

Notitie TNO VERTROUWELIJK

Aan
EZK ()Van
TNO ()**Onderwerp**Notitie TNO-AGE met antwoord op vragen bewoners Oostvoorne over
voorgenomen aardwarmtewinning.

Inleiding

Bewoners uit Oostvoorne hebben aan het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) vragen gesteld over het voorgenomen aardwarmteproject aldaar van Hydreco Geomec. Het ministerie van EZK heeft de vragen in een mail aan TNO-AGE d.d. 20 oktober 2021 toegestuurd, met het verzoek aan TNO-AGE de vragen te beantwoorden / van een reactie te voorzien.

In deze notitie zijn de antwoorden door TNO-AGE geformuleerd vanuit geotechnische perspectief. De notitie is in twee delen opgesteld.

- 1) Beantwoording van de vragen van de bewoners uit Oostvoorne. De vragen zijn genummerd en onder elke vraag is, cursief, het antwoord van TNO-AGE weergegeven.
- 2) Er is een bijlage toegevoegd waarin achtergrondinformatie wordt gegeven over bodemdaling en bodemtrillingen bij gaswinning enerzijds en aardwarmtewinning anderzijds.

Vragen van de bewoners van Oostvoorne.

- 1) Het is bekend dat gedurende de looptijd van een winningsproject, bevingen en trillingen vaker voor kunnen komen en ook dat de amplitude van die trillingen sterker wordt. Is er onderzoek gedaan of voorhanden waarin de mogelijke gevolgen van deze steeds heftigere trillingen wanneer deze op een zandbed stuiten? Met andere woorden, zijn de mogelijke gevolgen exponentieel?

Antwoord TNO-AGE.

Om de vraag te kunnen beantwoorden gaan we eerst in op de inleiding van de vraag: 'het voorkomen van trillingen en bevingen die in de looptijd van een winningsproject steeds sterker worden'. Als eerste moet gekeken worden aan welke type winningsproject deze uitspraak refereert. Betreft het gaswinningsprojecten of geothermieprojecten? En vervolgens: om welk type geothermieproject gaat het? Is het een geothermieproject waar het water uit en in breuksystemen wordt geproduceerd en geïnjecteerd? Of is het een geothermieproject waar de poreuze en doorlatende zandsteenlaag wordt gebruikt voor de aardwarmtewinning?

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75**Datum**

10 november 2021

Onze referentie

AGE 21-10.087

Contactpersoon**E-mail**

@tno.nl

Datum

10 november 2021

Onze referentie

AGE 21-10.087

Blad

2/12

Als de aardwarmtewinning in Oostvoorne vergeleken wordt met gaswinning en de mogelijke bevingen en trillingen ten gevolge van winning, dan moet gesteld worden dat het om twee verschillende oorzaken gaat (zie ook de bijlage, hoofdstuk 1). Bij gaswinning wordt er gas aan de diepe ondergrond onttrokken, wat resulteert in significante drukdaling in het gasreservoir in die diepe ondergrond. Deze significante drukdaling resulteert in compactie van het reservoir en kan vervolgens mogelijk beweging veroorzaken langs breuken die het gasreservoir begrenzen of doorsnijden. De drukdaling in het reservoir wordt steeds groter naarmate de gaswinning vordert. Dit kan een mogelijke verklaring zijn voor steeds sterker wordende bevingen.

Bij de winning van aardwarmte zoals bij Oostvoorne is beoogd, wordt geen vloeistof of vrij gas aan de ondergrond onttrokken en blijft (gemiddeld genomen) de druk gedurende de winning en ook na de winning gelijk. Er wordt alleen warmte onttrokken uit de ondergrond en het in het geothermische water opgeloste gas. De bijvangst van opgelost gas wordt behandeld in het antwoord op vraag drie.

De koude zone in de ondergrond breidt gedurende de aardwarmteproductie langzaam uit tot een diameter ter grootte van de ondergrondse afstand tussen de injectie- en productieput. Ten gevolge van de warmte onttrekking krimpt het gesteente iets en verandert de ondergrondse spanningstoestand (Zie ook de bijlage, hoofdstuk 2). Als er in de diepe ondergrond, in het gebied waar de koude zone (het afgekoelde water) zich uitbreidt, breuken zitten, dan zou een deel van die breuk kunnen verschuiven. Die verschuiving kan geleidelijk of plotseling gebeuren. Alleen als die beweging plotseling gebeurt, ontstaat er een aardbeving met een bepaalde magnitude. De hoogte van de aardbevingsmagnitude is afhankelijk van de oppervlakte van de breuk die in beweging komt. Voor gebieden waar geen natuurlijke aardbevingen voorkomen, zoals Zuidwest Nederland, is het het meest waarschijnlijk, dat enkel het afgekoelde stuk breuk kan bewegen. De plotselinge breukbeweging kan dan elke keer optreden als een stukje breuk meer is afgekoeld. Dit uit zich dan in niet voelbare micro-seismiciteit.

Het andere uiterste is dat het breukoppervlak dat overlapt met de maximale uitbreiding van de koudwaterzone in een keer plotseling gaat bewegen. Dit zou tot een voelbare aardbeving kunnen resulteren. De hoogte van de magnitude in combinatie met de opbouw van de bovenliggende lagen, en dan met name de allerbovenste lagen, bepaalt of er iets aan het maaiveld te voelen is. Afhankelijk van de aard van de ondiepe ondergrond kunnen aardbevingsgolven versterkt worden, het z.g. opslingeringseffect. Met name een ondergrond die bestaat uit slappe klei en veen is erg gevoelig voor opslingering en daarmee een versterking van de trilling. Een zandlaag daarentegen heeft een dempende werking op de trilling. Een heel recente wetenschappelijke publicatie hierover is te vinden op internet (<https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2021-252/#discussion>).

Uit onderzoek naar het voorkomen van aardbevingen bij aardwarmtewinning wereldwijd, is gebleken dat bij de winning van aardwarmte uit poreuze zandsteenlagen, zoals dat in de diepe ondergrond

Datum

10 november 2021

Onze referentie

AGE 21-10.087

Blad

3/12

van Oostvoorne voorkomt, geen aardbevingen zijn geregistreerd (referentie Buijze et al. 2020). Op basis van de resultaten van dit onderzoek kan gesteld worden dat de kans van het optreden van trillingen merkbaar aan maaiveld nihil is. Daarnaast, als we de opbouw van de (diepe) ondergrond bij het Oostvoorne geothermiedoublet in ogenschouw nemen, zijn er geen breuken te zien binnen de uitbreiding van de koudwaterzone in de vergunningtermijn. Bovengenoemd onderzoek en kennis van de diepe ondergrond van Oostvoorne geven aan dat het aardbevingspotentieel in Oostvoorne heel laag is.

Gegeven bovenstaande kan gesteld worden dat het risico op het optreden van aardbevingen ten gevolge van aardwarmtewinning in Oostvoorne heel laag is. De vraag of de mogelijke gevolgen exponentieel zijn, is lastig te beantwoorden, maar vooralsnog is er geen aanleiding om dit te verwachten.

- 2) Is er specifiek onderzoek beschikbaar over de verwachte effecten van bevingen en trillingen en zettingen bij niet onderheide woningen, gefundeerd op een zandlaag?

Antwoord TNO-AGE

De verwachten effecten van trillingen op gebouwen (veroorzaakt door bevingen en/of andere trillingsbronnen) zijn beschreven in de SBR Trillingsrichtlijn A Schade aan bouwwerken:2017. Aan de hand van een opgetreden of verwachte trillingsnelheid kan worden bepaald of schade aan een gebouw aannemelijk is. In de SBR trillingsrichtlijn wordt geen onderscheid gemaakt in het type fundering of ondergrond.

- 3) Wij lezen dat tijdens het oppompen van het water ook 1 Nm³ gas meekomt, maar niet teruggebracht wordt, waarom beïnvloedt dat de daling niet meer? E.g. wat is het volume van 1 Nm³ gas op die diepte bij die temp?

Antwoord TNO-AGE

Het klopt dat de verwachting is dat er aardgas meekomt bij de winning van aardwarmte. Dit is bij bijna alle aardwarmteproductiesystemen in Nederland het geval. De hoeveelheid gas die meekomt is circa 1 m³ gas per 1 m³ water, gemeten bij atmosferische condities, dus 1 bar druk. Deze kubieke meter gas in de diepe ondergrond, op een diepte van circa 2 km alwaar een druk heerst van circa 200 bar, laat zich niet vertalen naar een volume aan vrij gas of gasballetjes. Deze hoeveelheid gas lost onder die druk volledig op in de kubieke meter (m³) water en neemt, omdat het opgelost is, geen volume in. Eén m³ met gas verzadigd water is nagenoeg gelijk aan één m³ water zonder opgelost gas. (Denk aan een literfles bruiswater. Voordat je de dop opendraait, zit er 1 liter water in. Bij het openen van de fles is (het merendeel van) het koolzuurgas ontsnapt en zit er nog steeds 1 liter water in de fles). Alleen de afkoeling van het water

resulteert in een kleine volumeverandering van de kubieke meter water: 1 m³ wordt ca. 0,98 m³ (afhankelijk van de mate van afkoeling). Dit betekent, dat als het water wordt teruggevoerd in dezelfde watervoerende laag in de diepe ondergrond, er daar gemiddeld genomen geen drukverandering optreedt. Dit in tegenstelling tot de gasproductie uit een gasveld, waarbij het gas als vrij gas in de gesteentelaag (het reservoir) zit, in plaats van opgelost in het water. Productie van vrij gas zonder dat er iets wordt teruggevoerd, verlaagt de druk in het reservoir. Door het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen in combinatie met de drukverlaging in het reservoir compacteert het reservoir en dat vertaalt zich als een bodemdalingsschotel aan het maaiveld. Dit treedt niet op bij aardwarmtewinning, omdat het rondpompen van het water gemiddeld genomen geen drukverlaging in het reservoir oplevert. Wat wel gebeurt is dat door de afkoeling van het gesteente in de diepe ondergrond het reservoir krimpt. Berekeningen voor bodemdaling ten gevolge van die krimp geven aan dat, in het geval van het aardwarmtesysteem Tinte in de vergunning Oostvoorne, het diepste punt van de bodemdalingsschotel ca. 6 mm zal zijn na een periode van aardwarmteproductie van 35 jaar. Nadere uitleg is gegeven in de bijlage in hoofdstuk 1. "Verhandeling over bodemdaling door aardwarmte in vergelijking met gaswinning" en hoofdstuk 3. "Verhandeling over watercirculatie en gas bijvangst".

Datum

10 november 2021

Onze referentie

AGE 21-10.087

Blad

4/12

BIJLAGE

Datum
10 november 2021

Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
5/12

1. Verhandeling over bodemdaling door aardwarmte in vergelijking met gaswinning.

Bodemdaling ofwel de daling van het maaiveld ten opzichte van een vast referentiepunt, kan verschillende oorzaken hebben. Voor Nederland zijn dat:

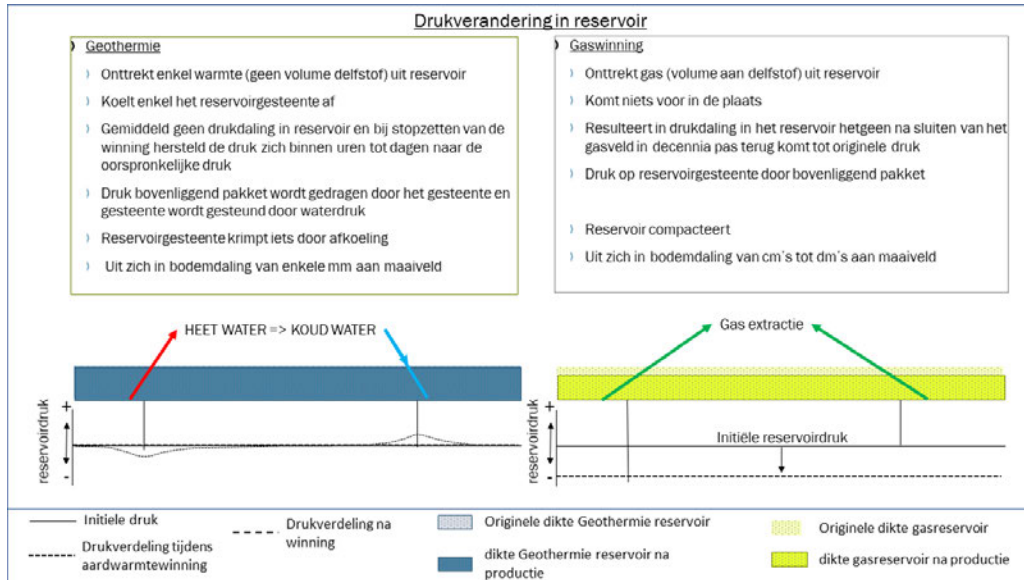
- 1) tektonische bodemdaling: de westelijke helft van Nederland daalt. Deze daling bedraagt in de orde van 1 tot 6 mm per 100 jaar (Fokker et al. 2018).
- 2) inklinking van klei en veenlagen in de zeer ondiepe ondergrond. Dit is zeer variabel in Nederland en afhankelijk van de dikte van de kleipakketten en de mate van grondwateronttrekking en verlaging.
- 3) oxidatie van veenlagen in de zeer ondiepe ondergrond. Als door grondwateronttrekking veenlagen blootgesteld worden aan zuurstofrijk water, of zelfs boven de grondwaterspiegel komen te liggen, dan oxideert het veen (soort heel trage verbranding) en verdwijnt deze veenlaag uit de ondergrond. Voor punt 2 en 3 is dat, met betrekking tot het Vierpoldersproject, circa 0,3 cm per jaar (zie www.bodemdalingskaart.nl)
- 4) delfstofwinning (gas, olie, zout, steenkool). Bodemdaling treedt op ten gevolge van reservoircompactie (inklinking) op reservoirdiepte, wat het gevolg is van de drukkaling in het gasreservoir door de gaswinning en de druk die het bovenliggende gesteentepakket op het gasreservoir uitoefent.
- 5) Aardwarmte- / geothermiewinning. Bodemdaling treedt op ten gevolge van krimp van het reservoirgesteente door afkoeling (Fokker & van Wees 2014).

In Figuur 1 worden de verschillen tussen gas- en aardwarmtewinning opgesomd en geïllustreerd. Bij de winning van gas compacteert het reservoir aanzienlijk door de drukverlaging in de orde van tientallen tot honderden bars in het reservoir en ten gevolge van de druk die het bovenliggende gesteentepakket op het reservoir uitoefent. In het geval van aardwarmtewinning blijft de druk in het reservoir gemiddeld genomen gelijk. Als het aardwarmtesysteem in productie is, is er rond de injectie- en productieput sprake van respectievelijk drukstijging en -daling. Dit drukverschil is het grootst in een relatief kleine straal om de putten en neemt snel af naarmate de afstand tot de putten groter wordt. Zodra het systeem wordt uitgezet, zal de druk in het gehele reservoir zich weer vereffenen tot de oorspronkelijke reservoirdruk. De opgelegde druk op reservoirdiepte in een typisch aardwarmtedoublet resulteert in een drukverlaging tot maximaal enkele tientallen bars bij de productieput en een drukverhoging van veelal tientallen bars bij de injectieput. Tot op heden is de injectiedruk op reservoirniveau niet boven de 70 bar (een paar anomale waardes daargelaten) geweest in Nederland.

Datum
10 november 2021

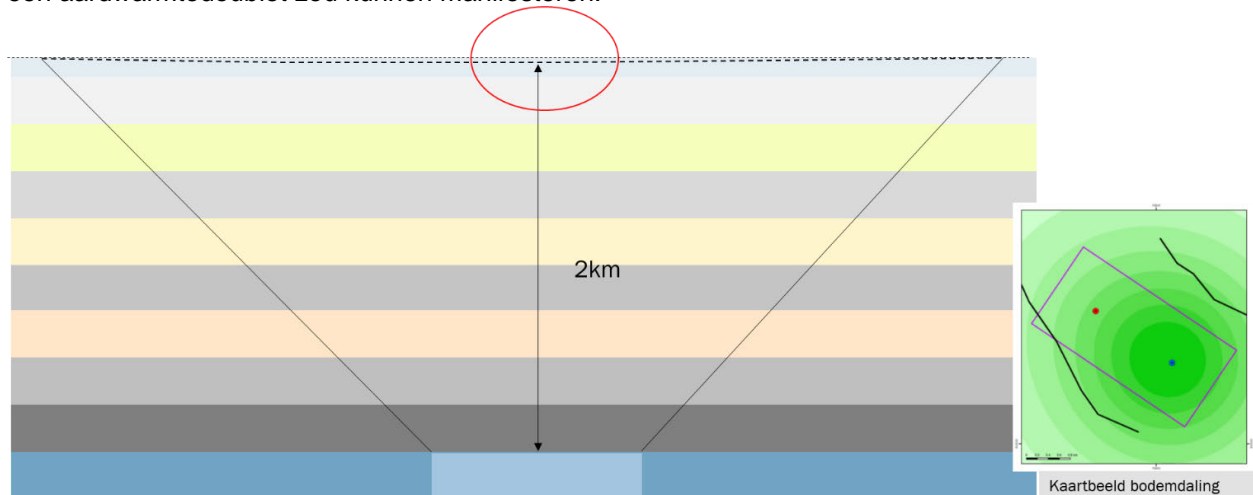
Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
6/12

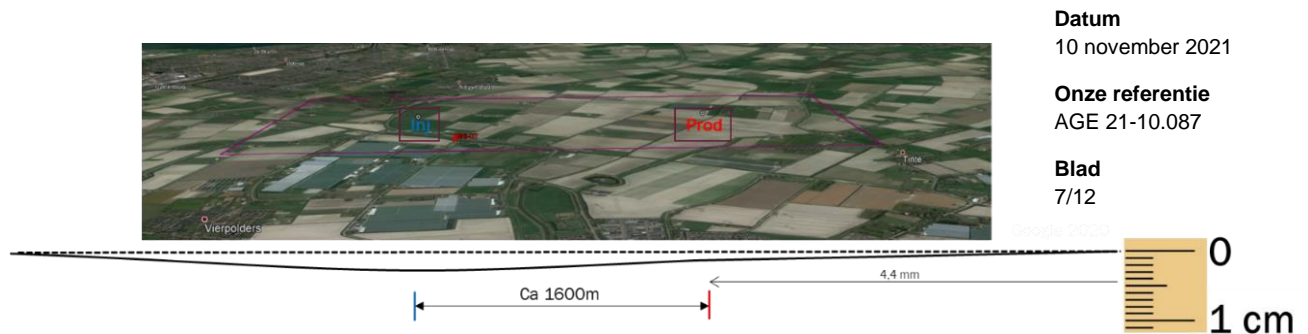


Figuur 1: Reservoirdrukontwikkeling bij aardwarmte- en gaswinningen en de reactie van het reservoir op druk- en temperatuurverandering.

De bodemdaling die ten gevolge van de krimp in het reservoir optreedt, verspreid zich aan maaiveld over een veel groter gebied. Figuur 2 illustreert dit. De krimp in het reservoir is in de orde van 0,06%, dat is op de 200 m reservoir dikte ongeveer 12 cm. De modelberekeningen resulteren dan in een maximale bodemdaling in het centrum van de kom van ca. 0,5 cm. De bodemdalingskom heeft een diameter van circa 4 km. Figuur 3 geeft weer hoe zich dat in een typische configuratie van een aardwarmte-doulet zou kunnen manifesteren.



Figuur 2: Relatie tussen afgekoelde zone in het reservoir en de bodemdalingskom aan het maaiveld.



Datum
10 november 2021

Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
7/12

Figuur 3: Bodemdalingskom tegen de achtergrond van een scheefgenomen luchtfoto van een typisch aardwarmte doublet. Prod in rode letters geeft de ondergrondse locatie van de productieput weer; Inj in blauwe letters die van de injectieput.

2. Verhandeling over trillingen door aardwarmte in vergelijking met gaswinning.

Hoe ontstaan aardbevingen?

Aardbevingen ontstaan als langs bestaande breuken in de ondergrond de gesteenten aan weerszijden van die breuk schoksgewijs een stukje langs elkaar schuiven. De gesteenten kunnen ook geleidelijk langs elkaar schuiven en dan ontstaat er geen aardbeving. Dus enkel als de schuifbeweging plotseling gebeurt, kan er een aardbeving ontstaan. De grootte van die aardbeving is afhankelijk van de stapgrootte van de schuifbeweging en de grootte van het oppervlak langs de breuk dat schuift. Er is pas schoksgewijze beweging langs een breuk mogelijk als een kritische spanningsdrempel wordt overschreden en het breukgesteente niet toelaat dat geleidelijke beweging langs de breuk kan plaatsvinden (de breuk zit als het ware vast). Overal in de Nederlandse ondergrond heersen spanningen. In het merendeel van Nederland zijn die spanningen niet kritisch. Enkel in Zuidoost-Nederland, daar waar relatief veel natuurlijke aardbevingen optreden (zie website KNMI, <https://www.knmi.nl/nederland-nu/seismologie/aardbevingen>), is de ondergrond van nature nabij kritisch gespannen.

Spanningsveranderingen geïnduceerd door gaswinning

Bij de winning van gas uit een gasveld daalt de druk in dat deel van het reservoir waaruit het gas gewonnen wordt. Daarnaast kan de drukdaling zich voortzetten in het watervoerende deel van het gasreservoir (het gesteente onder de zone die met gas is gevuld). Door de drukdaling en de daaropvolgende reservoircompactie (inklinking) verandert de ondergrondse spanningstoestand in en direct rond het gasreservoir. Die veranderde spanningstoestand kan leiden tot aardbevingen als de spanning op breuken in of nabij het gasveld de kritische grens overschrijden. Zoals behandeld in hoofdstuk 1 over bodemdaling, watercirculatie en gasbijvangst, is er bij geothermiewinning geen sprake van drukdaling (enkel nabij de productieput tijdens het pompen, maar die is veel kleiner dan de absolute drukdaling bij gaswinning) en gaan spanningsveranderingen door gasbijvangst (soms onterecht gaswinning genoemd) niet op. Daarom kunnen aardbevingen door de gasbijvangst bij geothermiewinning uitgesloten worden.

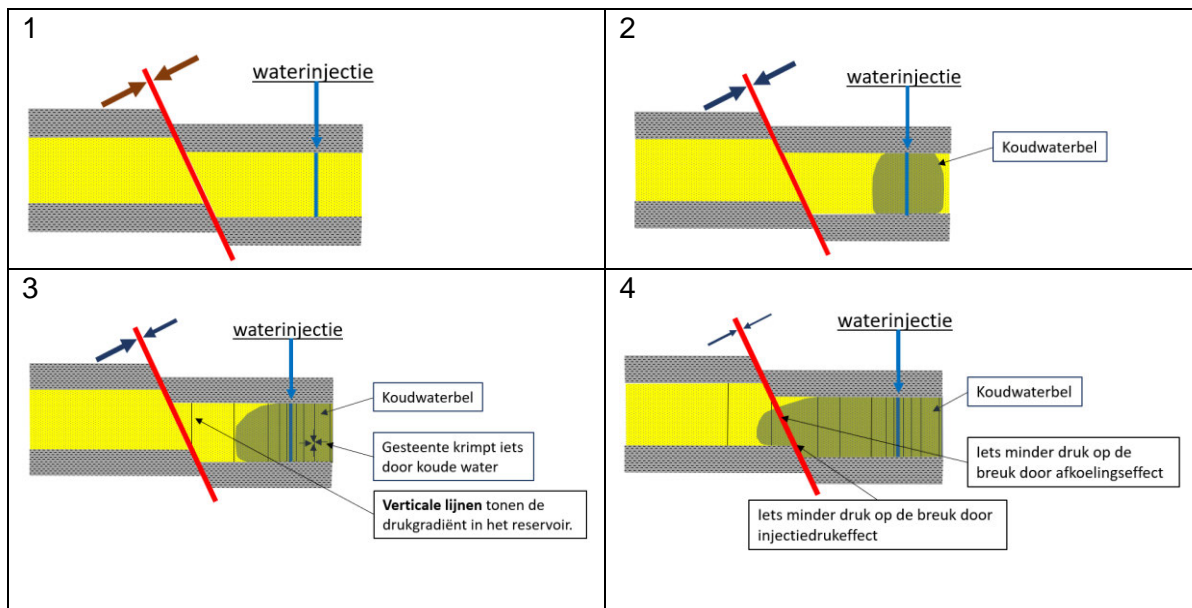
Datum
10 november 2021

Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
8/12

Lokale spanningsveranderingen geïnduceerd door geothermiewinning

Door geothermiewinning koelt een deel van het reservoir en een klein stuk van het afdichtende pakket af. Het reservoirgesteente krimpt een klein beetje (zie bij bodemdaling). Hierdoor kunnen lokale spanningsveranderingen optreden in de al bestaande ondergrondse spanningstoestand (Figuur 4).



Figuur 4: Schets van veranderingen van druk op een breuk ten gevolge van de injectie van koud water (verticale doorsnede).

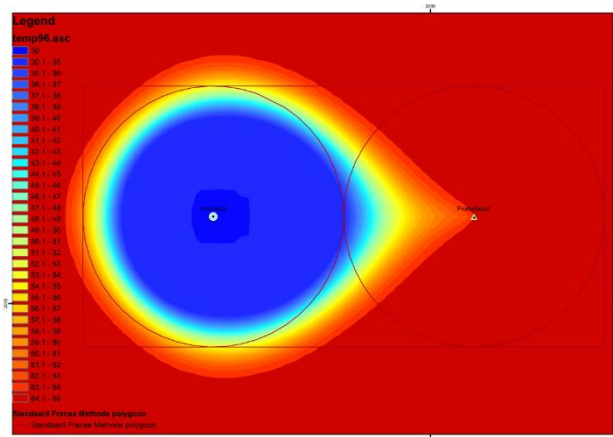
1. *Situatie voordat de injectie van koudwater begint met een bepaalde druk loodrecht op de breuk (normaal spanning, zie pijltjes). De normaalspanning houdt als het ware de breuk vast; hoe hoger de normaalspanning hoe moeilijker beweging langs de breuk kan plaatsvinden.*
2. *Er is een koudwaterbel ontstaan in het reservoir*
3. *Ten gevolge van de koudwaterbel krimpt het gesteente een beetje. Het resultaat is dat er lokaal minder normaalspanning op de breuk komt te staan, in het bijzonder als de koudwaterbel de breuk raakt.*
4. *Door de opgelegde druk tijdens de injectie wordt de normaalspanning op de breuk ook nog iets minder. Als de normaalspanning te laag wordt, kan breukbeweging plaatsvinden.*

Als door die geïnduceerde spanningsverandering de spanning op een breuk de kritische drempel overschrijdt, kan een schuifbeweging ontstaan die of geleidelijk is, of met een schok plaatsvindt. Er ontstaat enkel in dat laatste geval een aardbeving. De verandering in de ondergrondse spanning is enkel daar waar het gesteente is afgekoeld groot: dus in de koudwaterbel in het reservoir (Figuur 5).

Datum
10 november 2021

Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
9/12



Figuur 5: Uitbreiding van de koudwaterbel bij koudwaterdoorbraak in de productieput in een homogeen reservoir, van bovenaf gezien.

Vervolgens is te berekenen hoe groot het afgekoelde oppervlak kan zijn en daaruit kan een aardbevingsmagnitude berekend worden, onder de aanname dat de breukbeweging binnen het gekoelde oppervlak blijft. Dit is voor een aantal scenario's berekend. De uitkomst is dat door geothermiewinning een beving van meer dan 3,5 op de schaal van Richter zeer onwaarschijnlijk is (TNO-AGE, 2020) (Figuur 6).

Om te toetsen wat de mate van de dreiging van het optreden van aardbevingen is bij een aardwarmteproject, wordt in beginsel gebruik gemaakt van een toetsingsmethode seismiteit (Q-con & IF, 2016). Het doel van deze methode is om aardwarmteprojecten die een "lage" seismiciteitsdreiging hebben te scheiden van die met een "niet lage" seismiciteitsdreiging. Als het project in de categorie "lage seismiciteitsdreiging" valt, is de kans dat er een aardbeving in het voelbare bereik optreedt laag. Vanuit die optiek kan er aardwarmte gewonnen worden, waarbij de reguliere seismische monitoring door het KNMI afdoende wordt geacht om, mocht er een beving optreden, die te registreren, te lokaliseren en vervolgens gepaste maatregelen te nemen. Indien het aardwarmteproject in de categorie "niet laag" valt, is nader detailonderzoek, specifiek gericht op de geïnduceerde ondergrondse spanningen en het optreden van aardbevingen, een verplichting. Daarnaast is het ook verplicht om een lokaal seismisch netwerk te installeren om eventuele bevingen te registreren, te bestuderen en vervolgens te toetsen tegen het afgesproken monitorings- en controleprotocol en dan de afgesproken gepaste actie te nemen.

Het Oostvoorneproject bevindt zich niet in een van nature seismisch actief gebied en ligt evenmin in de nabijheid van een gasveld. Daarnaast beogen de initiatiefnemers te produceren uit (en ook te injecteren in) een poreuze zandsteenlaag en niet primair uit een breukzone. De belangrijkste dreigingselementen voor geïnduceerde seismiteit door aardwarmtewinning zijn daarom niet van toepassing. Vervolgens zijn er nog een negental elementen die getoetst en gescoord moeten worden (Q-con & IF, 2016). De uitkomst van deze toetsing is dat het Oostvoorneproject in de "lage" seismiciteitsdreigingsklasse valt.

Datum
10 november 2021

Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
10/12

Magnitude ^[3] en beschrijving	Waarneembare gevolgen	Energie ^[4]		Frequentie (schatting)	Voorbeelden)
		Joule TNT-equivalent	Vergelijkbaar met		
1 tm 1,9 Minuscule	Wordt niet gevoeld door de mens, maar wel geregistreerd door seismografen. Zal nooit schade veroorzaken.	2 MJ - 62 MJ 0,5 - 14 kg TNT	handgranaat	6000 per dag	
2 tm 2,9 Zeer licht	Meelbaar; wordt slechts door weinig mensen waargenomen onder gunstige omstandigheden; hoogstens enkele (zeer) lichte objecten kunnen bewegen; vrijwel nooit enige vorm van schade.	63 MJ - 1,9 GJ 15 - 490 kg TNT	bom uit de late Tweede Wereldoorlog, Blockbuster	1000 per dag	
3 tm 3,9 Licht	Veel mensen nemen trillingen als van een voorbijrijdende vrachtwagen waar; tegen elkaar staande glazen rinkelen; hooguit zeer lichte schade mogelijk, zoals losse dakpannen.	2 GJ - 62 GJ 0,5 - 14 ton TNT	MOAB, kernramp van Tsjernobyl	49 000 per jaar	Loppersum 2003
4 tm 4,9 Gemiddeld	Door vrijwel iedereen gevoelde trillingen als van zwaar voorbijrijdend verkeer; vrije slinger beweegt duidelijk; deuren, glazen en borden rammelen, raamluiken klapperen; geparkeerde auto's schommelen; lichte schade mogelijk aan bijvoorbeeld schoorstenen; in wegdek of oude en zwakke gebouwen kunnen kleine scheuren ontstaan.	63 GJ - 1,9 TJ 15 Ety - 490 ton TNT	klein kernwapen	6200 per jaar	Goch 2011
5 tm 5,9 Vrij krachtig	Heflige trillingen, die door iedereen met schrik worden waargenomen; meubels bewegen, voorwerpen vallen om; klokken blijven stillstaan; schoorstenen kunnen instorten, scheuren in wegdek; lichte tot matige schade aan gewone gebouwen, zoals scheuren in stucwerk; oude en zwakke gebouwen kunnen zware schade oplopen of (gedeeltelijk) instorten; veel mensen vertalen in paniek hun huizen; over het algemeen geen sprake van levensgevaar; wel gevaar van verwondingen.	2 TJ - 62 TJ 0,5 - 14 kiloton TNT		800 per jaar	Roermond 1992
6 tm 6,9 Krachtig	Wordt door alle betrokkenen met grote schrik ervaren; ook in een rijdende auto voelbaar; paniek; mensen vertalen snel hun huizen; grote scheuren in wegdek; veel gebouwen lopen matige tot zware schade op; oude en zwakke gebouwen kunnen helemaal instorten; bomen zwaaien heen en weer als bij sterke wind; instorten doden en gewonden mogelijk; aan de kust kunnen tsunami's optreden; grote schade mogelijk binnen een straal van meer dan 150 kilometer.	63 TJ - 1,9 PJ 15 - 490 kiloton TNT	middelgroot kernwapen zoals Fat Man	120 per jaar	Spilak 1988, Kirgizie 2008, L'Aquila 2009, Christchurch 2011, Bokoira 2012, Kaohsiung 2016, Maltignano 2016, Bodrum 2017
7 tm 7,9 Zwaar	Grootschalige paniek; mensen trachten in paniek naar buiten te komen; acuut levensgevaar in veel gebouwen; alleen sterke gebouwen blijven staan; grond kan helemaal openscheuren; sommige bomen worden ontworteld, vaak honderden doden en gewonden; gas- en waterleidingen breken; gedeeltelijk catastrofale gevolgen; aan kusten grote vloedgolven mogelijk.	2 PJ - 62 PJ 0,5 - 14 megaton TNT	groot kernwapen	18 per jaar	Kashmir 2005, Seitzuan 2008, Java 2009, Haiti 2010, Nepal 2015, Mexico (Puebla) 2017
8 tm 8,9 Zeer zwaar	Grote verwoesting; vrijwel alle gebouwen worden onbewoonbaar of storten helemaal in; mogelijk vele duizenden doden en gewonden; bomen worden massaal ontworteld; elektriciteitspalen begeven het; acuut levensgevaar zowel binnen als buiten gebouwen; aan kusten catastrofale, tot 40 meter hoge vloedgolven mogelijk.	63 PJ - 1,9 EJ 15 - 490 megaton TNT	Tsar Bomba of meteoriet van 100-200 m diameter	1 per jaar	San Francisco 1906, Mexico 1985, Chili 2010, Mexico (Chiapas) 2017
9 tm 9,9 Verwoestend	Grote ramp met mogelijk totale verwoesting over duizenden kilometers; alle gebouwen storten volledig in; lokale aardsschotten verschuiven; rotsen en gebergtes kunnen scheuren; honderdduizenden of zelfs miljoenen doden en gewonden mogelijk en plaatselijk zelfs volledige vernietiging van alle leven; enorme vloedgolven die mogelijk meerdere continenten zullen aantasten. Verder mogelijk: grote verschuivingen van de tektonische platen; verschijnen, verschuiven of verdwijnen van delen van landen en eilanden; vorming van nieuwe subductiezones; verandering van de nutatie of de omwentelingsnelheid van de aarde.	2 EJ - 62 EJ 0,5 - 14 gigaton TNT	meteoriet van 300-700 m diameter	Enns in de 20 tot 30 jaar	Lissabon 1755, Valdivia 1960, Alaska 1964, Indische Oceaan 2004, Sendai 2011
10,0 tm 10,9 Alles- verwoestend	Niets blijft overeind over mogelijk vele duizenden kilometers; landschap verandert sterk; gevaar voor veel levensvormen; grote verschuivingen van de tektonische platen; landen en eilanden veranderen van plaats; verandering van de nutatie of de omwentelingsnelheid van de aarde.	63 EJ - 1,9 ZJ 15 - 490 gigaton TNT	meteoriet van 800-2500 m diameter	Nog nooit waargenomen	
11,0 tm 11,9 Catastrofaal	Niets blijft overeind over mogelijk vele duizenden kilometers; landschap verandert sterk; gevaar voor veel levensvormen; grote verschuivingen van de tektonische platen; landen en eilanden veranderen van plaats; verandering van de nutatie of de omwentelingsnelheid van de aarde.	2 ZJ - 62 ZJ 0,5 - 14 teraton TNT	meteoriet van 3-9 km diameter	Nog nooit waargenomen	
12,0 en hoger Totaal catastrofaal	Volledig catastrofale en zeer diep ingrijpende geografische veranderingen; gevaar voor alle levensvormen; landschap verandert volledig; maximale gevolgen voor de geografische ordening van water en land; huidige bestaande wereldkaarten zouden onbruikbaar zijn geworden.	63 ZJ en meer 15 teraton TNT en meer	meteoriet vanaf 10 km diameter of totale energie die de aarde per dag van de zon ontvangt en meer	Nog nooit waargenomen	Yucatan-inslag

Figuur 6: Aardbeving-classificatie volgens de schaal van Richter. (bron Wikipedia). Deze schaal geldt met name voor aardbevingen met een diepe hardlocatie.

3. Verhandeling over watercirculatie en gas bijvangst.

In Nederland zijn op dit moment 27 aardwarmtesystemen gerealiseerd. In vrijwel alle systemen komt er gas mee met het geproduceerde geothermiewater. Het betreft, in alle gevallen, gas dat opgelost is in het geothermiewater als dat zich op reservoirdiepte bevindt. Dit kan zo stellig gezegd worden door een samenstel van argumenten:

- 1) De dieptekaart van het reservoir laat geen structuur zien waarin het gas opgevangen kan worden. Gas en ook olie, beide lichter dan water, zullen steeds verder door de permeabele lagen naar boven (ondiepere lagen) stromen totdat ze gevangen worden in een "fuijk" of aan het maaveld ontsnappen. Een "fuijk" voor gas en olie is een poreus en permeabel gesteente dat aan boven- en zijkanten is begrensd door niet-permeabel, niet doorlatend gesteente. Eigenlijk een structuur gelijk aan een aardgasveld.
- 2) Laboratoriumtesten laten zien dat de hoeveelheid vrijgekomen gas onder de heersende reservoirdruk en temperatuur geheel in oplossing gaan.
- 3) De opvoerpomp (een ESP-pomp) werkt niet of heel slecht als er een gasfase onder de pomp aanwezig is. Bij het project Oostvoorne werkt de

ESP-pomp naar behoren en bevindt er zich dus geen vrij gas in de put in het interval tussen reservoir en ESP-pomp.

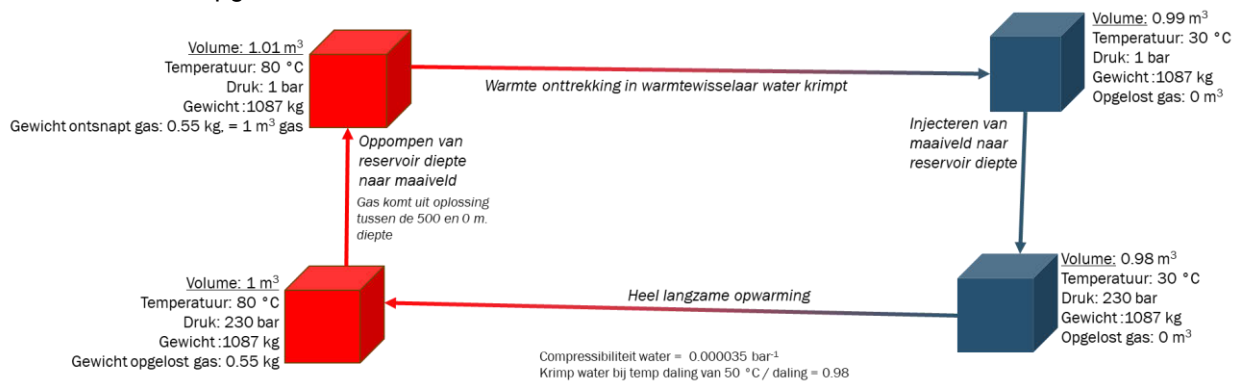
- 4) Uit de puttest resultaten en de interpretatie van de meetreeksen van die puttest is geen vrij gas gedetecteerd.

Datum
10 november 2021

Onze referentie
AGE 21-10.087

Blad
11/12

In Figuur 7 is schematisch weergegeven hoe de volumeverandering van één kubieke meter geothermisch water vanuit het reservoir op diepte verandert door uitzetting vanwege drukontlasting (+1%), krimp door afkoeling (-2%), krimp door weer onder druk zetten (-1%) en uitzetting door langzame opwarming (+2%). Dit komt doordat de krimp en de uitzetting ten gevolge van temperatuurverandering in dit temperatuurbereik en compressibiliteit van water klein is. Er is gemeten dat er onder atmosferische condities (1 bar), per kubieke meter geproduceerd water circa 1 kubieke meter gas vrijkomt. Qua gewicht is de verhouding ongeveer een halve kilo ten opzichte van 1087 kg (het gewicht van één kubieke meter geothermisch water). Gas heeft een hele hoge compressibiliteit en kan ook in water oplossen. Hoe hoger de druk en temperatuur, des te meer gas in water kan oplossen. Osif (1988) geeft aan dat de compressibiliteit van water niet verandert als er opgelost gas in zit. Het gasanalyse rapport (PanTerra, 1 sept 2015) geeft aan dat het gas uit oplossing treedt bij een druk lager dan circa 48 bar. Als het gas in oplossing zit, heeft het vrijwel geen invloed op het volume aan water / vloeistof waarin het wordt opgelost.



Figuur 7: Volumeverandering van één kubieke meter geothermisch water gedurende het traject van oppompen, afkoeling en opgelost gasontsnapping.

Referenties:

- Buijze, L., Bijsterveld, L. van, Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B., Wees, J.D. van & Heege, J.H., 2019. Review of worldwide geothermal projects: mechanisms and occurrence of induced seismicity. Report TNO2019R100043. TNO – Geological Survey of the Netherlands (Utrecht).
- Fokker, P. A., Van Leijen, F. J., Orlic, B., Van Der Marel, H., & Hanssen, R. F. (2018). Subsidence in the Dutch Wadden Sea. *Geologie en Mij*
- P.A. Fokker & J.D. Van Wees (2014). Surface Movement Induced by Geothermal Operations. European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, 76th EAGE Conference and Exhibition 2014, June 2014, Volume 2014, p.1 - 5.
- Ganjdanesh, R., Hosseini, S.A. Potential assessment of methane and heat production from geopressured–geothermal aquifers. *Geotherm Energy* 4, 16 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40517-016-0058-4>
- Q-con GmbH & IF Technology B.V., Defining the Framework for Seismic Hazard Assessment in Geothermal Projects V0.1, 5 oktober 2016.
- Panterra 1 sept 2015, PVT Water Analysis Draft Report Well BRI-GT-01 Aardwarmte Vierpolders
- WEP 2012, Evaluation of the hydrocarbon risk for the GEOMECH geothermal doublet April 2012
- NAM 2020, Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS - raming 2020 March 2020
- NAM 2007, Winningsplan Groningen veld zie <https://www.nlog.nl/field-web/rest/field/document/637328684>
- TNO-AGE 2020, Risico's van eventuele seismiteit bij geothermie, weblocatie https://www.nlog.nl/sites/default/files/2020-05/age_20-10.036_riscos_seismiteit_geothermie.pdf

Datum

10 november 2021

Onze referentie

AGE 21-10.087

Blad

12/12