

AAN Staatstoezicht op de Mijnen  
 VAN  
 LEUVEN 8 april 2017  
 C.C.  
 AANTAL BLZ. 4

## Review TNO-rapport TNO 2016 R11210

### *Evaluatie mogelijke oorzaak aardbevingen nabij Castricum-Zee in oktober – November 2013*

Na het uittesten van een aantal hypothesen komt TNO tot de conclusie dat de zes aardbevingen die zich in 2013 hebben voorgedaan voor de kust van Castricum-Zee hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt zijn door een samenloop van omstandigheden, waarbij de beschouwde breuken kritisch gespannen zouden geraakt zijn als gevolg van natuurlijke processen en/of de gasdepletie, en waarbij spoelingsverliezen uiteindelijk de ‘trigger’ zouden kunnen zijn voor de aardbevingen. TNO sluit de individuele hypothesen uit als mogelijke oorzaak voor de aardbevingen.

Er zijn mijns inziens zoveel onzekerheden en aannames verbonden aan de uitgewerkte hypothesen dat deze bevindingen als eerder vrijblijvend moeten aanzien worden. Een samenloop van omstandigheden, zoals beschreven in dit rapport, lijkt een plausibele hypothese, maar ook niet meer dan dat. Het uitsluiten van de individuele hypothesen (bv. natuurlijke seismiciteit) lijkt me onvoldoende overtuigd aangetoond. Op basis van het voorhanden zijnde, relatief onvolledige gegevensbestand, de hoge graad van onzekerheden, en de vele aannames, lijkt het me het verder weinig zinvol om nog te investeren in voortgezet, meer gedetailleerd onderzoek, zoals TNO oppert (p. 49). Dit kan alleen maar leiden tot het nog verder ‘masseren’ van de gegevens. Het “onomstotelijk vastleggen van de oorzaak” (p. 49) is mijns inziens dan ook zo goed als onmogelijk.

De eerder vrijblijvende resultaten van deze *post-factum* studie pleit ook voor een meer proactieve aanpak waarbij een meer nauwgezette seismische monitoring deel uitmaakt van elke exploratie- en exploitatievergunning van ondergrondse activiteiten (bv. olie- & gaswinning; schaliegasontginning; geothermie). Enkel met een performanter seismische monitoring zal het mogelijk zijn de effectieve oorzaak van een aardbeving in de omgeving van een ondergrondse activiteit met grotere zekerheid te karakteriseren.

*De kritische review bestaat verder uit twee delen, vooreerst een synthese van mijn belangrijkste, algemene bedenkingen en vragen bij dit rapport, vervolgens een olijsting van meer gedetailleerde opmerkingen, waarop de synthese voornamelijk gebaseerd is. Daarnaast zijn er ook nog een aantal aanmerkingen, correcties en persoonlijke bedenkingen aangebracht in het originele rapport (annotated pdf in bijlage).*

## Synthese van kritische review

- De belangrijkste tekortkoming van deze *post-factum* studie situeert zich voornamelijk bij de registratie van de aardbevingen zelf. Zij zijn geregistreerd door drie, excentrisch gelegen, waarnemingsstations (Bergen, Warmenhuizen, Otterleek; p. 14). Dit maakt dat de lokalisering van de aardbevingshaarden (hypocentra) van de zes aardbevingen te lijden heeft aan een hoge graad van onzekerheid, en dit in de drie dimensies. Elke daaropvolgende interpretatiestap leidt tot een verdere accumulatie van onzekerheden, waardoor de validiteit van de interpretaties verder ondergraven wordt. De associatie van de aardbevingshaarden met specifieke breuken, geïdentificeerd op 3D seismiek (met al zijn intrinsieke onzekerheden) is hiervan het meest illustratieve voorbeeld.
- De associatie van de aardbevingen met een van de randbreuken van het Castricum-Zee gasveld (p. 19) lijkt me dan ook uitermate speculatief en wetenschappelijk moeilijk verdedigbaar. Ten eerste is er de grote onzekerheid met betrekking tot de lokalisering van de aardbevingshaarden; ten tweede ontbreekt elke informatie over de breukvlakoplossing (*‘fault plane solution’* / *‘focal*



*mechanism*'), waaruit de eventuele oriëntatie van de verantwoordelijke breuk zou kunnen worden afgeleid (naast de breukbeweging zelf); en ten derde zijn dergelijke kleine aardbevingen ( $M \sim 2.0$ ) het gevolg van een breukbeweging op een klein breukvlak (diameter  $\sim 100$  m; verplaatsing  $\sim 5$  mm); de vraag kan dan ook gesteld worden of dergelijke kleine breuken überhaupt waarneembaar zijn op de 3D seismiek; rekening houdend met de vereiste breukdimensies zijn de mogelijkheden binnen de onzekerheidsellipsoïde (in 3D!) van de aardbevingshaarden bijna onbegrensd.

- De volledige geomechanische evaluatie (hoofdstuk 5) heeft mijns inziens een heel groot 'what if' gehalte; hypothesen worden uitgewerkt op basis van vele aannames en vertrekkende vanuit standaardmodellen; de vraag kan dan toch gesteld worden rond de validiteit van de conclusies met betrekking tot de verschillende hypothesen.
- Bij het lezen van dit rapport kan ik mij dus niet van de indruk ontdoen dat deze studie geleid wordt door een zeker 'kokerdenken' van de betrokken onderzoekers; het onderzoek stoelt op standaardmodellen en gestandaardiseerde methodiek ('black box'); dit komt o.a. tot uitdrukking in de veelvuldige verwijzing naar eigen rapporten en publicaties; er wordt mijns inziens onvoldoende vertrokken vanuit de feitelijke waarnemingen zelf, de aardbevingen met hun fysische parameters (bv. magnitude, 'focal mechanism', effectief seismisch moment) en de recente seismologische literatuur; eerder vertrekken de onderzoekers vanuit hun gekende standaardmodellen, waarbij nagegaan wordt in hoeverre de feitelijke waarnemingen al of niet in de standaardmodellen passen.

### Gedetailleerde opmerkingen op rapport

- Op verschillende plaatsen in het rapport (bv. p.8, p.14, p.17, p.26) wordt gemeld dat er geen seismiciteit is waargenomen. Hierbij moet natuurlijk duidelijk vermeld worden wat de gevoeligheid is van het gebruikte seismische meetnetwerk. Wat is immers de ondergrens van de meetbare aardbevingen in de betrokken context? Het niet waarnemen van aardbevingen betekent immers niet dat er geen (micro)seismiciteit zou kunnen voorkomen onder de meetbare grenswaarde. De bevinding (p.48) dat er tijdens de productieperiode van het Castricum-Zee gasveld en geruime tijd daarna er zich geen seismiciteit heeft voorgedaan, is dan ook niet hard te maken. Dit betekent dan ook dat de daaropvolgende aanname – namelijk de nood aan "het laatste zetje (een trigger)" – niet echt overtuigend overkomt.
- Er lijkt in de tijd een noordwestwaartse migratie te zijn van de seismische activiteit (cf. tabel 2-2; p.15). Dit wordt niet besproken in het rapport, noch meegenomen in het uitwerken van de hypothesen.
- Op p. 17 wordt geconcludeerd dat de projectie van de aardbevingshaarden – waarvan de diepte eigenlijk niet gekend is – in een breukzone plotten (figuur 2-6). Dit lijkt me een vreemde redenering om uiteindelijk de aardbevingen te associëren met de bewuste randbreuken van het gasveld.
- TNO-AGE heeft aan het KNMI gevraagd de onzekerheidsellipsen te berekenen voor een haarddiepte van 3 en 2.5 km (p. 18). Deze keuze van deze twee haarddiepten lijkt me eerder arbitrair; ze is alvast niet beargumenteerd. Onzekerheidsellipsen hadden evengoed kunnen berekend worden voor de diepte van het gasreservoir ( $\sim 2$  km), of zelf dieper (bv. 5 km).
- Alle onzekerheidsellipsen lijken me op figuur 2-7 even groot. Ik stel me hierbij de vraag of de onzekerheid ook niet samenhangt met de magnitude; het lijkt me dat hoe lager de magnitude, hoe groter de onzekerheid zou moeten zijn.
- Met betrekking tot de breuken rond het Castricum-Zee gasveld (§3.2.1) zijn er twee interpretatie, een interpretatie door Wintershall (figuur 3-5; p. 24) en een interpretatie door TNO-AGE (figuur 3-6; p. 25); bij het uittesten van de hypothesen wordt toch voornamelijk gewerkt met de interpretatie door Wintershall (zuidwestelijke randbreuken) (§5.2; §5.5; §6.1.1) terwijl bij de hypothese van de spoelverliezen (§5.7) gewerkt wordt met de interpretatie door TNO-AGE (noordoostelijke randbreuk); deze (mogelijk schijnbare) inconsistentie in keuze van breukmodel wordt niet besproken.



- De breuken rondom het gasveld worden als hydraulisch conductief (“open”) beschouwd (p. 23); verwijzend naar de studie van Townend & Zoback<sup>1</sup> met betrekking tot de spanningstoestand van breuken in intraplaatcontexten, kan verondersteld worden dat de breuken rondom het gasveld kritisch gespannen zijn. Dit gaat in tegen de ‘gangbare aanname’ (p. 26) dat de breuken in dit deel van Nederland nu niet kritisch gespannen zouden zijn.
- De beschouwingen in het hoofdstuk over de natuurlijke seismiteit dat de breuken rondom het gasveld eventueel als “van nature actief” kunnen beschouwd worden (p. 26), lijkt me weinig relevant te zijn; ook ‘fossiele’ breuken kunnen kritisch gespannen geraken en verantwoordelijk zijn voor aardbevingen, vooral in een intraplaatcontext<sup>2</sup>.
- TNO gaat er vanuit dat de breuken niet kritisch gespannen zijn en dat dus langs deze breuken geen natuurlijke aardbevingen kunnen ontstaan (p. 26). Deze aanname kan mijns inziens in vraag worden gesteld net door het voorkomen van aardbevingen. Het feit dat er zich aardbevingen (hoe klein ook) voordoen in de diepe ondergrond van Nederland kan aanzien worden als bewijs dat aanwezige breuken kritisch gespannen zijn en maar een kleine spanningsverstoring – al of niet natuurlijk – nodig hebben om door te bewegen en dus een aardbeving te veroorzaken. Dit ligt in de lijn van de bevindingen van Townend & Zoback (2000) van een ‘sterke’ seismogene korst in intraplaatcontexten, alsook op de wijze waarop naar intraplaataardbevingen tegenwoordig gekeken wordt (cf. Calais *et al.* 2016).
- Bij de discussie rond het reactivatiepotentieel wordt er verwezen naar het Mohr-Coulomb criterium (p. 31); dit criterium geldt echter voor de nieuwvorming van ‘*shear fractures*’, niet voor de (re)activatie (*reshear*) van bestaande discontinuïteiten; het laatste zit vervat in de Byerlee verhouding tussen schuif- en normaalspanning (in dit rapport de *ST = ‘slip tendency’*); de klassiek verhouding (*ST*) is 0.85 (met een range van 0.6 tot 1.0); de hele redenering rond de *ST* van breuk 1 en breuk 2 kan ik dan ook moeilijk volgen.
- Belangrijk voor de (re)activatie van bestaande discontinuïteiten is de vraag of ze optimaal georiënteerd zijn ten opzichte van het heersende spanningsveld; in het rapport wordt dit – weinig transparant – vertaald in een afzonderlijke *ST*-waarde voor breuk 1 en 2; ik stel me hierbij de vraag waarom geen gebruik gemaakt wordt van bijvoorbeeld de ‘*brittle failure mode plots*’ (bv. Sibson 2000<sup>3</sup>).
- De spoelverliezen (p. 38) worden in relatie gebracht met de noordelijkoostelijke randbreuk van het gasveld (volgens TNO-AGE interpretatie), terwijl de andere hypothesen zich toeleggen op de zuidwestelijke randbreuken (volgens Wintershall interpretatie); hierin schuilt een (mogelijk schijnbare) inconsistentie die niet besproken wordt in het rapport.
- De relevantie van het hoofdstuk rond de magnitude van potentiële aardbevingen (hoofdstuk 6) ontgaat me ten dele; volgens mij wordt niet vertrokken vanuit het correcte uitgangspunt, met name de breukdimensies die effectief nodig zijn om de zes betrokken aardbevingen te genereren, los van op welke breuken zich zouden hebben kunnen voorgedaan; zolang via een breukvlakoplossing (*focal mechanism*) niet geweten is wat de mogelijke oriëntatie kan zijn van de verantwoordelijke breuk, is de associatie met de ‘grote’ randbreuken volledig arbitrair; derhalve lijkt me de geomechanische analyse van deze breuken ook vrijblijvend.
- De berekening van het seismisch moment van de ‘grote’ randbreuken (§6.1.1), vertaald in een maximum magnitude (tabel 6-2), lijkt me los te staan van enige breukdynamische realiteit; de ‘normale’ breukdimensies (hoogte/lengte verhouding) worden totaal niet gerespecteerd; de berekende waarde op basis van zeer extreme hoogte/lengte verhoudingen, lijkt me dan ook irrelevant; daarentegen, vertrekkende van klassieke breukdimensiestudies (bv. de klassieke Wells

<sup>1</sup> Townend, 2000. How faulting keeps the crust strong. *Geology* **28**(5), 399-402.

<sup>2</sup> Zie bijvoorbeeld , T. J. 2016. A new paradigm for large earthquakes in stable continental plate interiors. *Geophysical Research Letters* **43**, 10621-10637. DOI: 10.1002/2016GL070815

<sup>3</sup> . 2000. Fluid involvement in normal faulting. *Journal of Geodynamics* **29**(3-5), 469-499.



- & Copersmith 1994<sup>4</sup>) kan men toch voor een breuk met een lengte van ongeveer 11 km (breuk 1) afleiden dat de maximum magnitude in het bereik tussen M5.0 en M6.0 moet gezocht worden.
- De relevantie van de berekening van het cumulatief seismisch moment (§6.1.2) en de relatie met het reservoirmoment (§6.1.3) ontgaat me, vooral omdat het cumulatief seismisch moment van deze zes aardbevingen toch maar een momentopname is in de dynamische evolutie van de ondergrond in de omgeving van het gasveld; indien er zich in de toekomst nog aardbevingen zouden voorkomen en dus het cumulatief seismisch moment zou doen toenemen, gaat de partiticoëfficiënt op basis van het gehanteerde compactiemodel (bij constante totale compactie van 2.2 cm) alleen maar toenemen; het lijkt me dan ook weinig zinvol om besluiten te trekken uit deze momentopname; bovendien krijg ik de indruk dat het gehanteerde compactiemodel eigenlijk de *reality check* op basis van deze zes aardbevingen niet succesvol heeft doorstaan.

Prof.  
Leuven, 8 april 2017

---

<sup>4</sup> 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* **84**(4), 974-1002.