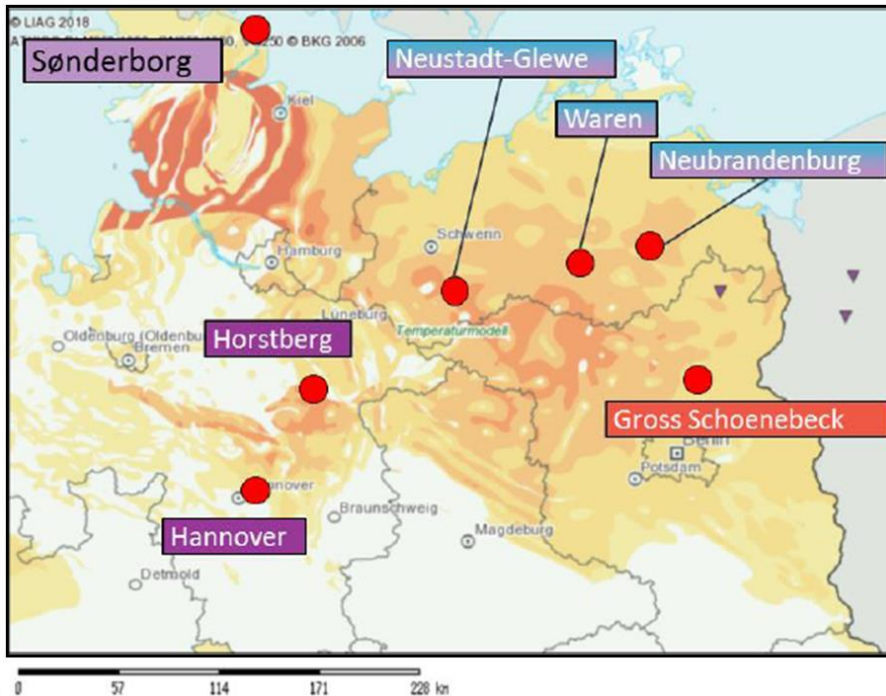
Geothermische systemen in het Noord-Duitse Bekken vereisen, naast de incidentele injectie van zuur om de put schoon te maken, geen hydraulische stimulatie. De vereiste stroomsnelheden kunnen worden bereikt bij lage injectiedrukken. De gewonnen warmte wordt voornamelijk gebruikt voor stadsverwarming. Geen seismiteit is gemeten bij deze projecten.

Naast de conventionele geothermiesystemen in het Noord-Duitse Bekken zijn er twee geothermische onderzoeksprojecten: Horstberg en Hannover (zie Figuur 10). Beide projecten hebben op een diepte van 4,1 km het Bontzandsteen aangeboord en een temperatuur van 150 tot 170°C gevonden. Vanwege het compacte gesteente was reservoirstimulatie nodig om de productie op gang te brengen. In twee putten is er getest met het hydraulisch stimuleren van het reservoir. Op beide locaties is een seismisch monitoringsnetwerk aanwezig en in beide gevallen is geen seismiteit gemeten tijdens het hydraulisch stimuleren van het gesteente.

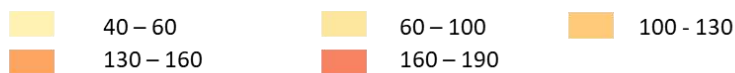
**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
59/77



**Geothermieatlas – Gebieden met bewezen potentieel**  
Haalbare temperatuur [°C]



Figuur 10: Locatie Noord-Duitse Bekken met bijbehorende geothermische systemen. Horstberg en Hannover zijn twee geothermische onderzoeksprojecten (bron: TNO, 2019).

### Noors-Deens Bekken (CD1\_I\_Matrix)

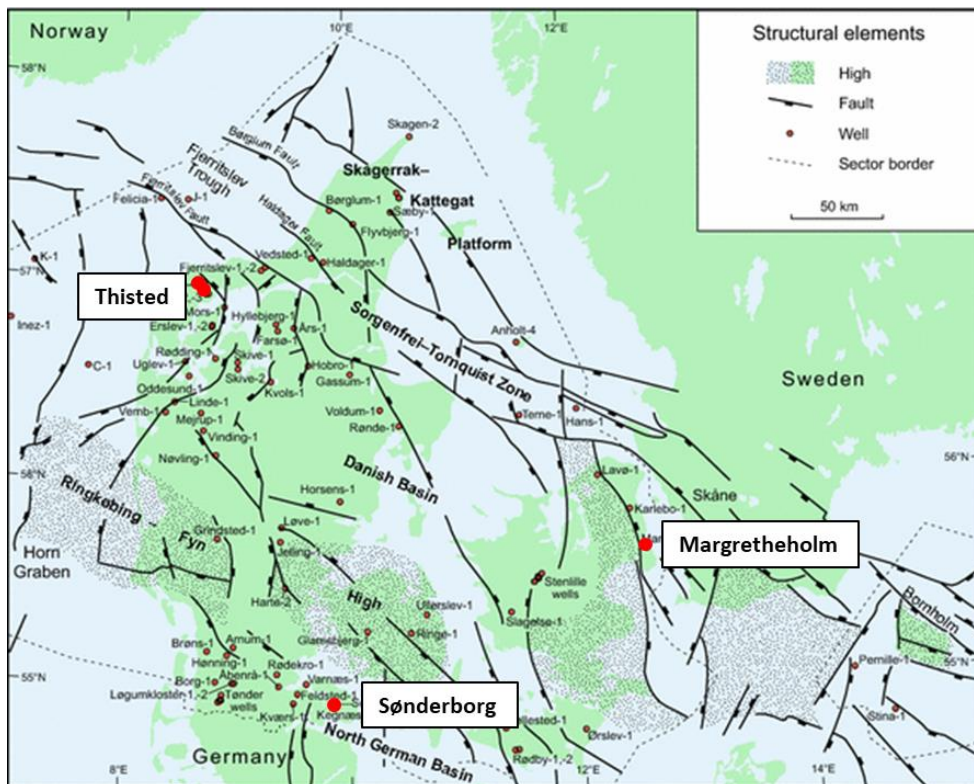
Het Noors-Deense Bekken (Figuur 11) is ontstaan in het Carboon-Perm. Het is een intracratonisch bekken (*intracratonic basin type*) en is vergelijkbaar met het Noord-Duitse Bekken. Na de fase van extensie en riftvorming in het Boven-Carboon en Onder-Perm werd het Noors-Deense Bekken gevuld met jongere sedimenten. De dikte van het sediment varieert tussen de 1 – 2 kilometer in het zuiden tot 9 kilometer in het noorden van het bekken. De voornaamste geothermische reservoirs zijn de aquifers in de Gassum Formatie (Boven Trias) en de Bontzandsteen Formatie (Onder Trias). De Gassum Formatie wordt gevonden in het midden en noorden van Denemarken op een diepte tot 3 kilometer. De Bontzandsteen wordt voornamelijk gevonden in het zuiden en midden van Denemarken.

In het Noors-Deens Bekken wordt gewonnen uit drie geothermische systemen: Thisted, Margrethholm en Sønderborg, die opgestart zijn in respectievelijk 1984, 2005 en 2013. Sønderborg ligt op de zuidelijke grens van het Noors-Deens Bekken, net ten noorden van het Noord-Duitse Bekken. Thisted richt zich op de zandsteenlagen van de Gassum Formatie, met een porositeit van 26% op een diepte van 1,2 km. Het Margrethholm systeem produceert uit de Bontzandsteen op een diepte van 2,5 km. Reservoirtemperaturen zijn respectievelijk 45°C en 73°C. Deze systemen produceren via matrix permeabiliteit en worden daarom ingedeeld in de CD1\_I\_Matrix klasse. Er is geen seismiteit gemeten bij deze systemen.

Datum  
2 april 2020

Onze referentie  
AGE 20-10.036

Blad  
60/77



Figuur 11: Structurele elementen van het Noors-Deens Bekken en de bijbehorende geothermische systemen. (bron: Frederiksen et al., 2001).

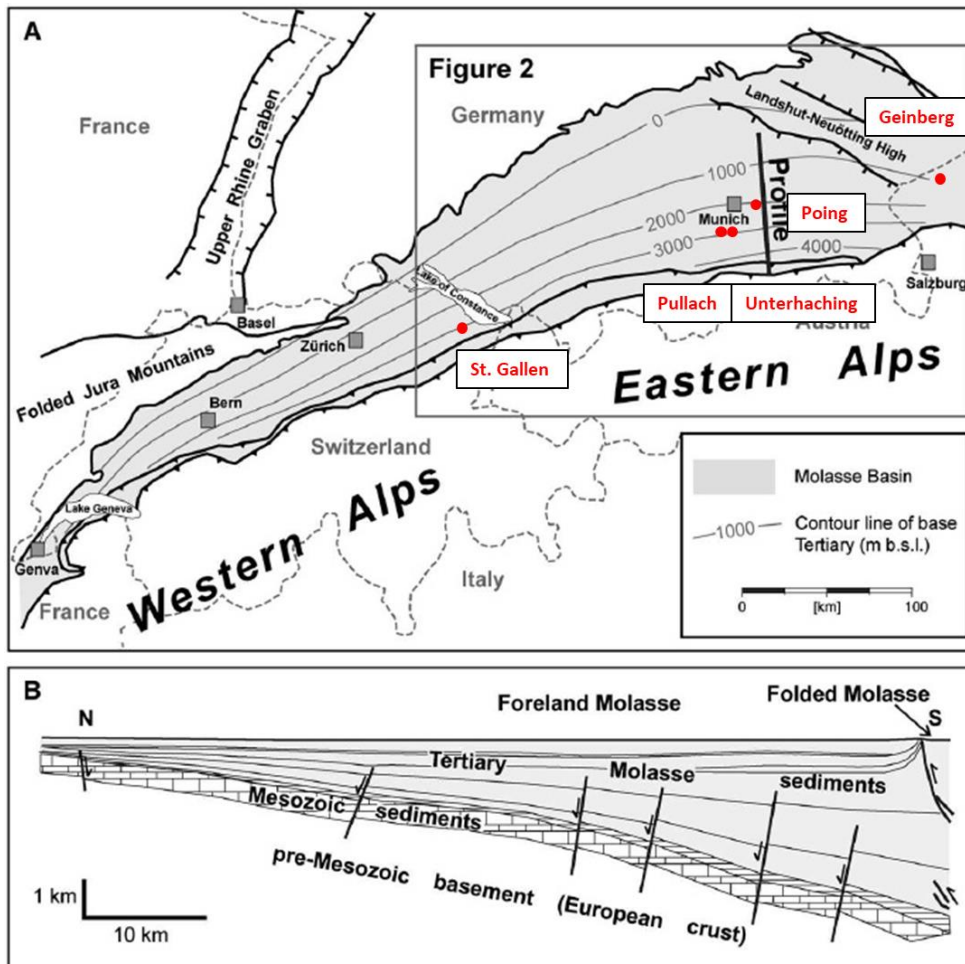
### Molasse bekken (CD2\_FB Fracture)

Het Molasse bekken is een voorlandbekken (*Foreland Basin type*) ten noorden van de Alpen en strekt zich uit over Zwitserland, Duitsland en Oostenrijk (Figuur 12). Tijdens de vorming van de Alpen zijn het basement en de overliggende Mesozoïsche sedimenten gebogen, waardoor een marien voorlandbekken ontstond. Dit bekken is gevuld met jongere sedimenten en neemt in zuidwaartse richting (naar de Alpen) in dikte toe. Langs de zuidelijke grens van het bekken worden diktes van die jongere sediment pakketten van meer dan 4 kilometer aangetroffen. Voornaamste doelreservoirs in het Molassebekken zijn gekarstificeerde en verbreukte Malm kalksteenlagen van Boven-Jura ouderdom. Nabij München ligt de Malm op een diepte van rond de 3 kilometer, met een dikte van meer dan 600 meter en een temperatuur van tussen de 85 en 130°C. De Malm kalksteenlagen zijn gekarstificeerd en verbreukt, waardoor de permeabiliteit hoog is. Hydraulische stimulatie is daarom niet vereist. Vloeistoffen worden normaal gesproken tussen twee putten bij lage injectiedrukken (<2MPa) gecirculeerd. Net zoals in Limburg worden bij sommige systemen bewust breuken aangeboord vanwege hun verhoogde permeabiliteit, zoals bij Unterhaching, Duitsland.

Datum  
2 april 2020

Onze referentie  
AGE 20-10.036

Blad  
61/77



Figuur 12: Overzicht van het Molasse Bekken en bijbehorende geothermie projecten, die in dit document en in TNO, 2019 beschreven worden. A) Verbreiding van het Molasse Bekken in Zwitserland en Duitsland en de dikte (contourlijnen) van de Tertiaire sedimenten. B) Cross-sectie door het Molasse Bekken. (bron: Reinecker et al., 2010).

In het Molassebekken zijn 27 geothermische systemen actief. Bij 3 van de 27 geothermische systemen is seismiciteit waargenomen. Het bekendste voorbeeld van seismiciteit in het Molassebekken is waargenomen in Sankt Gallen, Zwitserland, waar een beving van  $M_L$  3,5 werd waargenomen. Deze beving vond plaats tijdens pompen van boorvloeistof om de influx van gas in de put te onderdrukken. Op 14 juli 2013 begonnen de werkzaamheden aan de put en tussen 14 juli 2013 en november 2013 zijn er in totaal 350 bevingen waargenomen, met een  $M_L$  -1,2 tot 3,5 (Diehl et al., 2017). Het overgrote deel van de bevingen had een  $M_L$  -1,2 tot ca. 1, enkelen hadden een magnitude  $M_L$  ca. 1 tot 2 en één beving had een magnitude 3,5. Een mogelijke verklaring voor de waargenomen seismiciteit is dat er een hydraulische verbinding bestaat tussen het boorgat en dieper gelegen delen van de breuk. Drukveranderingen kunnen dan overgedragen worden naar diepte en kunnen kritisch gespannen breuken reactiveren.

Daarnaast zijn twee Duitse geothermische projecten geassocieerd met seismiciteit, Unterhaching ( $M_L$  2,4) en Poing ( $M_L$  2,1). Bij beide projecten werd seismiciteit

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

62/77

waargenomen tijdens circulatie van de doubletten. In Unterhaching werd binnen enkele maanden na het opstarten van de circulatie seismiciteit waargenomen. In totaal werden tussen 2008 en 2012 136 bevingen waargenomen met een magnitude tussen de  $M_L$  -0,8 en 2,4, 11 bevingen hadden een magnitude tussen  $M_L$  1,0 – 2,0 en 5 bevingen met een magnitude  $M_L > 2$  (Meggies & Wassermann, 2014). De locatie van de grotere bevingen worden geschat op ongeveer 1700 meter onder de injectieput, aan de *footwall* kant van hoofdbreuk in het kristallijne *basement* (Meggies & Wasserman, 2014). Breuken die doorlopen in het kristallijne basement vormen een belangrijke parameter binnen de SHRA systematiek. Waarbij de afstand van de injectiepositie via de breuk tot het basement een belangrijke proxy is. De grootste bevingen, en mogelijk ook de kleinere, zijn waarschijnlijk ontstaan door lokale stress en poriëndruk veranderingen als gevolg van de injectie van koud water. Het patroon van bevingen suggereert een herhaalde activering van de hoofdbreuk die de injectieput doorkruist (TNO, 2019).

Bij het Poing doublet werd de eerste seismiciteit pas na 5 jaar waargenomen. Bij dit doublet is een breuk aanwezig tussen de injectie- en productieput, daarnaast bevindt de injectieput zich dicht bij een regionale breuk. Een mogelijke verklaring voor de waargenomen seismiciteit is de re-activatie van een kritisch gespannen breuk. Desondanks is de exacte oorzaak van deze seismiciteit niet duidelijk, omdat de poriëndruk en de thermisch geïnduceerde stress veranderingen waarschijnlijk erg klein zijn (LIAG, 2018).

## B. Wat is bekend over het mechanisme van aardbevingen?

Van geothermie is, uit studies uit het buitenland, al enige decennia bekend dat geothermie aardbevingen kan veroorzaken. Uit eerder onderzoek naar geïnduceerde aardbevingen bij geothermie en gaswinning is enerzijds bekend welke aspecten van ondergrondse gesteldheid van invloed zijn, anderzijds hebben ondergrondse operationele condities, in het bijzonder de aard, magnitude en spatiële verspreiding van druk en temperatuurverandering van de geothermische exploitatie, een grote invloed op de waarschijnlijkheid en de magnitude van bevingen.

### Ondergrondse gesteldheid

De meest relevante factoren voor het mogelijk ontstaan van seismiciteit bij geothermie zijn:

- Breuken: Een aardbeving kan optreden bij een verschuiving langs een breuk in de ondergrond. De verschuiving langs de breuk kan optreden bij het overschrijden van de kritische spanning (grofweg een kritische verhouding tussen schuif- en normaalkracht op de breuk). De magnitude van een beving is rechtstreeks gekoppeld aan de oppervlakte van het breukvlak dat schuift. Een beving met magnitude  $M \sim 3.5$ , die beperkte schade zou kunnen geven<sup>1</sup>, vereist een minimaal schuifoppervlak van een vierkante kilometer of meer. De kans dat breuken voorkomen in Nederland die een dergelijk schuifoppervlak kunnen accommoderen is overal zeer groot, want breuken komen overal voor in de ondergrond. Om deze breuken in beweging te krijgen is echter ook een spanningsverandering nodig die groot genoeg is om de breuk te laten schuiven. Grotere magnitude bevingen vereisen veel grotere schuifvlakken. Bijvoorbeeld de Roermond aardbeving met  $M=5,8$  in 1992 had een schuifvlak van vele tientallen vierkante kilometers. Zulke schuifoppervlaktes worden meestal alleen gemobiliseerd indien er een connectie is van de breuken in het geothermische reservoir met grote breuken in dieper *basement* dat een kritische spanningstoestand kan hebben.
- Spanningsregime (voorspanning op breuken): Indien de breuken in de ondergrond niet kritisch zijn voorgespannen blijft het schuifoppervlak beperkt tot dat deel van de breuk dat door geothermie een kritische spanningsverandering kan krijgen. Bij kritische voorgespannen breuken breekt het gesteente bij relatief kleine veranderingen in spanning en kan een initiële verschuiving over een klein deel van de breuk een domino-effect geven van spanningsverandering en groter schuifvlak die theoretisch kan leiden tot substantiële bevingen.

---

<sup>1</sup> Schade door aardbevingen wordt geclassificeerd in 5 in zwaarte toenemende klassen. Schade neemt toe met de magnitude ondergrondse nabijheid van de beving, en is sterk afhankelijk van de bodemgesteldheid en de sterkte van de huizen. In Groningen betreft de opgetreden schade voor het overgrote deel de laagste klasse (DS1-lichte schade) en zijn er enkele gevallen in een hogere klasse (DS2-beperkte schade). In dit gebied kan de magnitude-grens tussen DS1 en DS2 ingeschat worden op ca  $M=3.5$ . De magnitude grens voor DS2 naar DS3, ligt ongeveer een magnitude hoger en wordt gehanteerd in analyses voor de afweging tot versterking van huizen in Groningen. Bron: HRA Groningen maart 2019.

- Reservoirtype (*fracture* vs *matrix gedomineerde reservoirs*): *Fracture* gedomineerde reservoirs zijn gekenmerkt door een lage porositeit (typisch <5%) waarbij het water stroomt door *fractures*. Deze reservoirs liggen bijna altijd in seismisch actieve gebieden omdat ze over het algemeen alleen doorlatend zijn als ze in de recente geologische geschiedenis verbroken zijn geweest. Bij *matrix gedomineerde reservoirs*, stroomt het water merendeels door de poriën van de formatie. De spanningsverandering in breuken door druk- en temperatuurverandering is voor *fracture* gedomineerde reservoirs veel minder betrouwbaar dan voor *matrix gedomineerde systemen*, omdat voor de laatste de verandering van druk en temperatuur begrensd is door de formatie, die over het algemeen goed zichtbaar is in putten en seismiek. Voor *fractures* is dat niet het geval en is de ruimtelijke begrenzing onzeker. Modellen getoetst met observaties in het buitenland tonen aan dat aardbevingen vooral plaats kunnen vinden in *fracture* gedomineerde reservoirs (zie Figuur 3). Dat hangt samen met: 1) de overlap met seismisch actieve breuken en correlatie met seismogeen gedrag, en 2) de manier waarop drukopbouw plaatsvindt (zie ook operationele condities).
- Thermische en mechanische eigenschappen: De manier waarop een reservoir reageert met een spanningsverandering door temperatuur en druk verandering, is sterk afhankelijk van de thermische en mechanische eigenschappen. De verwachting is dat relatief ondiep liggende poreuze reservoirs reageren met minder spanningsverandering door thermische afkoeling dan dieper liggend gesteente. De ontstane spanningsverandering kan leiden tot geleidelijke schuif langs breuken (*creep*) in plaats van abrupte breukvorming (*rupture*) wat seismiciteit veroorzaakt. *Fracture* gedomineerde systemen hebben per definitie seismisch potentieel.

### Ondergrondse operationele condities

De meest relevante factoren voor eventuele seismiciteit als gevolg van geothermie zijn:

- Drukopbouw: De drukopbouw bij met name de injectieputten van geothermische installaties resulteert in spanningsveranderingen die breuken kritisch gespannen kunnen maken. Drukopbouw bij geothermische installaties is ruimtelijk gezien stationair na enkele weken/maanden en neemt niet noemenswaardig toe na de ingebruikname, tenzij de debieten significant worden verhoogd. De drukopbouw neemt dan toe naar rato van de debietverhoging. Het tijdsverloop en spatiale reikwijdte van de drukopbouw is sterk afhankelijk van het type reservoir.

#### *Fracture gedomineerde reservoirs*

In *fracture* gedomineerde reservoirs kunnen bevingen tot een magnitude van ca.  $M = 3,5$  direct aan de drukopbouw kunnen worden toegeschreven. Deze grootste bevingen vinden met name plaats in de beginfase van het project. Dan worden de *fractures*, als ze onvoldoende doorlatend zijn, opengebroken met extra hoge drukcondities door hydraulische stimulatie. Echter, ook later kunnen bevingen plaatsvinden. Kleine bevingen met  $M =$



**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

65/77

1,5-2 zijn heel normaal voor *fracture* gedomineerde reservoirs, ook later tijdens productie.

#### *Matrix gedomineerde reservoirs*

In matrix gedomineerde reservoirs vinden, voor zover bekend, geen of zeer beperkt aardbevingen plaats omdat er geen significante drukopbouw is. De vereiste drukopbouw is meestal kleiner (door o.a. ondiepere ligging) en ook de oppervlakte van breuken die beïnvloed wordt door de druk is significant kleiner dan bij *fracture* gedomineerde reservoirs. Bovendien is de ruimtelijke verspreiding van drukverandering goed voorspelbaar voor matrix gedomineerde reservoirs in vergelijking met *fracture* gedomineerde reservoirs. Drukverlaging bij de productieput kan ook tot instabiliteit leiden, maar dit effect is kleiner dan dat van drukopbouw.

- Temperatuur: Verlaging van temperatuur spreidt zich zeer geleidelijk uit (in jaren) vanuit de injectieput in het reservoir. Temperatuurverandering leidt tot spanningsverandering, die breuken kan destabiliseren. Het volume waarover de spanning verandert beperkt zich grotendeels tot de afgekoelde zone in de ondergrond. Voor matrix gedomineerde reservoirs is de ruimtelijke begrenzing goed voorspelbaar, maar voor *fracture* gedomineerde systemen minder goed.

#### **Implicaties voor geothermie in Nederland**

- Breuken: In Nederland komen overal breuken voor die in theorie kunnen leiden tot aardbevingen.
- Spanningsregime: In Nederland is zuidoost Nederland (met name de provincie Limburg) seismisch actief en zijn veel breuken kritisch voorgespannen. In de rest van Nederland zijn de meeste breuken van nature stabiel en vereisen een grote spanningsverandering voordat aardbevingen kunnen optreden. Buiten zuidoost Nederland kan niet geheel uitgesloten worden dat breuken niet kritisch voorgespannen zijn. In het noordwest verlengde van de meeste actieve breukzone in Nederland (de Peelrandbreuk) treden af en toe aardbevingen op. Daarnaast kunnen breuken in en nabij gasvelden door drukverlaging meer kritisch gespannen zijn geraakt op die delen die in contact staan met het gasreservoir, en dus door geothermie eerder gaan schuiven dan in gebieden zonder gaswinning.
- Reservoirtype en thermo-mechanische eigenschappen: Het merendeel van de geothermische installaties in Nederland (buiten de provincie Limburg) zijn ontwikkeld in siliciklastische matrix gedomineerde reservoirs. De thermo-mechanische gesteente-eigenschappen zijn hoogstwaarschijnlijk zodanig dat de kans op significante spanningsverandering door afkoeling en seismogeen gedrag alleen bestaat voor siliciklastische gesteentes met een hoge Young's modulus: dat zijn de oude en relatief diep begraven Rotliegend, en mogelijk Trias. De jongere, minder diep begraven lagen (Jura/Krijt, Tertiair), worden waarschijnlijk gekenmerkt door een lagere spanningsverandering door temperatuurverandering en een grotere kans op *creep* in plaats van beven. De reservoirs in Limburg in Paleozoïsche gesteenten zijn (deels) *fracture* gedomineerd (en dus seismogeen).

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

66/77

Daarnaast hebben deze gesteenten waarschijnlijk een relatief hoge Young's modulus waardoor er een relatief grote spanningsverandering kan optreden door afkoeling. Bovenstaande inschattingen zijn gebaseerd op internationale literatuur. De gesteente-eigenschappen van geothermische reservoirs zijn op dit moment echter onvoldoende bekend om deze aspecten met modellen voldoende goed te kunnen onderbouwen.

- Druk en temperatuuropbouw in siliciklastische matrix gedomineerde reservoirs (niet kritisch voorgespannen breuken): Bij de Nederlandse geothermiesystemen buiten Limburg werken de spanningsveranderingen alleen destabiliserend op het reservoirniveau. Dit komt door de ruimtelijke begrenzing van de druk en temperatuurverandering. Wat betreft drukverandering is alleen sprake van destabilisatie van breuken dichtbij de injectieput (<<500m) en verandert de druk alleen in tijd bij een significante verandering in debiet. Voor temperatuurverandering is alleen sprake van destabilisatie in de afgekoelde zone rondom de injectieput. Die strekt zich geleidelijk radiaal uit vanuit de injectieput op het reservoirniveau en bereikt een radius van ca. 750m na tientallen jaren, bij doubletten met een putafstand van 1500m. De kans op bevingen door drukverandering wordt als verwaarloosbaar beschouwd na ingebruikname, omdat er daarna amper nog hogere drukken optreden dan bij ingebruikname. Echter, dat op lange termijn mogelijk bevingen kunnen optreden, met mogelijk beperkte schade door doorsnijding van het koufront met breuken in de ondergrond, kan niet uitgesloten worden. Aan de oppervlakte kunnen eventueel optredende bevingen gevoeld worden in gebied met een straal van enkele kilometers rondom de bevingshaard.
- De drukopbouw en temperatuurverandering die plaatsvindt in de *fracture* gedomineerde reservoirs in Limburg is vergelijkbaar met andere doubletten in Nederland. Echter door het (deels) *fracture* gedomineerd karakter van het reservoir en het voorkomen van kritisch voorgespannen breuken is de kans op aardbevingen met schade niet verwaarloosbaar en is er ook de mogelijkheid dat bevingen optreden die substantiële schade kunnen geven door het *triggeren* van bevingen die anders later in de toekomst op natuurlijke wijze zouden optreden.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

67/77

## **C. Verhouding tot aardbevingsrisico's Groningen**

### **Invloed van ondergrondse gesteldheid**

Voor de klastische reservoirs van Jura/Krijt ouderdom, waaruit nu een groot deel van de warmte wordt gewonnen (Westland), geldt dat de ondergrondse gesteldheid wat betreft aardbevingsrisico's gunstiger is dan bij gaswinning in Groningen. Dit komt omdat de aquifers worden gekenmerkt door gesteente eigenschappen (hoge porositeit, relatief ongeconsolideerd) die relatief gunstig zijn voor beperking van thermische spanningen en seismogene response in vergelijking met het Groningen veld.

In de provincie Limburg is de ondergrondse gesteldheid (gebieden C en D Figuur 1) wel ongunstiger dan in Groningen vanwege de tektonisch en seismisch actieve Roerdalslenk.

### **Invloed van operationele factoren**

De risico's voor aardbevingen bij geothermie verschillen sterk van gaswinning in Groningen, als functie van operationele factoren in termen van druk- en temperatuurverandering.

#### *Drukverandering*

Onderstaande verschillen in drukverandering bij geothermie en gaswinning zorgen voor een sterk verschil in risico voor aardbevingen. Een meer uitgebreide toelichting op deze effecten wordt gegeven in Bijlage 2B.

- 1) De drukverandering bij gaswinning is een orde van grootte hoger (honderden bars) vergeleken met geothermie (tientallen bars). Bij een gelijke drukverandering, heeft verhoging (bij een injectieput bij geothermie) een meer destabiliserend effect dan drukverlaging (bij gaswinning).
- 2) Bij gaswinning neemt de drukverandering progressief toe met tijd, in tegenstelling tot geothermie waarbij de druk stationair is na ingebruikname (onder voorbehoud van veranderingen in debiet).
- 3) Bij stop in productie bij geothermie herstelt de druk in de ondergrond zich naar de oorspronkelijke toestand, bij gaswinning is de druk permanent verlaagd (behalve bij actieve aquifers).
- 4) De drukverandering is bij gaswinning in Groningen verspreid over een reservoirdikte van ca. 200 m dikte (en mogelijk meer) over een aaneengesloten oppervlakte van honderden vierkante kilometers. Daarnaast bevat het veld duizenden breuken. Bij een geothermisch project is sprake van drukverandering over een kleiner diktebereik van ca. 50-200 m en ca. 2-3 km<sup>2</sup> oppervlaktebeslag.

#### *Temperatuurverandering*

Onderstaande verschillen in temperatuurverandering bij geothermie en gaswinning zorgen voor een sterk verschil in risico voor aardbevingen:

- 1) Temperatuurdaling is een factor die kan bijdragen aan bevingen als gevolg van geothermie, een factor die geen rol speelt bij gaswinning.
- 2) De absolute spanningsverandering ten gevolge van thermische effecten van afkoeling treedt als eerste op bij de injectieput en breidt zich uit tot een radius

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

68/77

van ca. 750 m over een periode van jaren (bij doubletten met een onderlinge putafstand van ca. 1500m). Door de beperkte verspreiding van het thermisch effect, draagt dit aspect waarschijnlijk wel bij aan een hogere kans op optreden van bevingen ten opzichte van alleen het drukeffect, maar draagt niet significant bij aan een hogere maximale magnitude door het beperkte breukoppervlak dat gedestabiliseerd wordt

- 3) Bij stop in productie ijlt afkoeling zeer beperkt na in het omliggende gesteente in vergelijking met drukverandering in omliggend gesteente bij gaswinning.

Samenvattend is de kans op een aardbeving die schade kan geven voor een geothermisch doublet waarschijnlijk zeer klein vergeleken met gaswinning in Groningen, in een vergelijkbare ondergrondse gesteldheid. Ook de maximale magnitude zal zeer waarschijnlijk lager zijn. Dit komt overeen met gebieden A en B in figuur 1, en qua reservoir eigenschappen met winning van geothermie uit diep gelegen (c 3km) Rotliegend formaties, met matrix porositeit.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

69/77

## **D. Methoden voor inschatting seismiciteit**

### **Geothermische *plays* in Nederland**

Geothermie is een verzamelnaam, waaronder (zeer) verschillende varianten van warmteproductie ondergebracht zijn, zoals bijvoorbeeld ultra diepe geothermie (UDG), diepe en ondiepe geothermie, *aquifer thermal energy storage* (ATES), hoge temperatuur opslag (HTO) en warmte-koude opslag (WKO.) Een onderscheid wordt gemaakt in gebiedsgebonden groepen van geothermische toepassingen die gekenmerkt worden door gedeelde ondergrondse condities en daaraan gekoppelde types van geothermische reservoirs (matrix of *fracture* gedomineerde permeabiliteit) en eventueel ook nog specifieke operationele aspecten zoals stimulatie. Deze specifieke combinaties worden aangeduid met een zogenaamde *play* aanduiding. Voor de lopende projecten zijn de groepen weergegeven in Figuur 2 en dit geeft een goed beeld van de variatie. Hoofdstuk 1 geeft een overzicht naar toekomstige *plays*, inclusief de mogelijke ontwikkeling van gestimuleerde systemen (EGS) en Ultra Diepe Geothermie (UDG).

De Nederlandse praktijk kenmerkt zich momenteel door systemen in poreuze zandsteenreservoirs waar matrix gedomineerde stroming van water plaatsvindt, en verbreukte en systemen in gekarstificeerde reservoirs waar *fracture* gedomineerde stroming van water plaatsvindt. Naar de overige vormen van geothermie, zoals UDG of eventueel EGS, wordt met het oog op besluitvorming hier in de komende jaren onderzoek naar gedaan om een realistische inschatting te kunnen maken van de mogelijkheden, die de Nederlandse ondergrond biedt, inclusief de voor- en nadelen daarvan.

### **Categorisering van bevingen**

Voor de methoden is het van belang in ogenschouw te nemen dat het vaststellen van een kans op een eventuele beving niet los gezien mag worden van de schade die een beving kan veroorzaken. Er zijn vijf klassen van schade in relatie tot bevingen die gedefinieerd zijn in hoofdstuk 2.1. In hoofdstuk 2.1 wordt tevens een grenswaarde van  $M=3,5$  gedefinieerd voor substantiële bevingen.

### **Robuuste voorspelling van risico's en monitoring**

Modelvoorspelling kan worden ingezet voor geothermische doubletten in Nederland om te voorzien onder welke omstandigheden risico's kunnen ontstaan. Voor gaswinning (e.g. Groningen) en EGS systemen zijn eerder praktische bruikbare modellen ontwikkeld. Voor het geschikt maken van dergelijke modellen voor geothermie in Nederland is beperkte technische ontwikkeling, lab-analyse en test en validatie nodig. Daarnaast kunnen monitoring en control protocollen worden opgesteld in samenhang met modelvoorspellingen, zodat risico's goed kunnen worden ingeschat en bijgesteld op basis van voortschrijdend inzicht en tijdig maatregelen kunnen worden genomen.

### *State of the art*

Er zijn veel modelstudies gedaan naar aardbevingsrisico's bij geothermie, vooral voor EGS-systemen. Deze systemen zijn vaak *fracture* gedomineerd. Voor gaswinning zijn ook vele modelaanpakken ontwikkeld die geschikt zijn voor matrix

gedomineerde geothermische reservoirs, indien ze worden uitgebreid met thermische effecten. De modelaanpak voor de voorspelling van het optreden van aardbevingen focust op voorspelling van absolute spanningsverandering of deformatie door druk en/of temperatuurverandering. De voorspelling van mogelijke bevingen omvat ofwel de expliciete modellering van *rupture* langs breuken in een model, ofwel de verhoging van kansen op seismische events op basis van seismische *event-rate* modellen als functie van spanningsverandering of deformatie. In dergelijke modellen, inclusief die voor het Groningen gasveld, bestaan grote onzekerheden in factoren die van invloed zijn op de uitkomsten: ondergrondse interpretatie van reservoir en breukgeometrie, initiële spanning, gesteente eigenschappen etc. Er zijn beperkte mogelijkheden om de modellen te kalibreren met data, door een beperkte set van aardbevingen.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

70/77

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

71/77

## **E. Beschrijving en analyse gangbare SRA methodiek**

### **Methodiek/werkwijze opgesteld door Qcon en IF Technology**

De door Qcon en IF Technology opgestelde methodiek (Baisch et al., 2016) maakt gebruik van een beslisboom, een scoringstabel en als laatste een waarde voor geïnduceerd seismisch potentieel. Het geothermisch project wordt geclassificeerd op basis van de resultaten van de beslisboom of de potentiewaarde voor geïnduceerde seismiciteit. Er zijn drie klassen in oplopende seismische dreiging gevaar: Level-1, Level-2 en Level-3. Voor elk van de "Levels" wordt een rapportageverplichting en monitoringstrategie voorgesteld, die progressief in zwaarte is van Level-1 naar Level-3.

Om de beslisboom (Figuur 13) inclusief de scoringstabel (Figuur 14) te doorlopen dienen een heel aantal vragen beantwoord te worden. Onderstaande verhandeling noemt de individuele vraag en geeft de bevindingen van de bruikbaarheidsevaluatie tezamen met de bevindingen uit de voorgaande werkpakketten.

In het rapport van Baisch et al. (2016) wordt, middels een analyse, een onderscheid gemaakt om een project in een bepaalde "Level" klasse te scoren. Deze initiële verkennende analyse wordt de "Seismic Quick-scan assessment" genoemd. Voor Level-1 zou deze Quick-scan analyse voldoende moeten zijn en wordt het KNMI seismische netwerk als afdoende beschouwd voor de monitoringstrategie of, indien er in de historie aardbevingen nabij de locatie van het geothermieproject zijn geweest, wordt de plaatsing van één monitoringstation voorgesteld.

Indien "Level-2" de uitkomst van de Quick-scan is dan dient een Seismic Hazard Assessment te worden uitgevoerd, waarbij het aantal gebouwen dat wordt belast met een bepaalde bandbreedte aan PGV (of PGA) een kwalitatieve consequentie-klasse definieert (Figuur 15). Die consequentie-klasse wordt, tezamen met de kwalitatieve kans dat de gebeurtenis optreedt, uitgezet in een "risk matrix" (Figuur 16). Afhankelijk van de plek die het geothermisch project inneemt in deze matrix, valt het project in Level-2 of Level-3. Daarnaast wordt een lokaal seismisch netwerk en een "Traffic Light System" voorgesteld als essentieel onderdeel in de monitoringstrategie.

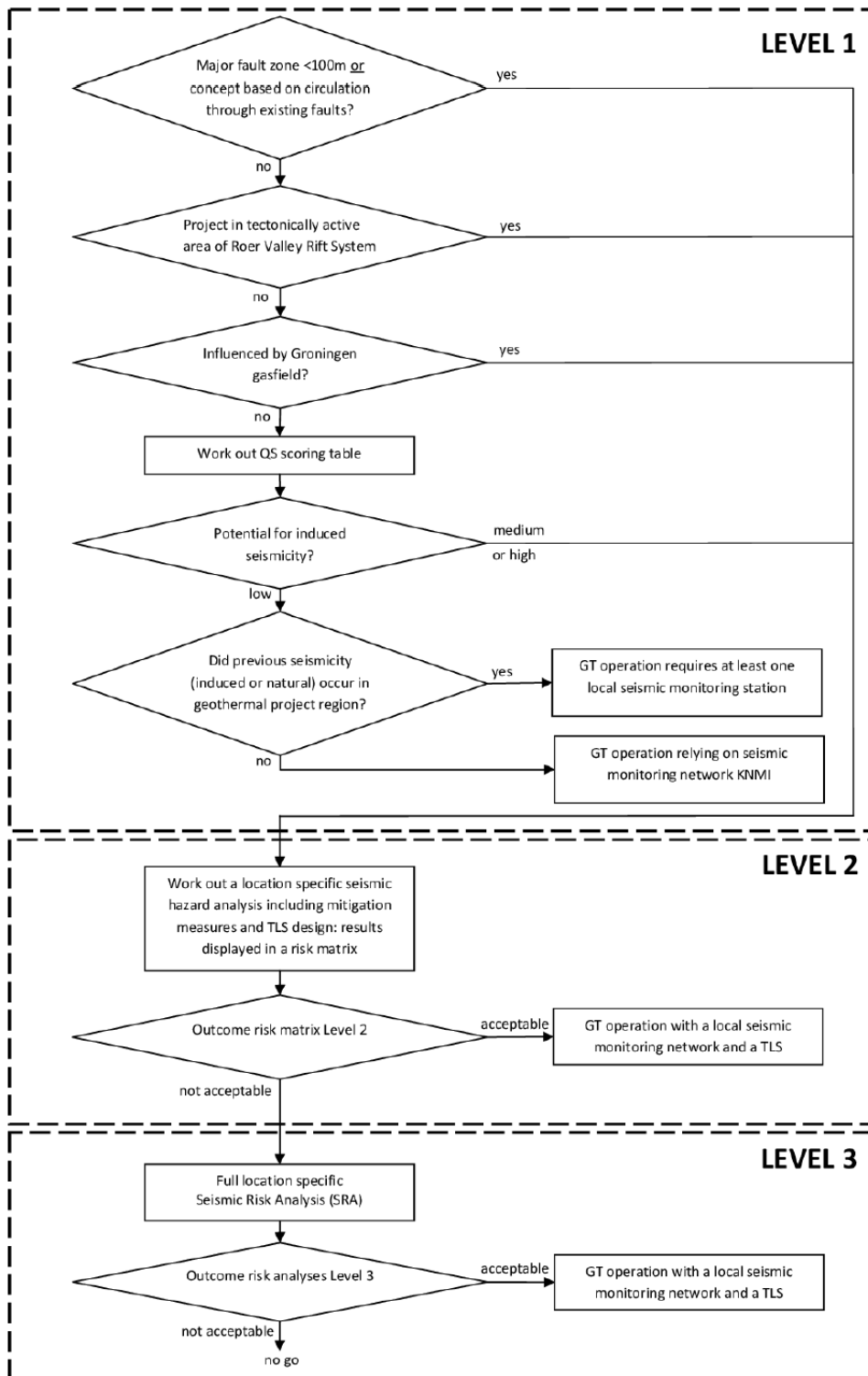
Als de uitkomst van de Quick-scan "Level-3" is dan is volgens Baisch et al. (2016) een locatie-specifieke Seismisch Risico Analyse opportuun. Daarnaast wordt een lokaal seismisch netwerk en een "Traffic Light System" voorgesteld als essentieel onderdeel van de monitoringstrategie.

In de door Baisch et al. (2016) voorgestelde Seismische Risico Analyse is eigenlijk een overkoepelende analyse voor zowel gevaar/dreiging (hazard) als risico opgesteld. TNO stelt voor om het proces dat doorlopen moet worden voor nieuwe geothermieprojecten, om de kans en het effect van geïnduceerde seismiciteit te duiden, de *Seismic Hazard and Risk Assessment* (SHRA) te noemen.

Datum  
2 april 2020

Onze referentie  
AGE 20-10.036

Blad  
72/77



Figuur 13: Beslisboom zoals opgesteld door Baisch et al. (2016) (hun Figuur 13, p40).



**Datum**  
2 april 2020

**Onze referentie**  
AGE 20-10.036

**Blad**  
73/77

score	basement connected	inter-well pressure communication	pre-injection pressure [MPa]	circulation rate [m <sup>3</sup> /h]	epicentral distance to natural earthquakes [km]	epicentral distance to induced seismicity [km]	distance to fault [km]	orientation of fault in current stress field	net injected volume [1000 m <sup>3</sup> ]
10	yes	no	> 7	> 360	< 1	< 1	< 0.1	favorable	> 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

Figuur 14: Scoringstabel seismische dreiging van Baisch et al. (2016) (hun Tabel 2, p42).

consequence	Number of buildings exposed to PGV larger than			
	3 mm/s	5 mm/s	20 mm/s	80 mm/s
negligible	0	0	0	0
minor	≤ 2,000	0	0	0
moderate		≤ 2,000	0	0
significant			≤ 500	0
severe				1

Figuur 15: Classificatieschema voor de beïnvloedingsfeer van de PGV. (p44, Baisch et al., 2016).

	consequences					probability
	negligible	minor	moderate	significant	severe	
very likely	green	yellow	yellow	red	red	
likely	green	yellow	yellow	red	red	
possible	green	green	yellow	yellow	red	
unlikely	green	green	yellow	yellow	red	
very unlikely	green	green	yellow	yellow	red	

Two black dots are present: one in the 'minor' column of the 'very unlikely' row, and one in the 'severe' column of the 'very unlikely' row. A yellow arrow points from the 'minor' column towards the 'moderate' column.

Figuur 16: Risicomatrix die de gevolgen combineert met de kans op optreden. Groen = acceptabel, geel = acceptabel onder bepaalde voorwaarden, rood = onacceptabel.

### **Bevindingen ten aanzien van de beslisboom en scoringstabel vragen.**

De vragen in de beslisboom (Figuur 13) en de scoringstabel (QS) (Figuur 14) zijn het uitgangspunt voor het beantwoorden van de vraag in hoofdstuk 6. Hieronder worden de vragen per stuk behandeld, met referentie naar de voorlopige bevindingen van de initiële gebruikerstoets en de bevindingen van de overige vragen die door EZK aan TNO gesteld zijn.

*Vragen 1a & 1b (eerste ruit in de beslisboom):*

*a) Afstand tot grote breukzone minder dan 100 m?*

De belangrijkste bevinding is dat het onduidelijk is wat de definitie van “een grote breukzone” is. Er is hiervoor in de literatuur geen eenduidige definitie; daarbij is het een kwestie van schaal. Het zou de eenduidigheid en werkbaarheid van de systematiek verbeteren door hier voor de Nederlandse toepassing een richtinggevende definitie te postuleren geïllustreerd met een aantal voorbeelden.

*b) Winningsstrategie gebaseerd op watercirculatie door bestaande breuken?*

Ook hier is de definitie van een “bestaande breuk” onduidelijk. Zijn het breuken ongeacht grootte, richting, verzet etc.? Is de identificatie van de bestaande breuken onafhankelijk van de resolutie van het beeld van de ondergrond (kwaliteit, aard en dichtheid geofysische/seismische gegevens) en de analysemethode? Daarnaast is het hier van belang te definiëren wat “watercirculatie door bestaande breuken” inhoudt. Is dat exclusief stroming van het formatiewater van de injectieput naar de productieput parallel aan de algemene breuktrend of is dat ook stroming van de injectieput naar de productieput loodrecht op de algemene breuktrend waarbij de injectieput van de breuk af is geboord?

In de beschrijving van vraag 1 worden geothermische projecten in *play types* opgedeeld. Een positief antwoord op deze vraag in de Nederlandse context is eender als het *play type* “*Conductive Play*”, met permeabiliteit type “*Fracture*”.

*Vraag 2: Projectlocatie in het tektonisch actieve gebied van de Roerdalslenk?*

De begrenzing van het gebied is niet eenduidig gegeven en er wordt niet verwezen naar een kaart waarop seismisch/tektonisch actieve gebieden worden beschreven, zoals bijvoorbeeld de kaart van De Crook (1996) (Figuur 1). Een vooraf gedefinieerd “tektonisch actief gebied van de Roerdalslenk” zou het gebruikersgemak en de eenduidigheid aanzienlijk verhogen. Een observatie is dat bij de scoringstabelvraag “Afstand tot historische natuurlijke aardbevingshaarden”, in essentie dezelfde vraag wordt gesteld en daar wel een semi-kwalitatieve aanpak wordt gebruikt.

*Vraag 3: Beïnvloed door het Groningen Gasveld?*

Met beïnvloeding wordt bedoeld dat de projectlocatie in de nabijheid van het Groningen gasveld ligt, alwaar de ondergrondse drukcondities sterk zijn veranderd ten gevolge van de jarenlange gaswinning. Het zou eenduidiger en werkbaarder zijn als de term “nabijheid” wordt gedefinieerd in termen van aantal breukblokken naast het Groningen gasveld of zo mogelijk minimale (waarschijnlijke of zekere) drukdaling in aanpalende breukblokken. Ook dit kan in een vooraf gedefinieerde kaart worden weergegeven om de werkbaarheid en eenduidigheid van de procedure te waarborgen.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

75/77

Als één van bovenstaande vragen positief wordt beantwoord wordt het project direct geclassificeerd als een "Level-2" project en dient een SHRA te worden opgesteld.

*Vraag 4: Seismisch potentieel*

De uitkomst van de scoringstabel omgezet naar een genormaliseerde score en vervolgens ingedeeld naar de klasse laag, midden of hoog seismisch potentieel is bepalend in de klassering voor de "Level-2 of -3" monitoring en strategie van mitigerende acties.

*Vraag 5: Zijn er in de regio van het geothermische project natuurlijke of geïnduceerde aardbevingen geweest?*

De definitie van "regio van het geothermische project" is niet gegeven. Dit is een vraag die redundant lijkt te zijn met vraag 4 en 5 in de Quick-scan scoringstabel. Is de regio gedefinieerd door een buffer van 10 km rond de ondergrondse injectie en productielocatie te trekken?

**Quick-scan scoringstabel**

In Baisch et al. (2016) wordt op pagina 62 vermeld dat: "de Quick-scan scoringsmethodiek is bedoeld voor toepassing gedurende de planningfase van een geothermisch project. In deze fase is de kennis van de ondergrondse condities inherent incompleet. Daardoor is de Quick-scan gebaseerd op de best mogelijke informatie die op dat moment beschikbaar is". Dit suggereert dat er een andere methodiek opportuun is, indien het geothermische project de planningsfase voorbij is en is gerealiseerd. Dit wordt niet verder uitgewerkt.

*Vraag QS.1: Hydraulische verbinding met het kristallijne basement?*

In de uitwerking van de deze vraag wordt gevraagd wat de verticale afstand is tussen de diepte waar het afgekoelde water terug in de watervoerende laag wordt geïnjecteerd en de top van het kristallijne *basement*. In Nederland is de diepte van de top van het kristallijne *basement* onbekend. Deze is tot op heden nooit aangeboord en niet karteerbaar met de huidig beschikbare seismiek. Voor werkbaarheid en eenduidigheid zou een kaart die een algemeen geaccepteerde indicatie van de top van het kristallijne *basement* geeft een belangrijke additie zijn. Uit Bijlage 2B blijkt dat hydraulische verbinding met name daar kan optreden waar grote breuksystemen zijn, die tot diep in de aardkorst (tot in het kristallijne basement) rijken. Het is te overwegen dit als vervangend of additioneel criterium toe te voegen.

*Vraag QS.2: Afstand tot natuurlijke breuken?*

Hier wordt de afstand van de ondergrondse injectielocatie tot de breuk gevraagd. Naast deze afstand wordt in de scoring de aard en kwaliteit van de seismiek meegenomen. De definitie van natuurlijke breuken alsmede de manier waarop de kwalitatieve kwaliteit van de seismiek moet worden ingeschat biedt veel vrijheidsgraden bij het daadwerkelijke scores. In de begeleidende tekst worden veel adjectieven voor breuken gebruikt, waaronder bijvoorbeeld "karteerbare breuken". Een richtinggevende definitie van welke schaal/grootte van een breuk relevant is voor deze scoring en hoe dat in verhouding staat tot de "kwaliteit" van de seismiek zou een goede aanvulling zijn op dit scorings-item.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

76/77

In de vragen 2 en 3 die EZK aan TNO heeft gesteld wordt gesteld dat een beving altijd langs een breuk ontstaat. De sterkte van de beving is afhankelijk van de grootte van de breuk, maar ook het oppervlak dat beïnvloed wordt door de druk- en temperatuur-perturbatie. In die zin zou een ondergrens voor de “absolute” breukgrootte bepaald kunnen worden, die in beschouwing genomen hoeft te worden. Bijvoorbeeld, zoals beschreven in Bijlage 2B, is een breukoppervlak van ca. 1 km<sup>2</sup> vereist om een substantiële beving ( $\geq DS2$ ,  $\sim M > 3,5$ ) te veroorzaken.

*Vraag QS.3: Breukoriëntatie in het ondergrondse spanningsveld?*

De data-dichtheid waarop de “*world stress map*” is bepaald is laag. Mechelse (2017) heeft additionele data opgevoerd die de kaart meer dekking geeft. Desalniettemin blijft de dekking te laag om locatie-specifieke evaluaties uit te voeren, zonder algemene aannames over het spanningsveld te gebruiken. Idealerweise zou voor deze toepassing de kaart geactualiseerd moeten worden. Naast de breukoriëntatie zijn meerdere breukparameters van belang. Een aantal, zoals bijvoorbeeld de breukrugositeit, is met de huidige technieken niet te bepalen. Anderen, zoals de helling van de breuk, zijn wel te bepalen. Er zijn analytische methoden in de literatuur bekend die op basis van de breukoriëntatie in het stressveld en de helling van de breuk een breukbewegingspotentie geven (pers. Communicatie J. ter Heege). Een aanpak langs deze lijnen maakt de scoring realistischer, eenduidiger, auditeerbaar en reproduceerbaar.

Lokale anomalieën in het spanningsveld, door bijvoorbeeld gedepleteerde gasvelden, worden ogenschijnlijk niet meegenomen of het is in de vraag afstand tot geïnduceerde seismiciteit opgenomen.

*Vraag QS.4: Afstand tot historische natuurlijke aardbevingshaarden?*

Dit is een duidelijke en eenduidig te beantwoorden vraag. Enige opmerking bij deze vraag is dat die voor de Nederlandse situatie overlapt met vraag twee in de beslisboom. Wellicht is het te overwegen de twee vragen te combineren.

*Vraag QS.5: Afstand tot historische geïnduceerde aardbevingshaarden?*

Dit is een duidelijke en eenduidig te beantwoorden vraag. In relatie tot vraag twee is het de vraag of het opportuun is om specifiek het Groningenveld te noemen of dat het mogelijk is om de relatie tot producerende of uitgeproduceerde gasvelden in een meer generieke procedure te vangen, waarbij aanpalende breukblokken, mate van drukdepletie, en voorkomen van geïnduceerde seismiciteit evaluatie-elementen zijn.

*Vraag QS.6: Netto geïnjecteerd volume aan vloeistof?*

Dit is een duidelijke en eenduidig te beantwoorden vraag. Verder geen opmerkingen hierbij.

*Vraag QS.7: Drukcommunicatie tussen de productie- en injectieput(ten)?*

Los van configuraties die opzettelijk drukcommunicatie verhinderen danwel lastig maken, wordt drukcommunicatie tussen de putten van het geothermisch systeem, met de voorgestelde methodiek, op een geometrische manier gescoord: hoe verder de putten van elkaar afliggen of hoe groter de verticale separatie in absolute diepte hoe lager de kans op drukcommunicatie.

**Datum**

2 april 2020

**Onze referentie**

AGE 20-10.036

**Blad**

77/77

Voor een project in de exploratiefase is dit een van de adequate methodieken om een indruk te krijgen van de mate van communicatie tussen de putten. Op het moment dat er putten geboord zijn en er drukmetingen of zelfs productiegegevens voorhanden zijn, is deze methodiek minder adequaat omdat er op een directere manier gemeten kan worden. Ook het voorhanden hebben van goede 3D-seismiek kan een aantal van de elementen (bijvoorbeeld de aanwezigheid van breuken) waarop de geometrische methode is gestoeld beter belichten en valt er dus op een adequatere manier te scoren.

*Vraag QS.8: Injectiedruk op reservoirniveau?*

De injectiedruk is een heel belangrijke parameter (zie ook Hoofdstuk 2 en 3). Hier moet de injectiedruk bij “volledige capaciteit” gegeven worden. Hoe “volledige capaciteit” exact is gedefinieerd is niet duidelijk. Hierbij kan opgemerkt worden dat met name de drukverandering op een breukvlak ten gevolge van de opgelegde injectiedruk het kritieke punt is. Dit in combinatie met de mate van kritische spanning op de breuk.

De druk opgelegd in de injectieput dissipeert in het verre veld van de aquifer. Op een zekere afstand van de put is er nagenoeg geen drukverhoging meer. Er is een inschatting te maken hoe groot het areaal van drukbeïnvloeding is dat mogelijk een rol kan spelen in de bepaling van het geothermische beïnvloedingsgebied waarvoor de SHRA wordt uitgevoerd (zie Hoofdstuk 3).

*Vraag QS.9: Debiet in primaire circuit?*

Dit is een duidelijke vraag met een duidelijk keuzemenu aan antwoorden voor de scoring. Een richtinggevende definitie voor de genoemde randvoorwaarde “op volledige capaciteit” zou een eenduidiger resultaat geven. Is “volledige capaciteit” tegen maximaal toegestane injectiedruk of bijvoorbeeld bij een minimale COP van 10? Daarnaast wordt op pagina 28 en 31 in Baisch et al. (2016) gesteld dat het een parameter is die mede de mate van hydraulische connectiviteit belicht en sec niet een “key parameter” is.