

Nederlandstalige Samenvatting

“Technical Review of the Bergermeer Seismicity Study TNO Report 2008-U-R1071/B, 6
November 2008”
en de antwoorden op de vragen van Gasalarm2 en de Tcbb

Dr. J.A. de Waal, SodM, januari 2010

Nederlandstalige Samenvatting

"Technical Review of the Bergermeer Seismicity Study TNO Report 2008-U-R1071/B, 6 November 2008"

en de antwoorden op de vragen van Gasalarm2 en de Tcbb
Dr. J.A. de Waal, SodM, januari 2010

Verantwoording

Dit document is een Nederlandstalige samenvatting van het MIT (Massachusetts Institute of Technology) rapport over de contra expertise die door het MIT is uitgevoerd op de studie van TNO naar het risico van aardbevingen door gasinjectie en gasopslag in het Bergermeer veld met de titel "Bergermeer Seismicity Study". De vertaling is bedoeld om het MIT werk voor een breder publiek toegankelijk te maken. De Engelstalige samenvatting van het MIT rapport en het gedeelte van het MIT rapport met de antwoorden van de MIT specialisten op de vragen van "Gasalarm2" en de "Technische commissie bodembeweging" (Tcbb) worden zo nauwkeurig mogelijk gevolgd. Waar relevant zijn aanvullende opmerkingen toegevoegd om zaken te verduidelijken. Deze aanvullende opmerkingen zijn te onderscheiden als aparte tekstblokken. De Nederlandstalige samenvatting komt geheel voor rekening van de auteur en is niet de verantwoordelijkheid van Professor Bradford Hager, Professor Nafi Toksöz of het MIT. De Nederlandse samenvatting moet worden gezien als een weergave van wat er volgens de auteur in MIT's contra expertise staat. Waar verschillen worden gezien tussen de Nederlandstalige samenvatting en het oorspronkelijke MIT rapport geldt het MIT rapport.

SAMENVATTING CONTRA EXPERTISE rapport MIT

De TNO studie is uitgevoerd om het risico op aardbevingen veroorzaakt door de voorgestelde gasinjectie en gasopslag in het Bergermeer veld vast te stellen. Door de injectie van koud gas (tijdens de startfase van het project) en door de latere gasproductie zullen de temperaturen en de drukken in het veld veranderen. Hierdoor en door verschillen in samendrukking en uitzetting in verschillende delen van het veld verandert de spanningstoestand in het gesteente.

Het TNO rapport "Bergermeer Seismicity Study" is een veelomvattend document. We hebben het rapport, de conclusies en aanbevelingen, en de omvangrijke lijst van referenties in detail doorgenomen. Het rapport bestaat uit drie delen: reservoir modellering, geomechanische modellering en een seismische risico analyse. Voordat we in meer detail ingaan op de hoofdconclusies van de TNO studie (in dezelfde volgorde als in het TNO rapport) geven we hier alvast onze belangrijkste conclusie weer:

We zijn het eens met het resultaat van de TNO studie dat de maximale magnitude van een aardbeving die zich tijdens de voorgestelde injectie- en productiefase van het Bergermeer veld voor zou kunnen doen niet groter is dan $M_L = 3,9$.

Reservoir modellering

TNO heeft de temperatuurveranderingen berekend voor één productie cyclus. De twee conclusies uit deze berekeningen zoals samengevat door TNO (*met ons – dwz MIT - commentaar in cursief*) zijn:

- 1) Het injecteren van het koude kussengas en het werkgas en één productie fase leidt tot een temperatuurdaling in de omgeving van de putten. De temperatuur in de rest van het reservoir verandert nauwelijks.

De beoordelaars zijn het eens met deze conclusie

- 2) De grootste afname van de temperatuur vindt plaats tijdens de eerste injectieperiode van twee jaar. Daarna is de reservoirdruk zoveel toegenomen dat het injectiegas moet worden samengeperst waardoor de injectie temperatuur omhoog gaat. De daarop volgende gasproductie leidt tot opwarming van de eerder afgekoelde gebieden.

De beoordelaars zijn het eens met deze conclusie

Hager en Toksöz zijn het eens met de resultaten van de TNO berekeningen voor de temperatuurveranderingen die tijdens gasopslag en gasproductie kunnen optreden. Die temperatuurveranderingen zullen alleen optreden in de buurt van de injectieputten en dan voornamelijk tijdens de eerste twee jaar van gasinjectie. Daarna worden de temperatuurverschillen weer kleiner omdat dan gecompriemd, en dus warmer, gas geïnjecteerd zal worden.

Geomechanische modellering

De drukken en temperaturen die met het reservoir model berekend zijn, worden gebruikt om met behulp van 2-dimensionale geomechanische modellen de veranderingen in spanning, vervorming en stabiliteit van de breuken te berekenen. Daarbij is een groot aantal parameters van belang ten aanzien van de geologische structuur van het veld (zowel in twee als drie dimensies), de spanningstoestand, de begintoestand en de materiaaleigenschappen van het gesteente. Niet al deze parameters zijn nauwkeurig bekend. De beoordelaars vinden dat de resultaten van deze berekeningen op zichzelf niet voldoende zijn om de risico's van aardbevingen nauwkeurig vast te stellen. Desalniettemin zijn zulke berekeningen nuttig om een beeld te krijgen van wat er zich in het veld afspeelt en kunnen ze bijdragen aan een beter begrip van geïnduceerde aardbevingen.

De vier belangrijkste conclusies uit de geomechanische modelberekeningen van TNO (*met ons commentaar in cursief*) zijn:

- 3) De berekeningen geven aan dat tijdens de drukdaling tussen 1971 en 2006 alleen delen van de breuken die het reservoir doorsnijden of begrenzen de mogelijkheid hadden om te gaan bewegen. Grote bewegingen kwamen voor langs de centrale breuk, waar reservoirgesteente aan weerszijden van de breuk overlappend is (in direct contact met elkaar staan). De op deze breuken berekende spanningstoestand aan het eind van de productieperiode komt in de buurt van bezwijkcondities.

De aardbevingen die tijdens de productiefase zijn waargenomen leveren belangrijk bewijs dat deze breuken inderdaad weer zijn gaan bewegen. Sinds 2001 is de reservoir druk ongeveer evenveel gedaald als tussen de aardbevingen van 1994 en 2001. Het belang van deze conclusie is dat er in het Bergermeer veld opnieuw aardbevingen met een vergelijkbare magnitude ($M_L = 3,0-3,5$) plaats kunnen vinden, ook zonder dat er wordt geïnjecteerd of geproduceerd.

- 4) De geomechanische modelberekeningen tonen aan dat injectie leidt tot stabilisatie van de breuken die het reservoir doorsnijden en begrenzen. Plaatselijk wordt enige breuk-beweging voorspeld voor de centrale breuk boven en onder het gedeelte waar reservoirgesteente aan weerszijden van de breuk in direct contact staat. Breukbewegingen berekend voor de injectiefase zijn een orde van grootte kleiner dan tijdens drukdaling.

Sinds de mogelijke ontlading van de spanningen door de aardbevingen van 2001 zijn er door verdere productie opnieuw spanningen opgebouwd. De beoordelaars zijn het ermee eens dat de initiële injectie fase kan leiden tot afname van de schuifspanningen over de breuken en zo kan bijdragen aan stabilisatie van die breuken. Maar de resultaten van de geomechanische berekeningen geven mogelijk geen goed beeld van alle soorten breukbewegingen die tijdens injectie kunnen optreden. Dat komt omdat de spanningstoestand die wordt berekend bij de aanvang van de injectie niet in overeenstemming is met de waargenomen richting van de breukbewegingen tijdens de

eerdere aardbevingen. De drukverandering door de geplande injectie is qua grootte vergelijkbaar met de drukverandering tussen 1994 en 2001. Die drukverandering kan resulteren in breukbewegingen die vergelijkbaar zijn met de breukbewegingen die in 2001 hebben geleid tot een aardbeving met magnitude $M_L = 3.5$.

- 5) De geomechanische modelberekeningen voorspellen geen breukbewegingen tijdens de productie van het werkgas.

Net als onder conclusie 4 zijn de beoordelaars van mening dat de geomechanische model berekeningen mogelijk geen goed beeld geven van alle breukbewegingen die tijdens de productie van het werkgas zouden kunnen worden opgewekt.

- 6) De lokale afname in temperatuur tijdens de initiële injectiefase heeft geen invloed op de stabiliteit van bekende breuken indien de injectieputten tenminste 200 m (inclusief onzekerheidsmarges) van deze breuken verwijderd blijven.

De beoordelaars zijn het eens met deze conclusie.

Hager en Toksöz vinden de geomechanische berekeningen die TNO heeft gedaan nuttig, maar niet geschikt voor betrouwbare voorspellingen van het risico op en de kracht van aardbevingen. Dat heeft twee redenen. Er is een vereenvoudigd model gebruikt en er zijn onzekerheden in de berekeningen. Er zou een nauwkeuriger model kunnen worden gebruikt maar een aantal van de overblijvende onzekerheden worden daarmee niet opgelost. De TNO berekeningen voorspellen bewegingen van de breuken op plaatsen waar ze inderdaad hebben plaatsgevonden tijdens de aardbevingen in 1994 en 2001. Maar de waargenomen richting van die beweging was anders dan berekend.

Sinds die tijd is de gasdruk in het veld ongeveer even veel gezakt als tussen 1994 en 2001. Hager en Toksöz denken daarom dat er opnieuw kans is op bevingen van vergelijkbare sterkte, zelfs als er geen gas wordt opgeslagen. Ze zijn het ermee eens dat tijdens de eerste fase van gas injectie de kans op aardbevingen waarschijnlijk zal verminderen, maar in welke mate is moeilijk nauwkeurig te voorspellen. Ze zijn het eens met TNO dat de temperatuurveranderingen in het veld die optreden door gasopslag en productie geen invloed zullen hebben als de injectieputten maar meer dan 200 m van de breuken verwijderd blijven (met inachtneming van de positieonzekerheid).

Seismische risico analyse

De magnitudes van mogelijke aardbevingen zijn afgeleid uit de breukbewegingen die zijn berekend met behulp van de geomechanische modellen. De conclusies uit de TNO studie (*met ons commentaar in cursief*) zijn:

- 7) De grootste breukbewegingen die de geomechanische modelberekeningen tonen gedurende de injectiefase komen overeen met seismische magnitudes tussen $M_L = 2,4$ en $2,7$.

De resultaten van geomechanische modelberekeningen hangen af van een groot aantal parameters met een verschillende mate van onzekerheid. De reviewers vinden een spreiding in magnitude van $M_L = 2,4 - 2,7$ daarom te beperkt. Aardbevingen met een grotere magnitude kunnen niet worden uitgesloten.

De maximaal mogelijke seismische magnitude is $3,9$. Een grotere magnitude is onwaarschijnlijk gegeven de beperkte afmetingen van de breuken.

De beoordelaars ondersteunen de maximale magnitude van $M_L = 3,9$

Hager en Toksöz zeggen hier min of meer hetzelfde als in hun commentaar op conclusies 4 en 5. Ze zijn het eens met TNO dat de kracht van een eventuele nieuwe aardbeving niet hoger zal zijn dan magnitude $M_L = 3,9$. Er zit maar een bepaalde hoeveelheid energie opgeslagen in het breuksysteem en die energie bepaald de maximale magnitude van een mogelijke beving. Een specifiek punt van meningsverschil tussen de conclusie van het TNO rapport en MIT betreft punt 7: de berekende magnitudes 2.4-2.7 zijn volgens MIT te beperkt, en "grotere magnitudes kunnen niet worden uitgesloten".

Helemaal onafhankelijk daarvan is dat een maximale beving van $M_L = 3,9$ in overeenstemming met een voorspelling gebaseerd op de beschikbare data van alle eerdere aardbevingen door gaswinning die in Nederland hebben plaatsgevonden.

Aanbevelingen

De reviewers vinden de zes aanbevelingen in het TNO rapport redelijk en ondersteunen deze. We hebben wel een opmerking ten aanzien van aanbevelingen 3 en 4: We raden aan om een aanpassing van de geomechanische modellen te overwegen zodat ze een verklaring geven voor de waargenomen bewegingsrichting van de breuk tijdens de aardbevingen in 1994 en 2001. Dan kunnen de geomechanische modellen gebruikt worden om de invloed van onzekerheden op reservoirniveau te onderzoeken.

Hager en Toksöz stellen voor om te onderzoeken of met een aangepast (bv. 3-dimensionaal) model breukbewegingen kunnen worden voorspeld die meer in detail overeenkomen met de richting van de waargenomen beweging tijdens de eerdere aardbevingen. Als dat lukt, zou zo'n model ook gebruikt kunnen worden om de invloed van de verschillende onzekerheden door te rekenen.

Antwoorden op de vragen van stichting Gasalarm2

1. TNO gebruikt elastoplastische geomechanische modellen om de mogelijke beweging op een breukvlak te berekenen. Daarbij zijn modellen van het reservoir en de breukstructuur gekozen die gevoelig zijn voor breuk re-activatie. Plastische (omkeerbare) beweging op de breuk wordt berekend voor de periodes van productie en gasinjectie onder de veronderstelling van voortdurende evenwichtscondities (dit impliceert dat alle breukbewegingen uit eerdere drukdaling in het veld zijn vereffend). Gasalarm2 vindt dat het werkelijke breukvlak kan afwijken van de ideale vorm in het model. Die afwijkingen zullen vanaf hier obstructies genoemd worden. Zulke obstructies (bijvoorbeeld richels) kunnen voorkomen dat beweging over het breukvlak geleidelijke en a-seismisch plaatsvindt. Daarom kan niet worden uitgesloten dat een of meer reservoirbreuken in een metastabiele toestand zijn of raken: een "overtijdse aardbeving" die alsnog kan worden geactiveerd.

Gasalarm2 is van mening dat de modelvoorspellingen van TNO van de maximaal mogelijke beweging door de, relatief kleine, drukveranderingen gedurende één injectie-productie cyclus (overeenkomend met $M_L = 2,4 - 2,7$ wanneer ze op een niet-elastische manier plaatsvinden) een voor de hand liggende uitkomst zijn, gegeven de aannames in het model. Ze leveren dan ook geen bewijs dat grotere trillingen niet kunnen worden opgewekt.

Vraag: Is de bovenbeschreven aanpak van TNO een volledige en betrouwbare manier om de maximaal mogelijke potentiële breukbeweging gedurende het project te onderzoeken?

Antwoord: In het TNO model wordt aangenomen dat alle beweging op een gegeven breuk kan plaatsvinden tijdens een enkele aardbeving. Sterke obstructies, die niet zijn bezweken tijdens eerdere belasting, kunnen de hoeveelheid beweging beperken. De belasting tijdens drukdaling en injectie is cyclisch. Daarom is niet te verwachten dat de opbouw van spanning op obstructies op dezelfde wijze zal plaatsvinden als bij tektonische breuken waar de belasting altijd dezelfde kant opgaat. De TNO conclusies zijn daarom waarschijnlijk conservatief ten aanzien van het effect van spanningsopbouw op obstructies.

Echter, het gebruik van tweedimensionale modellen kan de opbouw van spanning door obstructies onderschatten wanneer spanning "uit het vlak" wordt overgedragen naar een positie verder op de breuk zoals getoond in Fig. 1 (opm. via een soort scharnierwerking in 3D). Het is daarom vanuit een geomechanisch oogpunt aannemelijk dat bevingen met een grotere magnitude dan voorspeld door TNO kunnen optreden. Deze conclusie stemt overeen met zowel de seismische analyse van TNO als met onze eigen gevolgtrekking op basis van seismische modellen, dat een maximaal te verwachten aardbeving een magnitude van $M_L = 3,9$ kan hebben.

Hager en Toksöz denken niet dat nog "hangende" bevingen die later geactiveerd kunnen worden belangrijk zijn. Maar ze denken wel dat er grotere bevingen dan $M_L = 2,4 - 2,7$ kunnen optreden. Dat komt omdat ze vermoeden dat de breuken kunnen gaan bewegen op een manier die niet kan worden nagebootst met het TNO model. Ze zijn het er op basis van andere argumenten wel mee eens dat het onwaarschijnlijk is dat die bevingen groter kunnen worden dan $M_L = 3,9$.

2. Met referentie naar de berekeningen in hoofdstuk 7 van het TNO rapport stelt Gasalarm2 dat een deel van de berekende slip nog niet is vereffend tijdens de vier (historische) aardbevingen en dus nog aanwezig kan zijn als "hangende aardbeving". Op basis van Tabel 7-1 in het TNO rapport kan de magnitude van zo'n beving 3,8 of groter zijn (bij gebruik van de dynamische schuifmodulus in plaats van de statische schuifmodulus) en rekening houdend met de onzekerheid in parameters en dimensies (zie ook vraag 4).

Vraag: Wat vinden de experts hiervan?

Antwoord: We zijn het eens met TNO dat de statische schuifmodulus moet worden gebruikt om de spanningstoestand te berekenen tijdens quasi-statische belasting. Het is deze spanning, opgebouwd door langzame belasting, die vrijkomt bij een aardbeving. Het gebruik van de dynamische modulus waardoor de berekende magnitude van een mogelijke aardbeving toeneemt is niet gerechtvaardigd.

Andere onzekerheden, zoals besproken in het antwoord op vraag nummer 1 van Gasalarm2, ondersteunen de schatting van Gasalarm2 dat een aardbeving met magnitude 3.8 geloofwaardig is, maar niet vanwege de argumenten onder vraag 2.

De dynamische schuifweerstand is een materiaaleigenschap die geldt voor snelle bewegingen, de statische schuifweerstand is dezelfde eigenschap maar dan voor relatief langzame bewegingen. Hager en Toksöz vinden dat TNO de juiste materiaaleigenschap (de statische schuifweerstand) heeft gebruikt en ze zijn het oneens met de suggestie van Gasalarm2 om een andere materiaaleigenschap (de dynamische schuifweerstand) te gebruiken die tot de voorspelling van sterkere trillingen zou leiden. Hager en Toksöz denken wel dat een aardbeving van magnitude 3,8 zou kunnen optreden, maar dat heeft een heel andere reden. [NB: de maximale magnitude van een aardbeving die zich kan voordoen bij de exploitatie van Bergermeer is geschat op $M_L = 3,9$.]

3. Figuur 3.2 van het rapport over de seismiek toont een 3-dimensioneel plaatje van het Bergermeer gasveld (gebaseerd op een model van Horizon, 2006). Op basis van deze afbeelding komt Gasalarm2 tot de conclusie dat de belangrijkste (centrale) breuk langer kan zijn dan is aangenomen. Volgens Gasalarm2 is de lengte waarschijnlijk 4,1 tot 5,9 kilometer en niet 2,5 kilometer. Gasalarm2 veronderstelt daarom dat de lengte van het deel van de breuk dat kan gaan bewegen veel groter kan zijn dan wordt gesteld in tabel 2.2 van het TNO rapport en dat daarom de magnitude van mogelijke aardbevingen ook veel groter kan zijn ($M_L = 4,1$).

Vraag: Wat is de relatie tussen de lengte van de breuk, het deel van de breuk dat tijdens een beving waarschijnlijk gaat bewegen en de maximale magnitude van een aardbeving? Hoe belangrijk is de schatting van de totale lengte van de centrale breuk daarin?

Antwoord: De magnitude van een aardbeving wordt niet bepaald door de totale lengte van de breuk maar door de lengte van het deel van de breuk dat tijdens de beving in beweging komt. De schatting van de grootte van het deel dat in beweging komt is dus van belang, niet de lengte van de totale breuk. We zijn het eens met het TNO rapport dat het onwaarschijnlijk is dat het deel van de centrale breuk in het Zechstein steenzout zal gaan bewegen tijdens een aardbeving. De lengte van 2,5 km is daarom adequaat.

4. Gasalarm2 is van mening dat de stabilisatie van de breukstructuur op reservoirniveau door de druktoename door injectie van gering belang vergeleken met het effect van onvolledige ontlasting van eerder gecreëerde spanningen (opm. de zgn. "overtijdse aardbevingen", zie ook vraag 1 en 2). TNO neemt aan dat het weer op druk brengen van het reservoir zal leiden tot een stabilisatie van de breukstructuur (zie hoofdstuk 6.3 van het TNO rapport).

Vraag: wat vinden de experts hiervan?

Antwoord: Het weer op druk brengen zal er in het algemeen toe leiden dat de spanningsopbouw ten gevolge van de eerdere productie afneemt. In dit geval is de mate waarin het reservoir weer op druk wordt gebracht aanzienlijk minder dan de eerdere drukdaling, dus dat effect wordt niet volledig teniet gedaan. Er zit vaak vertraging tussen het moment waarop een breuk onder spanning komt en het moment waarop hij gaat bewegen en een aardbeving veroorzaakt. Het is, inderdaad, vrij normaal dat er nog aardbevingen in een reservoir optreden na het stopzetten van de productie. Het is dus

mogelijk dat er bij Bergermeer nog bevingen gaan plaatsvinden, ook als het reservoir niet opnieuw op druk gebracht wordt.

5. Gasalarm2 merkt op dat TNO alleen de eerste productie/injectie cyclus voor de operationele fase van de BGS heeft gemodelleerd. Er is, in het bijzonder, niet gekeken naar het effect van de productie van het kussengas (gebaseerd op een realistische schatting van de dan geldende reservoir condities). De seismische risico's tijdens de uiteindelijke fase waarin het kussengas wordt teruggewonnen kunnen niet worden verwaarloosd, nog afgezien van de effecten van slijtage en vermoeiing van het breukvlak (zie de TNO aanbeveling #3 op pagina 87).

Vraag: wat is de mening van de experts over het ontbreken van deze analyse?

Antwoord: Volgens ons zal het toevoegen van een analyse van de effecten van het terugwinnen van het kussengas de conclusies niet in belangrijke mate veranderen. Er wordt verwacht dat de terugwinningsfase hetzelfde zal verlopen als het tweede deel van de initiële productiefase.

6. Volgens Gasalarm2 worden de effecten van temperatuurverandering niet volledig behandeld in het TNO rapport. Gasalarm2 had met name een schatting verwacht van het effect van de preferentiële gasstroming door scheuren, kleine breuken en kanalen die zijn ontstaan tijdens de eerdere productiefase als ook een oordeel over de noodzakelijkheid van een extra veiligheidsmarge voor de afstand tussen de putten en de breuken.

Vraag:

- a. Wat vinden de experts hiervan? (afstand tot de breuken, verhitting door samenpersen, afkoeling door expansie, lange termijn effecten; het oppervlak van het reservoir dat wordt beïnvloed door temperatuureffecten)
b. Praktisch detail: wat vinden de experts van het gebruik van de bestaande putten om het kussengas te injecteren (de nabijheid van de interne breuk in overweging nemend).

Antwoord: Het gesteentevolume dat van temperatuur verandert is klein in vergelijking met de fysieke afmetingen van het brongebied van aardbevingen die kunnen leiden tot schade. Daarnaast is de permeabiliteit van het reservoirgesteente hoog, waardoor stroming via scheuren en breuken waarschijnlijk niet erg belangrijk is. Zulke paden van preferentiële stroming zullen bovendien parallel lopen met de breuken in overeenstemming met de tektonische structuur. Wij zijn van mening dat de thermische modellen voldoende conservatief zijn.

| |
|---|
| Hager en Toksöz denken dat de effecten van temperatuurveranderingen niet erg belangrijk zijn en ze geloven ook niet dat stroming door scheurtjes enz. in het reservoir de zaken veel zal beïnvloeden. |
|---|

7. Hypothese Gasalarm2: Op basis van de afmetingen van het reservoir, de reservoir parameters en de reservoir geschiedenis is er een waarschijnlijkheid van meer dan 15% dat, ten gevolge van de project activiteiten, het centrale deel van de gemeente Bergen (NH) zal worden getroffen door een aardbeving met een kracht die tien maal groter is dan de beving van 2001 en die grote financiële schade zal veroorzaken (gegeven het feit dat de 2001 beving al aanzienlijke schade veroorzaakte ($M_L = 3,5$, EMS intensiteit VI^+ bij het epicentrum, KNMI 2001)). (Ongeveer 4x sterker door de grotere magnitude (3,9 vs. 3,5) en 2x sterker gevoeld door de ligging van de bebouwde kom van Bergen direct boven het epicentrum). Referentie European Macro Seismic Scale.

Vraag: Levert de TNO studie volgens de experts voldoende bewijs om deze hypothese te weerleggen?

Antwoord: Wij zijn van mening dat, gegeven de onzekerheden in de relatie tussen breukparameters en lokale magnitude, het optreden van een beving met magnitude $M_L = 3,9$ in het Bergermeer veld tot de mogelijkheden behoort, maar het is onwaarschijnlijk en het heeft een veel lagere waarschijnlijkheid dan de 15% die door Gasalarm2 in deze vraag wordt gesuggereerd. Ten eerste is de kans dat er gedurende de levensduur van het gehele project een beving met magnitude $M_L = 3,9$ in het Bergermeer veld plaatsvindt kleiner dan 1% (gebaseerd op gegevens in van Eck et al, 2006). Ten tweede vormt de bebouwde kom van Bergen maar een klein deel van het gebied dat door de productie van het Bergermeer veld wordt beïnvloed. Ten derde zal de beweging op de schaarbreuk verminderen in de richting van Bergen en de geometrie van het reservoir lijkt daar eenvoudiger.

8. In aanvulling op vraag 7: *Hypothese: gegeven de onzekerheden in de eigenschappen van het gesteente, de precieze afmetingen van de breuk, de homogeniteit van het reservoir en de onzekerheid in het precieze mechanisme van de 2001 aardbeving en andere onzekerheden (bijvoorbeeld de thermische effecten gedurende injectie/productie, de effecten van waterinjectie) is er een waarschijnlijkheid van meer dan 5% dat er een aardbeving optreedt met een zelfs nog 20x sterker effect ($M_L = 4,1$) dan de beving van 2001.*

Vraag: Levert de TNO studie volgens de experts voldoende bewijs om deze hypothese te weerleggen?

Antwoord: Wij zijn van mening dat de kans op zo'n hevige aardbeving aanzienlijk kleiner is dan 5%. Zoals boven genoemd is de kans op een beving met een magnitude $M_L = 3,9$ kleiner dan 1% en de kans op een beving met magnitude $M_L = 4,1$ nog lager.

Hager en Toksöz zijn het niet eens met Gasalarm2 dat er een kans van (meer dan) 15% is op een aardbeving met een magnitude van $M_L = 3,9$. Volgens hen is zo'n beving wel mogelijk maar met een kans kleiner dan 1% voor de gehele levensduur van het project. Daar komt bij dat de kans van 1% geldt voor het hele veld terwijl de bebouwde kom van Bergen maar een deel van het risicogebied vormt. Ook zal zo'n beving, als hij mocht optreden, een kleiner effect hebben dan door Gasalarm2 wordt gedacht omdat de bebouwde kom van Bergen in de buurt van een deel van het veld ligt waar de breukbewegingen waarschijnlijk kleiner zullen zijn.

9. Vraag: wat vinden de experts van de behandeling en de rapportage van de effecten van onzekerheden, foutenanalyse, betrouwbaarheidsintervallen in de modelberekeningen en scenariokeuzes in de TNO studie?

Antwoord: In de TNO studie zijn de effecten van veel van de onzekerheden in materiaaleigenschappen bestudeerd door een groot aantal modellen met verschillende eigenschappen door te rekenen. Enkele andere oorzaken van onzekerheid en fouten-voortplanting die de interpretatie van sommige resultaten kunnen beïnvloeden worden niet besproken. Maar hun belangrijkste conclusie dat de te verwachten maximale lokale magnitude kleiner is dan $M_L = 3,9$ is robuust en voldoende conservatief.

We hebben in ons rapport aangegeven dat de invloed van onzekerheden in de geomechanische modellen die te maken hebben met de geometrie van de breuk niet voldoende wordt behandeld. In het bijzonder zijn de mogelijke effecten van de driedimensionale structuur niet onderzocht. Zoals aangegeven in Figuur 1 (aangehecht) kan schuifbeweging langs de centrale breuk over de zwakke Zechstein formatie door differentiële compactie in Blok 1, spanning opbouwen op het draaipunt van de schaarbreuk waar aan weerszijden van de breuk zandsteen aanwezig is. We benadrukken dat dit de voorspellingen over het al dan niet optreden van kleinere aardbevingen gedurende de periode van gasopslag kan beïnvloeden. Maar dit heeft geen invloed op de conclusie dat het optreden van aardbevingen met een magnitude groter dan $M_L = 3,9$ extreem

onwaarschijnlijk is.

Hager en Toksöz herhalen hier nogmaals dat ze vinden dat het TNO model geen betrouwbare voorspellingen kan geven over de kracht van en de kans op aardbevingen. Dat komt omdat het vereenvoudigde model misschien niet alle breukbewegingen kan nabootsen en omdat het effect van alle onzekerheden in de berekeningen niet precies bekend is. Maar dat heeft geen invloed op de geldigheid van de belangrijkste conclusie uit de TNO studie die ze volledig ondersteunen: de kans op het optreden van een beving met $M_L = 3,9$ gedurende de gehele looptijd van het project is uitermate klein (minder dan 1%).

Antwoorden op de vragen van de Technische commissie bodembeweging

De volgende vragen zijn gesteld door de Tcbb (Technische commissie bodembeweging):

1. Wat vinden de beoordelaars van de risico schattingen en zijn deze verenigbaar met de fysica van het probleem (Ref. TNO rapport en KNMI risico rapporten)?

Antwoord: De beoordelaars vinden dat de schatting in het TNO rapport van de maximale magnitude van een mogelijke aardbeving van $M_L = 3,9$ in overeenstemming is met de fysica van het te verwachten mechanisme.

2. De breuk die het Bergermeer veld doorsnijdt is (gedeeltelijk) ondoorlaatbaar: welk drukverschil tussen de delen van het reservoir aan weerszijden van de breuk kan aardbevingen veroorzaken?

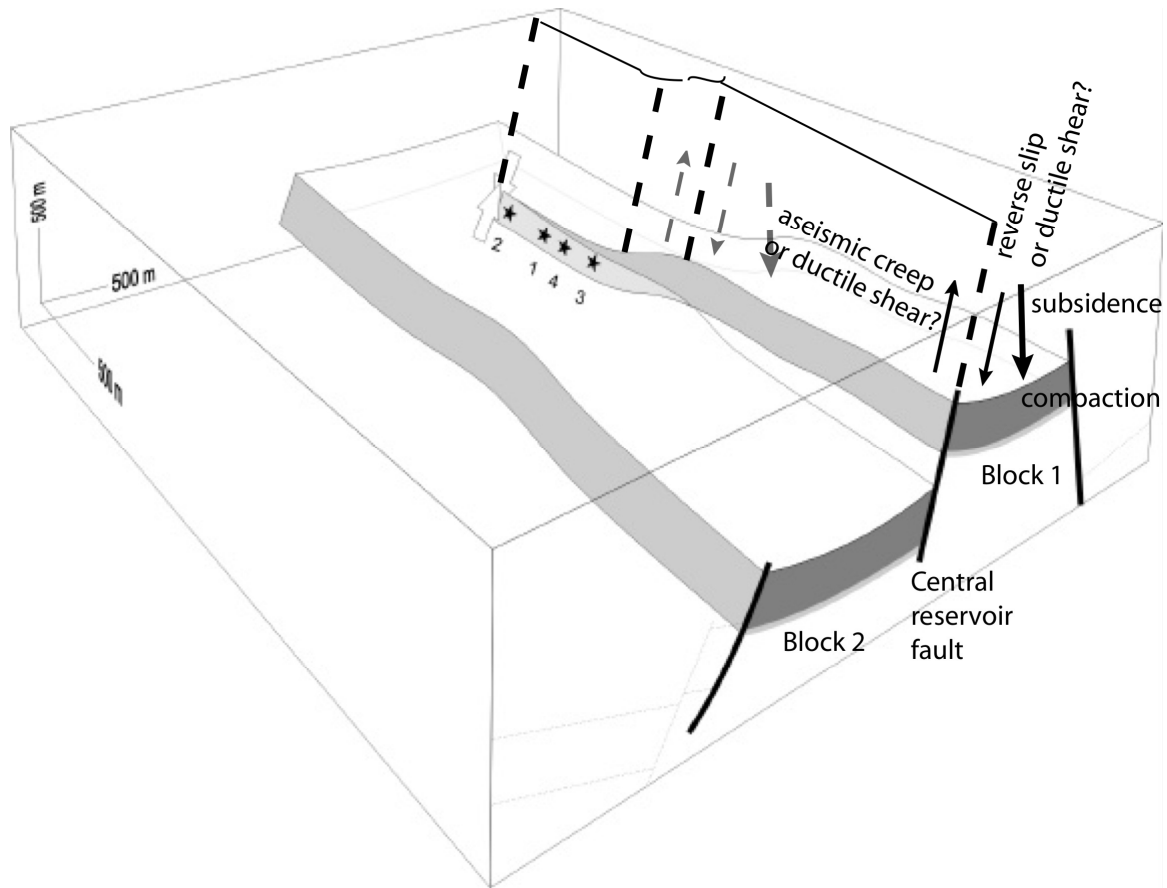
Antwoord: Een kwantitatieve schatting van het drukverschil over de breuk dat zou kunnen leiden tot aardbevingen valt buiten het oogmerk van deze beoordeling. Maar het lijkt er op dat de aardbevingen in 1994 en 2001 op deze breuk hebben plaatsgevonden. Het drukverschil veroorzaakt door zeven jaar productie was dus mogelijk voldoende om aardbevingen te veroorzaken.

3. De Tcbb overweegt de mogelijkheid van seismische monitoring op reservoir niveau omdat het huidige monitoring systeem alleen grotere bevingen ($M_L > 3$) heeft waargenomen. Is dit een goed idee of zijn er andere mogelijkheden?

Antwoord: Deze aanpak is gerechtvaardigd gegeven het belang van het monitoren van het gedrag van het reservoir. Ook raden we aan om een uitgebreider geodetisch monitoring systeem te installeren, inclusief het gebruik van GPS apparatuur om in aanvulling op verticale ook horizontale bewegingen te meten.

4. Wat kan worden gedaan om zeer sterke bewegingen te voorkomen? Helpt het om de productiesnelheid of het productievolume aan te passen?

De kans op het opwekken van aardbevingen hangt zowel af van het drukniveau als van de snelheid van drukverandering.



Figuur 1*: De figuur geeft een drie-dimensionaal beeld van het Bergermeer reservoir (gebaseerd op Figuur 6 uit KNMI rapport TR-239, 2001, geschreven door Haak, Dost, en Goutbeek). De gestippelde lijnen geven de projectie aan van het vlak van de centrale breuk boven het inklinkende reservoir in Blok 1. De grijze blokken links en rechts zijn het reservoir. Daarop ligt een zoutlaag (niet getekend). Door de gaswinning klinkt het reservoirgesteente in Blok 1 in. De dikte van het reservoir neemt daar af waardoor de bovenkant van Blok 1 langs het breukvlak omlaag wil bewegen. Daar waar het reservoirgesteente in Blok 1 tegen het zout aan de andere kant van de breuk ligt kan dit mogelijk op een geleidelijke glijdende manier. Bij de punt van de schaar waar ruwe zandsteen tegen ruwe zandsteen aanligt is zo'n glijdende beweging niet mogelijk en wordt een steeds verder oplopende spanning opgewekt. Totdat de breuk daar plotseling beweegt en de vrijkomende energie een aardbeving veroorzaakt. Op deze manier zijn de aardbevingen in 1994 en 2001 waarschijnlijk veroorzaakt. De genummerde sterretjes geven de door het KNMI vastgestelde posities van de bronnen van de eerdere aardbevingen weer.

* Figuur 3 uit het MIT rapport, tekst vrij vertaald ter verhoging van de toegankelijkheid.