

TNO/KNMI-rapport

TNO 2012 R11139

Earth, Environmental and Life Sciences

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

infodesk@tno.nl

Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen *Integratie van deelstudies*

Datum	24 december 2012
Auteur(s)	Wassing, B.B.T. (TNO) Dost, B. (KNMI)
Exemplaarnummer	1.0
Oplage	-
Aantal pagina's	23
Aantal bijlagen	6
Opdrachtgever	NAM, Vermillion, Northern Petroleum, TAQA
Projectnaam	Update seismische hazard studies geïnduceerde aardbevingen
Projectnummer	034.23640

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Beschrijving van de kaarten	7
2.1	Bijlage 1: De kans op beven van een olie- of gasvoorkomen	7
2.2	Bijlage 2: Probabilistische seismische hazard analyse	8
2.3	Bijlage 3: Site response	9
2.4	Bijlage 4: Seismische zonatiekaarten gecorrigeerd voor de site response	10
2.5	Gevoeligheid van verschillende typen gebouwen voor schade door geïnduceerde seismiciteit	10
2.6	Gebruik van de kaarten	11
3	Referenties	14

Bijlagen

- Bijlage 1. Kans op beven op basis van verwachte totale drukval voor de verschillende voorkomens
- Bijlage 2. Horizontale pieksnelheid op de fundering
- Bijlage 3. Site response kaart
- Bijlage 4. Horizontale pieksnelheid op de fundering, gecorrigeerd voor de site response
- Bijlage 5. Kans-op-schade en buitengrens schade

1 Inleiding

In het kader van de in 2003 gewijzigde Mijnbouwwet moeten per 1 januari 2003 seismische risico analyses in het winningsplan opgenomen worden. Sinds 2003 is door TNO en KNMI, onder meer in opdracht van de mijnbouwmaatschappijen, een aantal studies verricht naar de seismische hazard door geïnduceerde aardbevingen. In 2004 zijn de resultaten van deze studies samengevat en geïntegreerd in het TNO/KNMI integratie-rapport '*Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Integratie van deelstudies*' [1].

Binnen het Technisch Platform Aardbevingen, waarin zowel kennisinstituten, overheid als mijnbouwmaatschappijen vertegenwoordigd zijn, is overeengekomen om zowel de Seismische Hazard Analyse als het TNO/KNMI integratie-rapport eens per 5 jaar te herzien aan de hand van nieuwe observaties m.b.t. geïnduceerde aardbevingen en additionele onderzoeksresultaten. Dit rapport is de eerste herziening van het integratie-rapport uit 2004. In 2009 is besloten geen uitgebreide herziening te publiceren omdat de beschikbare data daar geen aanleiding toe gaven.

Sinds 2003 zijn een aantal nieuwe studies op het gebied van seismische risico's van geïnduceerde seismiciteit uitgevoerd. Het integratie-rapport vat de resultaten van deze studies samen en geeft een overzicht van de volgende studies:

- Deterministische seismische hazard studie. In de deterministische seismische hazard studie wordt op basis van de geologische, productie-technische en mechanische kenmerken van de verschillende olie- en gasvoorkomens de kans bepaald dat er in deze voorkomens aardbevingen optreden. De techniek biedt tevens de mogelijkheid om een kans op aardbevingen in te schatten voor een nog te produceren voorkomen. Aan de hand van eigenschappen van een olie- of gasvoorkomen worden uitspraken gedaan over de kans op beven van dat voorkomen. In 2012 is de eerste deterministische hazard analyse uit 2003 [2] ge-update aan de hand van nieuwe observaties van geïnduceerde aardbevingen in de periode 2004 - 2010. Deze studie heeft geresulteerd in een herziening van de kans op beven voor individuele (reeds producerende en nog te produceren) velden. In de 2012 herziening zijn alle data meegenomen tot mei 2010, de datum tot waar de drukdata beschikbaar zijn. De resultaten van het onderzoek zijn vastgelegd in TNO-rapport [3].
- Probabilistische seismische hazard analyse. KNMI heeft in 2003/2004 een probabilistische schatting (Probabilistische Seismische Hazard Analyse, oftewel *PSHA*) uitgevoerd van de te verwachten grondbeweging boven verschillende onshore olie- en gasvelden in Nederland, die momenteel seismische activiteit vertonen [4]. Deze studie heeft onder meer geresulteerd in seismische zonatiekaarten, waarop de bodembeweging met een jaarlijkse overschrijdingskans wordt aangegeven. Tevens wordt op basis van deze studie geconcludeerd dat de maximaal te verwachten magnitude (M_{max}) van de geïnduceerde bevingen 3.9 op de schaal van Richter bedraagt. In Juli 2012 heeft KNMI een nieuw status rapport gepubliceerd [5], waarin uitgebreid aandacht wordt besteed aan het

meetnetwerk van het KNMI en de karakteristieken van geïnduceerde seismiciteit in Noord-Nederland. De studie heeft nog niet geresulteerd in een update van de probabilistische seismische hazard analyse (PSHA). Een update van de M_{max} is berekend voor het Noorden van Nederland en deze blijft constant op 3.9. Een aanname voor de PSHA methode is dat de ontwikkeling van de seismiciteit een stationair proces is. Uit het verloop van de cumulatieve energie in de tijd wordt in deze studie geconcludeerd dat deze aanname niet meer geldig is voor de gehele periode. Dit effect zal worden meegenomen in toekomstige hazard studies. Verder bevat de studie informatie over haardmechanismen en parameters, van belang als randvoorwaarde voor geomechanische modellering.

- Invloed van de ondiepe ondergrond: Site response. TNO heeft in 2003/2004 een studie verricht naar de invloed van de ondiepe ondergrond op de bodembeweging: de zogenaamde site response. Aan de hand van de resultaten zijn de seismische zonatiekaarten aangepast voor de site response. De resultaten van de site-response studie zijn vastgelegd in TNO-rapport [6a,b].
- Schade door geïnduceerde seismiciteit. In TNO-rapport [6b] wordt de kans op gebouwschade door geïnduceerde seismiciteit beoordeeld aan de hand van de SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen' [8]. In 2009 is door TNO een aanvullende kalibratiestudie uitgevoerd van de hazard- en schade-modellen, gebaseerd op het werkelijke aantal schademeldingen bij 5 bevingen [9]. De studie geeft inzicht in de gevoeligheid van verschillende typen gebouwen voor schade door geïnduceerde seismiciteit en de buitengrens van schade in relatie tot de diepte en magnitude van de aardbeving. Daarnaast is in 2011 een TNO rapport [10b] verschenen, waarin een beoordelingsmethodiek voor de oorzaak van gebouwschade wordt beschreven.

In dit integratie-rapport worden de resultaten van de bovengenoemde deelstudies geïntegreerd en samengevat in de vorm van 8 (deel)kaarten. De nadruk van dit rapport ligt op de kwantificatie van de (kans op het optreden van) bodembeweging ten gevolge van geïnduceerde aardbevingen, de gebruiksmogelijkheden van de kaarten en de relatie bodembeweging - gebouwschade.

Bij elke bijlage wordt kort toegelicht op welke wijze de kaart tot stand is gekomen en welke informatie op de kaart wordt weergegeven. In paragraaf 2.5 wordt kort ingegaan op de relatie tussen bodembeweging en verwachte schade. In het laatste hoofdstuk wordt kort ingegaan op het gebruik van de kaarten.

Volledigheidshalve wordt hier nog verwezen naar twee rapporten die in 2011 zijn verschenen. Het Deltares/TNO rapport Gebouwschade Loppersum [10b] geeft een samenvatting en evaluatie van de methodieken die momenteel in Nederland in gebruik zijn om de effecten van gaswinning op gebouwen te voorspellen. Daarnaast is in 2011 naar aanleiding van publieksvragen en vragen van lokale overheden over de seismische risico's van gasopslag in het Bergermeerveld, een gezamenlijk TNO-KNMI rapport [11] over de te verwachten maximum schade boven het Bergermeerveld verschenen. Beide rapporten geven een overzicht van eerder onderzoek, in het geval van Bergermeer toegepast op een specifiek gasveld, maar bevatten geen

nieuwe onderzoeksresultaten; derhalve is besloten om beide rapporten in dit integratie-rapport niet uitgebreid te behandelen.

Disclaimer:

In de onderzoeken die in het huidige integratie-rapport worden samengevat zijn geen seismische gegevens verwerkt van bevingen in de periode na begin 2010. Dit betekent dat gegevens van de recente aardbeving in Huizinge ($M=3.4$) nog niet in de beschreven onderzoeken zijn meegenomen.

2 Beschrijving van de kaarten

2.1 Bijlage 1: De kans op beven van een olie- of gasvoorkomen

In de oorspronkelijke studie 'Deterministische Hazard Analyse voor Geïnduceerde Seismiciteit' [2] is onderzocht welke eigenschappen (geologische, productietechnische en geomechanische eigenschappen) van de olie- en gasvoorkomens invloed hebben op het wel of niet optreden van aardbevingen. Aan de hand van eigenschappen van een voorkomen (drukval (DP), ratio Young's moduli reservoir en overburden (E) en breukdichtheid (B)) zijn uitspraken gedaan over de kans op beven van dat voorkomen.

In 2012 is een update van de 2004-studie uitgevoerd, waarin alle nieuwe data zijn meegenomen tot mei 2010 [3]. Uit de nieuwe analyse blijkt dat geen van de voorkomens, die in 2004 een verwaarloosbare kans op beven toegeschreven kregen, zijn gaan beven. Het aantal geobserveerde bevingen is bijna verdubbeld sinds 2004, dus dit is een sterke aanwijzing dat de statistische benadering een goede inschatting geeft van de kans op beven bij gaswinning van de Nederlandse voorkomens.

Aan de hand van de volgende parameters van een olie- of gasvoorkomen wordt de kans op beven van dat voorkomen bepaald:

- DP/P_{ini} : De ratio van drukval (DP) en initiële druk (P_{ini}) in het reservoir;
- E: de verhouding tussen de Young's moduli (stijfheidsmoduli) van de 'overburden' -en het reservoirgesteente;
- B: een maat voor de breukdichtheid van het reservoir.

De herziene kansklassen worden hieronder weergegeven (met P_h de kans op beven van het olie-gasvoorkomen):

Reeds bevende voorkomens	
$DP/P_{ini} \geq 28\%$	$B > 0,86$ en $E \geq 1,34$: $P_h = 0.42 \pm 0.08$
	$B > 0,86$ en $1,01 \leq E \leq 1,33$: $P_h = 0.19 \pm 0.05$
	$B < 0,86$ en/of $E < 1,01$: verwaarloosbare kans
$DP/P_{ini} < 28\%$	Verwaarloosbare kans

Op de kaart in bijlage 1 zijn de olie- en gasvelden op land en binnen de 3-mijls zone ingedeeld in de bovengenoemde kansklassen. Olie- en gasvoorkomens die reeds in het verleden hebben gebeefd krijgen een kans op een aardbeving van 1 toegekend.

Voorkomens die, wat de bovengenoemde parameters betreft, sterk lijken op de voorkomens die reeds gebeefd hebben krijgen een relatief hoge kans (0.42 ± 0.08) op een aardbeving toegekend. Voorkomens die weinig of geen gelijkenis vertonen met de velden die al gebeefd hebben krijgen een geringe kans op een aardbeving (0.19 ± 0.05) of een verwaarloosbare kans toegekend.

De kaart geeft alleen de kans op beven van een voorkomen weer. De kaart geeft geen informatie over de vraag hoe groot de frequentie en magnitude van de beving

zal zijn. Informatie over de frequentie en magnitude van mogelijke bevingen in de voorkomens die reeds gebeefd hebben is wel verwerkt op de seismische zonatiekaarten in de bijlagen 2 en 4.

Uit de kaart in bijlage 1 blijkt dat aan de olie- en gasvoorkomens in Noord-Brabant, Zuid-Holland en het merendeel van de voorkomens in Friesland een verwaarloosbare tot geringe kans (0.19) van beven wordt toegekend. Een groot deel van de voorkomens in Groningen, Drenthe en Overijssel en enkele voorkomens in Noord-Holland daarentegen hebben een redelijke kans op beven (0.42) of hebben al gebeefd (1).

Voor een uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, aannames en resultaten van de deterministische hazard analyse wordt hier verwezen naar [2] en [3].

2.2 Bijlage 2: Probabilistische seismische hazard analyse

In bijlage 2 worden de seismische zonatiekaarten weergegeven voor olie- en gasvoorkomens, waar in het verleden reeds aardbevingen zijn opgetreden (dus voor velden met een aardbevingskans van 1). De kaarten, die de te verwachten bodembewegingen aangeven, zijn gebaseerd op een probabilistische seismische hazard analyse uitgevoerd in 2003 [4]. Deze analyse is gebaseerd op statistische modellen (frequentie-magnitude relatie) van de seismiciteit en empirische modellen voor het schatten van de grondbeweging, gegeven de kracht, diepte en afstand van de beving (attenuatie-relatie). De statistische modellen zijn gebaseerd op de waarnemingen van het seismisch netwerk in Nederland in de periode 1986 - 2003.

In 2010 heeft het KNMI een update uitgevoerd van de statistische modellen die ten grondslag liggen aan de seismische zonatiekaarten [5]. Voor de update is gebruik gemaakt van de dataset voor geïnduceerde seismiciteit, uitgebreid voor de periode 2003-2010. In [5] wordt geconcludeerd dat de update van de statistische modellen resultaten oplevert, die in grote lijnen consistent zijn met de resultaten van de eerdere hazard studie.

Binnen het EU-project GEISER wordt door KNMI, in samenwerking met andere Europese seismologische onderzoeksinstituten, een nieuwe attenuatie-relatie voor geïnduceerde seismiciteit ontwikkeld. Zodra deze nieuwe attenuatie-relatie beschikbaar is, zal een nieuwe probabilistische seismische hazard analyse worden uitgevoerd. De hazard zonatiekaarten gepresenteerd in bijlage 2 zijn nog gebaseerd op de statistische modellen en oude attenuatie-relatie uit [4]. Wel zijn aan de seismische zonatie kaarten enkele nieuwe velden toegevoegd, die sinds 2004 geïnduceerde seismiciteit hebben vertoond.

Het resultaat van de probabilistische seismische hazard analyse is verantwoord boven, en in de nabijheid van, velden waar aardbevingen zijn waargenomen, maar blijft speculatief voor velden waar dit (nog) niet het geval is. In het laatste geval verdient het de aanbeveling het gebruik van de informatie te beperken tot de kans op een aardbeving (bijlage 1) zonder een schatting van de te verwachten bodembeweging.

De seismische zonatiekaarten geven de geschatte, locatie gebonden, horizontale pieksnelheid (in mm/s) met een overschrijdingskans. Gekozen is om de jaarlijkse overschrijdingskans van 10% (of een keer in de 10 jaar, $T=10$) en de overschrijdingskans van 10% in 10 jaar (of een keer in 100 jaar, $T=100$) te presenteren.

De in bijlage 2a en 2b gepresenteerde pieksnelheid is de geschatte maximale horizontale pieksnelheid rond 10 Hz op de fundering van een gebouw voor een gemiddelde vaste ondergrond aan het maaiveld. De pieksnelheden zijn tot een afstand van 10km van de rand van het veld in kaart gebracht.

Afhankelijk van de samenstelling van de bovenste 30 meter van de ondergrond kan er lokaal een extra demping of versterking van de bodembeweging optreden. Dit effect wordt in bijlage 3 gepresenteerd en de samenstelling van beide resultaten in bijlage 4.

Voor een uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, aannames en resultaten van de probabilistische hazard analyse wordt hier verwezen naar [4] en [5].

2.3 Bijlage 3: Site response

Afhankelijk van de samenstelling van de bovenste tientallen meters van de ondergrond kan er lokaal een extra demping of amplificatie van de trilling optreden, de zogenaamde 'site response'. Uit onderzoek is gebleken dat de site response in sterke mate afhangt van de gemiddelde schuifgolfsnelheid en de aanwezigheid van scherpe contrasten in stijfheid in de bovenste circa 30m van de ondergrond. Op basis van de gemiddelde schuifgolfsnelheid ($V_{s,30}$) wordt de ondergrond ingedeeld in een klasse 'slappe grond' ($V_{s,30} \leq 200\text{m/s}$) en een klasse 'stijve grond' ($V_{s,30} > 200\text{m/s}$). Daarnaast wordt op grond van lithologische eigenschappen een extra klasse onderscheiden, nl. de klasse 'special study soils'. Deze klasse omvat grondsoorten die extra gevoelig zijn voor amplificatie, zoals veenlagen dikker dan 3m en slappe veenlagen met een dikte van 1m-3m gelegen op een stijve ondergrond.

Bijlage 3 geeft pieksnelheden voor een gemiddelde vaste referentie-ondergrond (stijve grond). Amplificatie is hier gedefinieerd als opslingering van de grondbeweging ten opzichte van een referentielocatie met een vaste stijve grond aan maaiveld (op een vergelijkbare afstand van het epicentrum). Dit betekent dat in de klasse 'stijve grond' geen amplificatie optreedt. In de klassen 'slappe grond' en 'special study soils' kan de grondbeweging opgeslingerd worden. Deze klassen worden gekenmerkt door amplificatiefactoren: Deze geven een gemiddelde respons voor 'vergelijkbare' sites. In de klasse 'slappe grond' kan de grondbeweging tot een factor 1.5 opgeslingerd worden. In de klasse 'special study soils' kan de grondbeweging tot een factor 2 opgeslingerd worden. De amplificatie is afhankelijk van de amplitude van de grondbeweging en neemt af bij een toenemende piekversnelling. In bijlage 3 zijn de 3 site response klassen boven- en in de directe omgeving van de olie- en gasvelden in kaart gebracht.

Voor een uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, aannames en resultaten van het onderzoek naar de site response wordt hier verwezen naar [6a] en [6b].

2.4 **Bijlage 4: Seismische zonatiekaarten gecorrigeerd voor de site response**

Bijlage 4 toont de samengestelde seismische zonatie kaarten waarbij de site response effecten (bijlage 3) verwerkt zijn in de zonatie kaarten van bijlage 2. In de schattingen van horizontale pieksnelheden (mm/s) met een jaarlijkse overschrijdingskans van 10% (bijlage 4a) zijn nu dus ook de effecten van de lokale ondergrond verwerkt. Dit is mede het geval voor de horizontale pieksnelheden met een overschrijdingskans van 10% in 10 jaar (bijlage 4b).

Deze pieksnelheid kan beschouwd worden als de horizontale pieksnelheid in het gebouw op funderingsniveau.

Op de kaart in bijlage 4a worden de snelheden weergegeven behorend bij een overschrijdingskans van 10% in een jaar ($T=10$). De kaart geeft de hoogste snelheden (meer dan 40 mm/s) boven de gasvelden Roswinkel, Groningen, Annerveen en Bergermeer, op de locaties waar 'special study soils' of 'slappe grond' aan maaiveld wordt aangetroffen. Het noordelijke deel van het Groningen gasveld wordt gekenmerkt door een iets hogere seismische hazard (>30 mm/s) dan het zuidelijke deel (>20 mm/s). In het noordelijke deel komt 'slappe grond' aan het maaiveld voor. De overige gasvelden tonen een lagere seismische hazard: De snelheden voor een overschrijdingskans van 10% in 1 jaar liggen boven deze gasvelden tussen 10 mm/s en 30 mm/s. De hogere waarden gelden voor gebieden waar 'special study soils' aan maaiveld voorkomen. Dezelfde trend wordt onderscheiden in het kaartbeeld voor overschrijdingskans van 10% in 10 jaar ($T=100$). Ook hier tonen de velden Groningen, Roswinkel, Bergermeer en Annerveen het hoogste seismische hazard (snelheden > 60 mm/s).

Gemiddeld gezien geldt voor alle gasvelden dat de pieksnelheid afneemt met een toenemende afstand tot de rand van het veld. De pieksnelheden zijn tot een afstand van 10 km van de rand van het veld in kaart gebracht.

Voor een uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, aannames en resultaten van de probabilistische hazard analyse wordt hier verwezen naar [4], [5] en [6b].

2.5 **Gevoeligheid van verschillende typen gebouwen voor schade door geïnduceerde seismiciteit**

TNO Bouw heeft reeds in 1998 een uitgebreide studie uitgevoerd naar de relatie tussen de kans op schade aan gebouwen en geïnduceerde aardbevingen [7]. In deze studie is onderzoek gedaan naar de toepassing van de SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen' [8] voor de inschatting van de kans op schade bij geïnduceerde seismiciteit. In het rapport [6b] werd geconcludeerd dat een validatie van de op de SBR-richtlijn gebaseerde schade-modellen en kansen aan praktijkgegevens (d.w.z. gemelde schade) noodzakelijk is.

In een kalibratiestudie [9] is de kans-op-schade voor diverse typen woningen bepaald op basis van schademeldingen voor 5 geïnduceerde aardbevingen met een magnitude tussen $M=3.0$ en $M=3.5$. Tevens is voor een gegeven aardbevings-magnitude en -diepte de afstand van het epicentrum afgeleid, waarop nog schade verwacht wordt, de zogenaamde 'buitengrens' van schade.

In de studie is de gevoeligheid van 4 verschillende typen gebouwen onderzocht: Boerderijen, laagbouwwoningen gebouwd voor 1940, laagbouwwoningen gebouwd na 1940 en hoogbouwwoningen. Per type gebouw is vervolgens een trillingssnelheid bepaald voor 1% kans-op-schade. Geconcludeerd wordt dat de gevonden trillingssnelheden bij 1% kans-op-schade vergelijkbaar zijn met de grenswaarden de SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen' (zie bijlage 5).

De afstand tot het epicentrum waarop bij een gegeven aardbevingsmagnitude nog schade verwacht wordt kan per woningtype berekend worden uit de schademodelen van de vijf aardbevingscases en de attenuatie relatie voor geïnduceerde seismiciteit in Noord-Nederland. In bijlage 5 zijn de buitengrenzen voor de vier woningcategorieën weergegeven voor de 1%, 5% en 10% overschrijdingskans op schade, voor haarddieptes van 2 en 3 km. Hier wordt benadrukt dat de gevonden schadecurves zijn opgesteld op basis van een beperkt aantal bevingen en daarmee alleen representatief zijn voor aardbevingen met een magnitude tussen $M=3$ en $M=3,5$. Verdere kalibratie op basis van een groter aantal bevingen is aan te bevelen.

Rapport [10b] geeft tenslotte een uitgebreide beschrijving van een gestandaardiseerde aanpak voor het vastleggen en het beoordelen van schade. De methodiek is getoetst door toepassing op een vijftal geselecteerde panden in de provincie Groningen.

Voor een uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, aannames en resultaten van de (kalibratie van) schade-modellen wordt hier verwezen naar [7] en [9].

2.6 Gebruik van de kaarten

De opzet en de toepassing van de kaarten is weergegeven in het schema in Figuur 1. Uit de kaart in bijlage 1 kan voor een specifiek olie- of gasveld afgeleid worden hoe groot de kans is dat er een aardbeving zal optreden. Uit de seismische zonatiekaarten van bijlage 2 kan vervolgens, voor locaties boven en in de directe omgeving van de velden die reeds gebeefd hebben, informatie over de pieksnelheid op funderingsniveau (bij een overschrijdingskans van 10% in een jaar of 10% per decade) verkregen worden. Bijlage 3 en 4 kunnen gebruikt worden om inzicht te verkrijgen in de pieksnelheid op de fundering, rekening houdend met een eventuele opslingering van de trillingen door aanwezigheid van slappe lagen in de ondiepe ondergrond.

Er is voor gekozen om de pieksnelheid op de seismische zonatiekaarten weer te geven. Voor dit type aardbevingen correleert de pieksnelheid beter met de kans op schade aan bebouwing dan de piekversnelling. Inzicht in het risico op schade aan bebouwing kan verkregen worden door de pieksnelheden op bijlage 4 te vergelijken met de grenswaarden voor trillingssnelheden voor verschillende typen woningen uit bijlage 5 en [8,9]. De grafieken in bijlage 5 kunnen gebruikt worden voor een eerste schatting van de grootte van het gebied waarin schade wordt verwacht.

Hier wordt benadrukt dat de kaarten gebaseerd zijn op de op dit moment best beschikbare kennis en modellen, maar dat modellen altijd hun beperkingen kennen.

Voor alle modellen die aan de kaarten ten grondslag liggen geldt dat zij bij het beschikbaar komen van nieuwe informatie, in de vorm van nieuwe meetgegevens of nieuwe inzichten, getoetst en aangepast moeten worden.

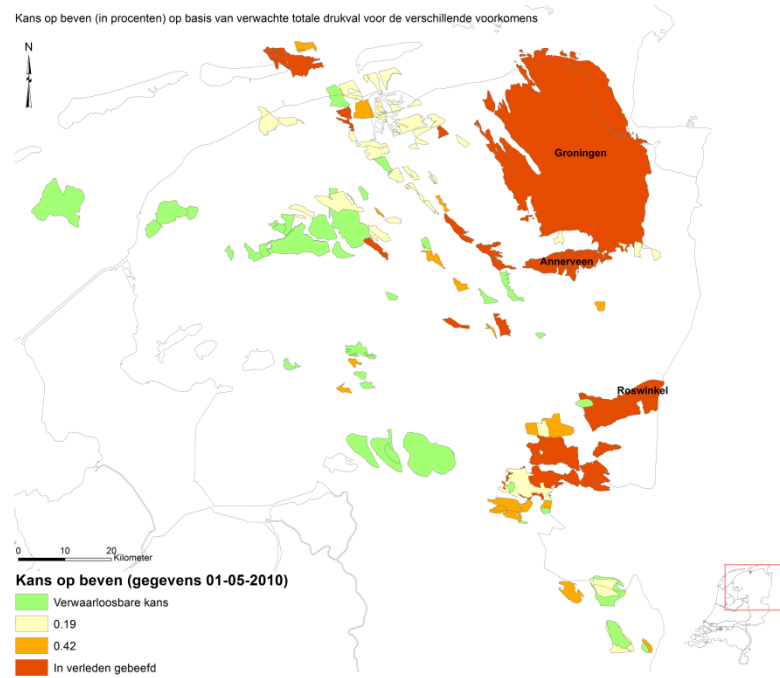


Figuur 1. Opzet en toepassing van de kaarten.

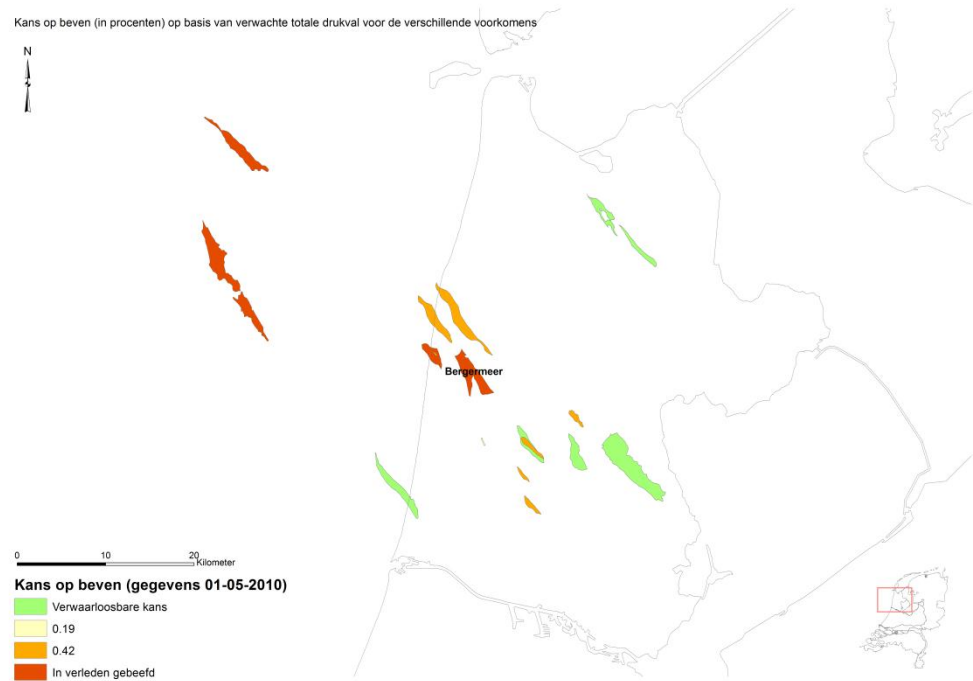
3 Referenties

- [1] Wassing, B.B.T., T. van Eck en R.M.H.E. van Eijs, 2004, Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen: Integratie van deelstudies, TNO rapport NITG 04-244-B; KNMI-publicatie 208.
- [2] TNO-rapport NITG 04-171-C. Van Eijs, 2004. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit.
- [3] TNO-rapport 2012 R10198. Van Thienen, 2012. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland.
- [4] Van Eck, T., F. Goutbeek, H. Haak & B. Dost, 2003. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. *KNMI-publicatie: WR-2004-01*, ISBN 90-369-2248-8.
- [5] Dost, B., F. Goutbeek, T. van Eck and D. Kraaijpoel, 2012. Monitoring induced seismicity in the North of the Netherlands: status report 2010; *KNMI Scientific Report WR 2012-03* (<http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubWR/WR2012-03.pdf>)
- [6a] Wassing, B.B.T, D. Maljers, R.S. Westerhoff, J.H.A. Bosch en H.J.T. Weerts, 2003. Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen, rapportage fase 1, *TNO-rapport NITG 03-185-C*.
- [6b] Wassing, B.B.T, D. Maljers, J.H.A. Bosch en H.J.T. Weerts, A. Koopman, A. Dullemond, W. Roos, 2004. Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen, rapportage fase 2, *TNO-rapport NITG 03-186-C*.
- [7] Van Staalduinen, P.C. en Geurts, C.P.W., 1998. De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland: inventarisatie, *TNO rapport 97-CON-R1523-1*.
- [8] SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen'.
- [9] Roos, W., P.H. Waarts en B.B.T. Wassing, 2009. Kalibratiestudie schade door aardbevingen, *TNO rapport TNO-034-DTM-2009-04435*.
- [10a] De Lange, G., N.G.C. van Oostrom, S. Dortland, H. Borsje en S.A.J. de Richemont, 2011. Gebouwschade Loppersum, *Deltares/TNO rapport 1202097-000-BGS-0003*.
- [10b] Borsje, H. de Richemont, S.A.J., 2011. Methodiek voor onderzoek naar de oorzaak van gebouwschade - versie 2. *Deltares/TNO-rapport TNO-060-DTM-2011-02980*.
- [11] Van Kanten-Roos, W., Dost, B. Vrouwenvelder, A.C.W.M., Van Eck, T. 2011. Maximale schade door geïnduceerde aardbevingen: inventarisatie van studies met toepassingen op Bergermeer.

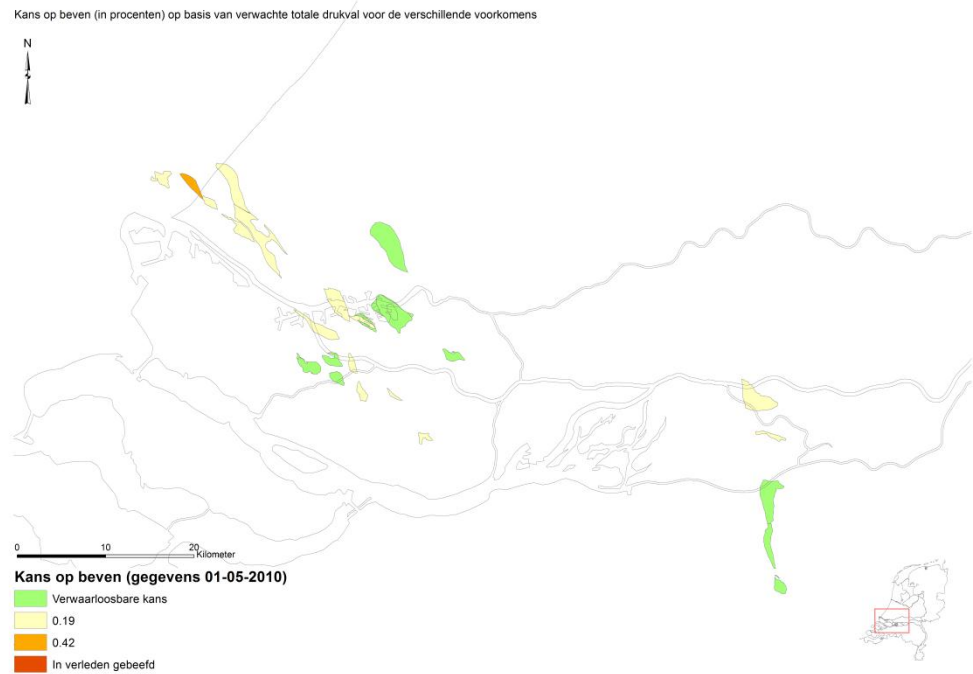
Bijlage 1



Kaart 1A. Kans op beven (gegevens meegenomen tot 01-05-2010) voor gasvelden in Noord-Oost Nederland.



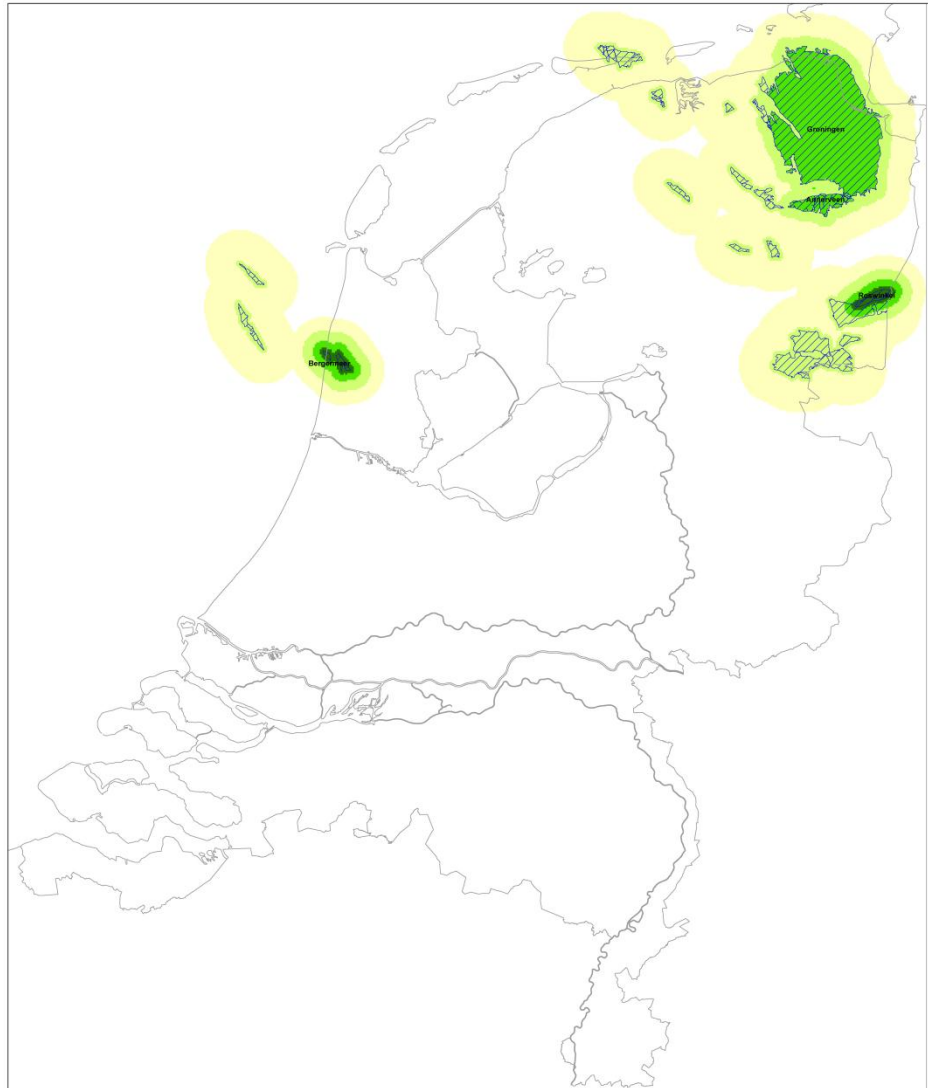
Kaart 1B. Kans op beven (gegevens meegenomen tot 01-05-2010) voor gasvelden in Noord-West Nederland.



Kaart 1C. Kans op beven (gegevens meegenomen tot 01-05-2010) voor gasvelden in Zuid-West Nederland.

Bijlage 2

Horizontale pieksnelheid op de fundering (T = 10)



Legend

Pieksnelheid op de fundering (T=10)

- 0 - 10 mm/s
- 10 - 20 mm/s
- 20 - 30 mm/s
- 30 - 40 mm/s
- Gasvelden

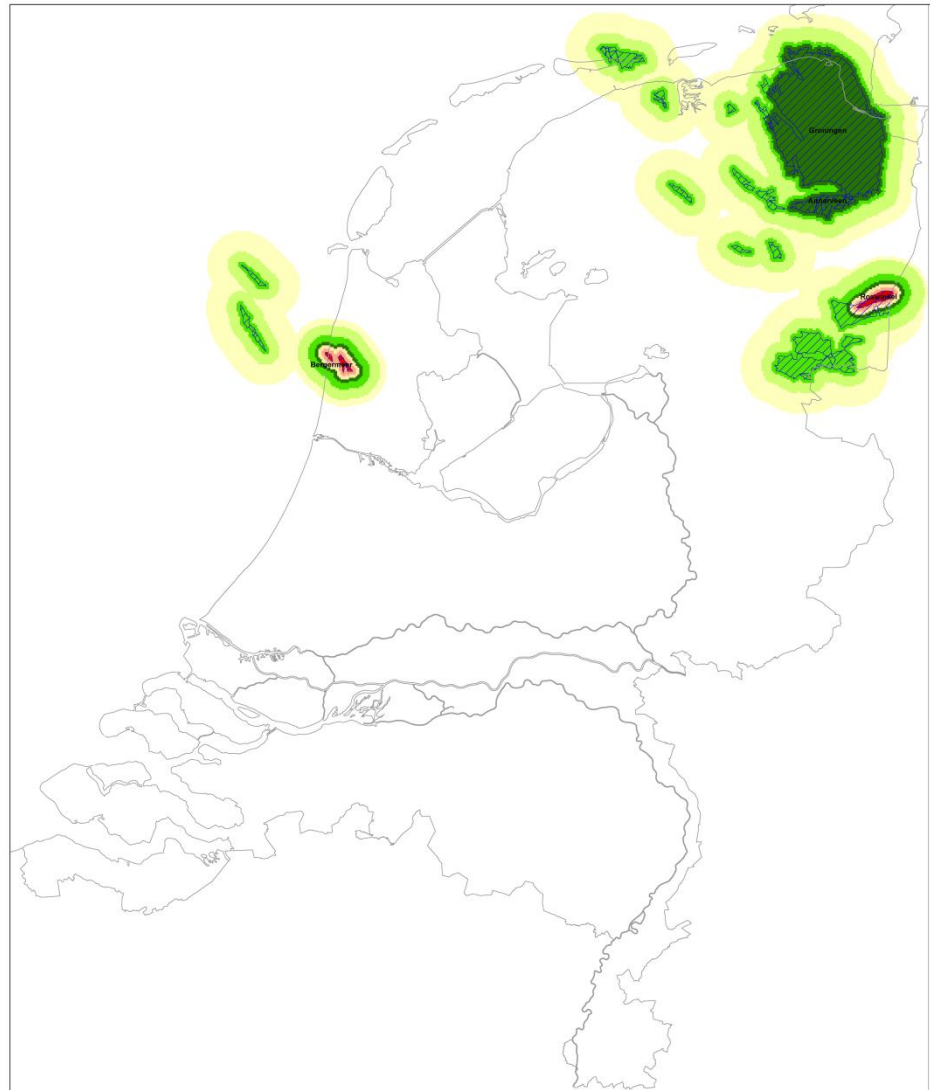


Bijlage: 2A
Projectnaam: Seismisch hazard geïnduceerde aardbevingen
Opdrachtgever: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
BF Nederlandse Energie B.V.
Total Nederland B.V.
Wintershall Noordzee B.V.
December 2004
Schaal: 1:100 000
Digitale verwerking: J. G. Veilkamp, J. M. M. Hettelaar
Projectie: RD
Bron: Algemene seismische hazard: KNMI
Site response gegevens: TNO



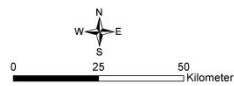
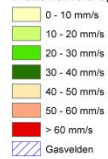
Kaart 2A. Horizontale pieksnelheid op de fundering voor een jaarlijkse overschrijdingskans van 10% (T=10, eens per 10 jaar).

Horizontale pieksnelheid op de fundering (T = 100)



Legend

Pieksnelheid op de fundering (T=100)

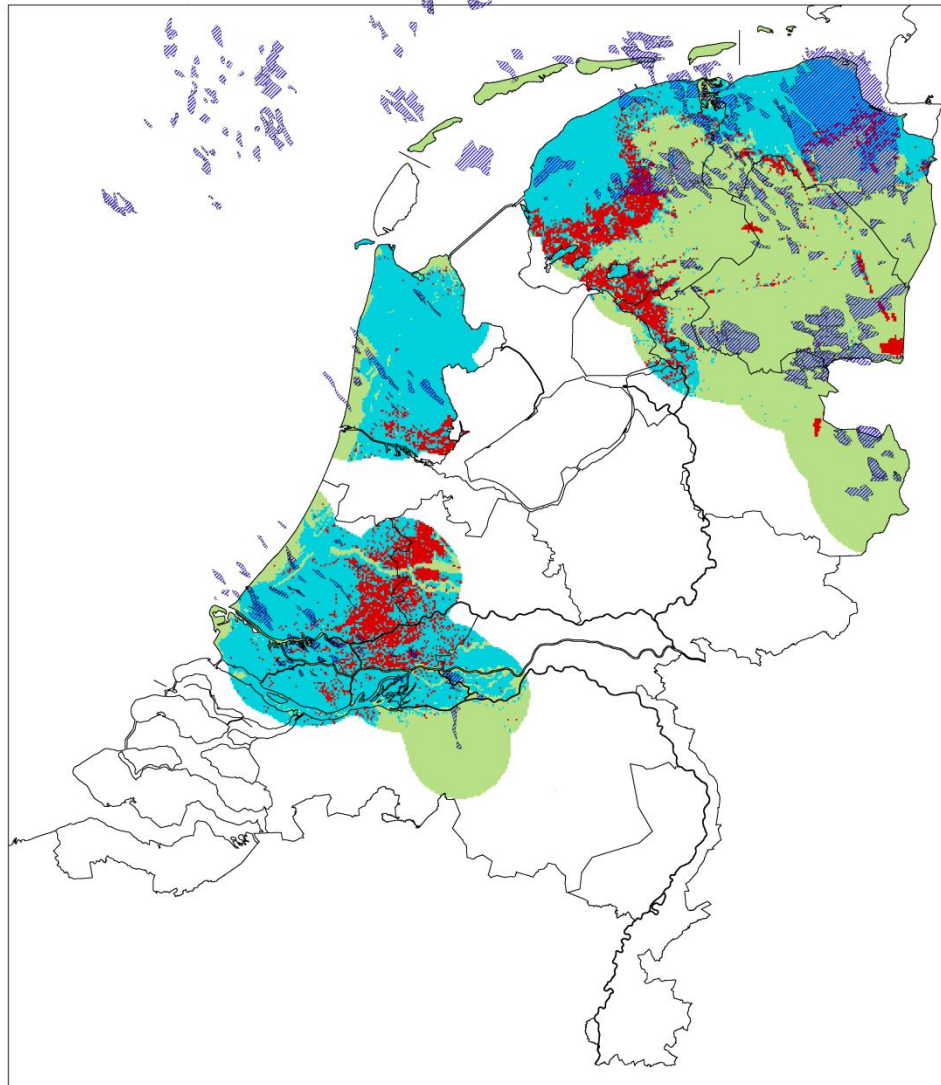


Bijlage: 2B
Projectnaam: Seismisch hazard geïnduceerde aardbevingen
Opdrachtgever: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
BP Nederland Energie B.V.
Total Nederland B.V.
Wintershall Noordzee B.V.
December 2004
Schaal: 1:100.000
Digitale verwerking: J.G. Veldkamp, J.M.M. Hetselaar
Projectleider: RD
Bron: Algemene seismische hazard: KNMI
Site response gegevens: TNO

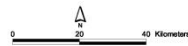
Kaart 2B. Horizontale pieksnelheid op de fundering voor een overschrijdingskans van 10% in 10 jaar (T=100, eens per 100 jaar).

Bijlage 3

Site response - ondergrondklassen



site response - ondergrondklassen
■ klasse 'special study soils'
■ klasse 'stijve grond'
■ klasse 'slappe grond'
■ Gasvelden



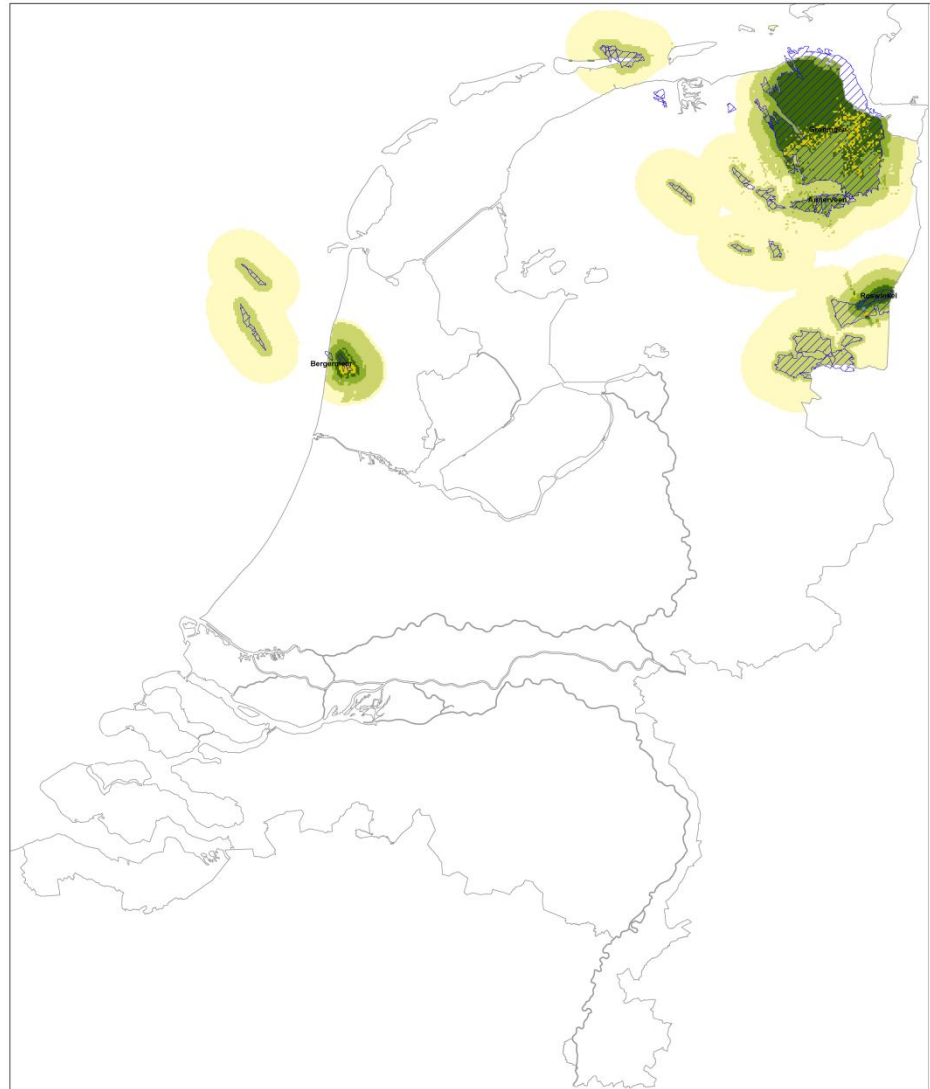
Bijlage: 3
Projectnaam: Samenluchthazard geïnduceerde aardbevingen
Opdrachtgever: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
SR Nederland Energie B.V.
TotalNederland B.V.
Winklerhof Noordzee B.V.
December 2004
Schaal: 1:500.000
Digitale verwerking: J.C. Verloop, J.M.M. Heijelaar
Projectleider: RD
Bron: Site response gegevens: TNO-NITG



Kaart 3. Site response kaart.

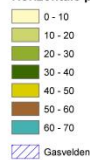
Bijlage 4

Horizontale pieksnelheid op de fundering (T = 10)
(gecorrigeerd voor site response)



Legend

Horizontale pieksnelheid op de fundering (mm/s) T = 10

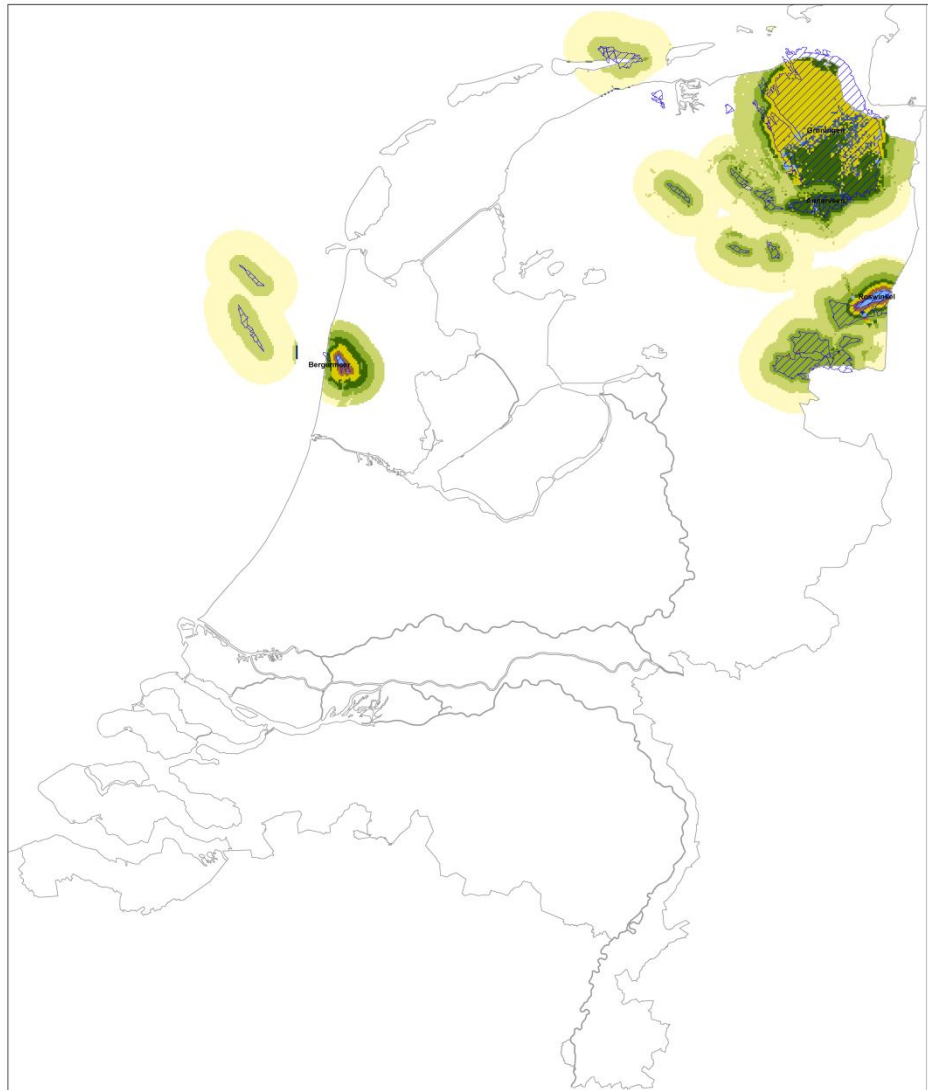


Bijlage: 4A
Projectnaam: Seismisch hazard gasvullende aardbevingen
Oprichtgever: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
BP Nederland Energie B.V.
Toal/Nederland B.V.
Wintershall Noordzee B.V.
December 2004
Schaal: 1:100.000
Digitale verwerking: J.G. Veldkamp, J.M.M. Hettelaar
Projectle: RD
Bron: Algemene seismische hazard: KNMI
Site response gegevens: TNO



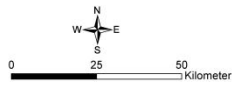
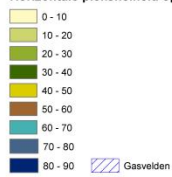
Kaart 4a. Horizontale pieksnelheid op de fundering voor een jaarlijkse overschrijdingskans van 10% (T=10, eens per 10 jaar), gecorrigeerd voor de site response.

Horizontale pieksnelheid op de fundering (T = 100)
(gecorrigeerd voor site response)



Legend

Horizontale pieksnelheid op de fundering (mm/s) T = 100



Bijlage: 4B
Projectnaam: Seismisch hazard geïnduceerde aardbevingen
Opdrachtgever: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., BP Nederland Energie B.V., TotalNederland B.V., Wintershall Noordzee B.V.
Schaal: December 2004
Digitale verwerking: J.G. Veldkamp, J.M.M. Hetselaar
Projectleider: RD
Bron: Algemene seismische hazard: KNMI
Site response gegevens: TNO

Kaart 4b. Horizontale pieksnelheid op de fundering voor een overschrijdingskans van 10% in 10 jaar (T=100, eens per 100 jaar), gecorrigeerd voor de site response.

Bijlage 5

In [9] is de kans-op-schade voor diverse typen woningen bepaald op basis van schademeldingen voor 5 geïnduceerde aardbevingen:

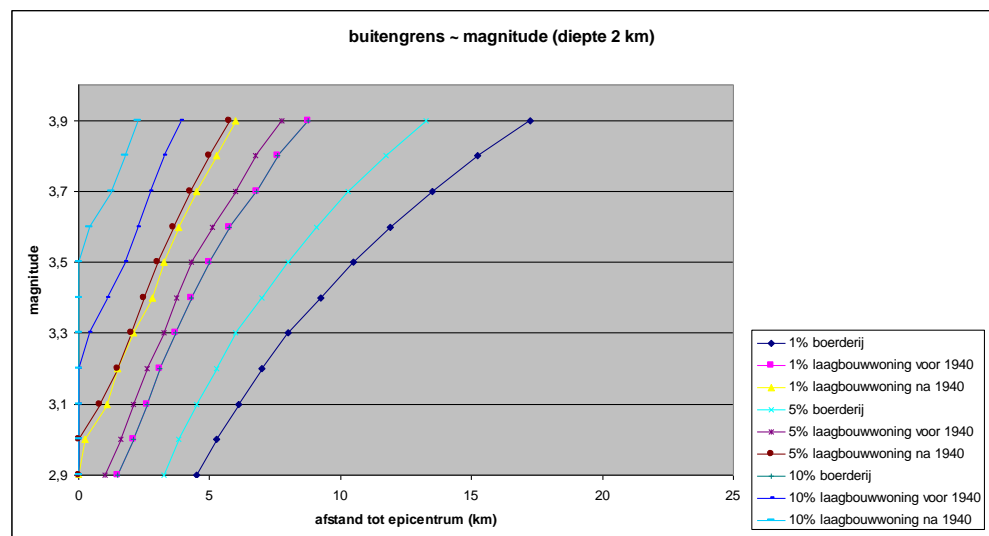
Roswinkel, 1997, M=3.2
Roswinkel, 1998, M=3.4
Hoeksmeer, 2003; M=3.0
Stedum, 2003, M=3.0
Westeremden, 2006, M=3.5

Tabel 1 geeft een vergelijking van de in [9] berekende trillingssnelheden bij 1% kans op schade en de grenswaarde genoemd in de SBR-richtlijn [8].

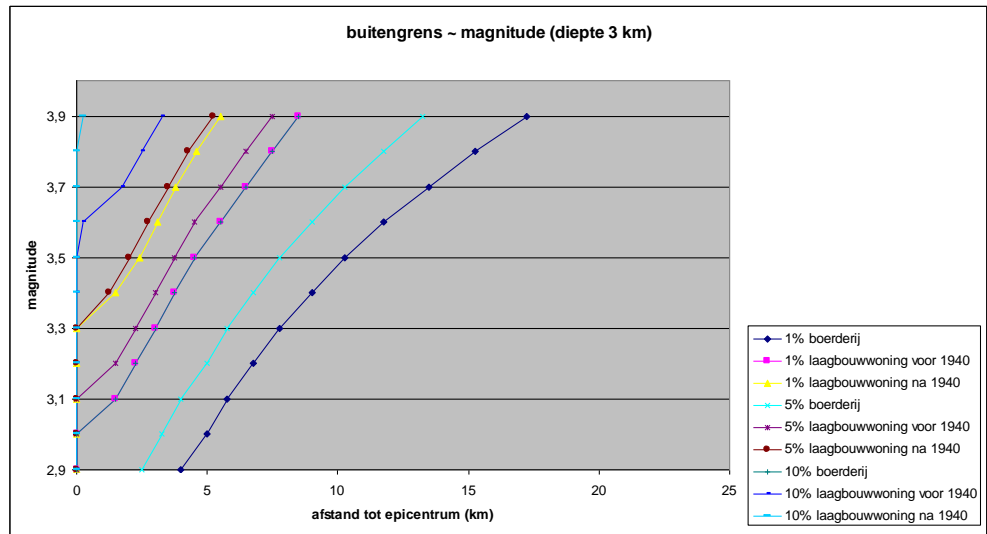
Tabel 1. Trillingssnelheden behorend bij 1% kans-op-schade, gedifferentieerd voor 4 woningtypen. De berekende trillingssnelheden komen goed overeen met de grenswaarden genoemd in de SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen'.

Categorie	Trillingssnelheid bij 1% kans op schade (mm/s)	SBR categorie	Grenswaarde SBR (mm/s)
Boerderij	2,4	3	3
Laagbouwwoning voor 1940	3,3	2	5
Laagbouwwoning na 1940	5,8	2	5
Hoogbouwwoning	>>	1	20

In [9] is voor een gegeven aardbevingmagnitude en -diepte de afstand van het epicentrum afgeleid, waarop nog schade verwacht wordt, de zogenaamde 'buitengrens' van schade.



Figuur 2A. Buitengrens voor schadeclaims bij een gegeven magnitude, voor een haarddiepte van 2km. De achterliggende schadecurves zijn gebaseerd op gegevens voor aardbevingen met magnitudes van M=3.0 to M=3.5. De voorspelling van de buitengrens voor bevingen met magnitudes groter dan M=3.5 berust op extrapolatie en is hiermee minder betrouwbaar.



Figuur 1B. Buitengrens voor schadeclaims bij een gegeven magnitude, voor een haarddiepte van 3km. De achterliggende schadecurves zijn gebaseerd op gegevens voor aardbevingen met magnitudes van $M=3.0$ tot $M=3.5$. De voorspelling van de buitengrens voor bevingen met magnitudes groter dan $M=3.5$ berust op extrapolatie en is hiermee minder betrouwbaar.