



> Retouradres Postbus 20101 2500 EC Den Haag

**Directoraat-generaal voor  
Energie en Telecom**  
Directie Energiemarkt

Bezuidenhoutseweg 30  
Postbus 20101  
2500 EC Den Haag  
T 070 379 8911 (algemeen)  
www.ez.nl

**Rehandeld door**

Datum **11 AUG 2009**

Betreft WOB verzoek onderzoeksrapportages opslagplan Bergermeer

**Ons kenmerk**  
ET/EM / 9139326

**Bijlage(n)**  
diversen

## Besluit:

Geachte heer,

Naar aanleiding van uw verzoek om informatie op grond van de Wet openbaarheid van bestuur (Wob) d.d. 23 juli 2009, betreffende rapporten van het opslagplan Bergermeer, beslis ik als volgt op uw verzoek.

In uw brief verzoekt u om toezending van kopieën van de volgende onderzoeksrapporten:

- Wassing, B.B.T., Maljers, D., Westerhoff, R.S., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., 2003. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 1, TNO-rapport NITG 03-185-C;
- Wassing, B.B.T., Maljers, D., Westerhoff, R.S., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., Koopman, A., Dullemond, A., Roos, W., 2004. seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 2 TNO-rapport NITG 03-186-C.

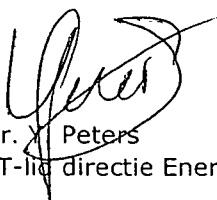
De door u gevraagde informatie kan in zijn geheel openbaar worden gemaakt. De kopieën zijn als bijlage bij dit besluit gevoegd. Betreffende rapportages zijn tevens in te zien via de website: [www.geofoon.nl](http://www.geofoon.nl).

**Directoraat-generaal voor  
Energie en Telecom**  
Directie Energiemarkt

**Ons kenmerk**  
ET/EM / 9139326

Op verzoek van TAQA Onshore B.V. maak ik u tevens kenbaar dat zij het van groot belang acht dat rapportages op correcte wijze worden geïnterpreteerd. Hiervoor is zij graag bereid een nadere toelichting te geven op de bijgevoegde rapportages.

De Minister van Economische Zaken,  
namens deze:



mr. X. Peters  
MT-lid directie Energiemarkt

Tegen dit besluit kan degene wiens belang rechtstreeks bij dit besluit is betrokken binnen 6 weken na de dag van verzending van dit besluit een gemotiveerd bezwaarschrift indienen bij de Minister van Economische Zaken, Directie Wetgeving en Juridische Zaken (ALP: L/204), Postbus 20101, 2500 EC 's-Gravenhage. Dit besluit is verzonden op de in de in de aanhef vermelde datum.

# Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen Integratie van deelstudies

## Datum

20 december 2004

## Auteurs

Wassing, B.B.T., TNO-NITG

Van Eck, T., KNMI

Van Eijs, R.M.H.E., TNO-NITG



TNO-NITG  
Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

T +31 (0)30-2564850  
F +31 (0)30-2564855  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)



KNMI  
Wilhelminalaan 10  
Postbus 201  
3730 AE De Bilt

T +31 (0)30-2206911  
F +31 (0)30-2210407  
[www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)

**TNO/KNMI-rapport**

**Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen**  
*Integratie van deelstudies*

Datum                    20 december 2004

Auteur(s)                Wassing, B.B.T. (TNO-NITG)  
                              Van Eck, T. (KNMI)  
                              Van Eijs, R.M.H.E. (TNO-NITG)

© KNMI, De Bilt. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in retrieval systems, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without prior permission in writing from the publisher.

Alle rechten voorbehouden.

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

© 2004 TNO

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Beschrijving van de kaarten.....</b>	<b>5</b>
2.1	Bijlage 1: De kans op beven van een olie- of gasvoorkomen.....	5
2.2	Bijlage 2: Probabilistische seismische hazard analyse .....	6
2.3	Bijlage 3: Site response .....	6
2.4	Bijlage 4: Seismische zonatiekaarten, gecorrigeerd voor site response .....	7
2.5	Gebruik van de kaarten.....	8
<b>3</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>10</b>

### Appendices

Appendix 1. Kans op beven (in procenten) op basis van verwachte totale drukval voor de verschillende voorkomens.

Appendix 2. Horizontale pieksnelheid op de fundering.

Appendix 3. Site response.

Appendix 4. Horizontale pieksnelheid op de fundering (gecorrigeerd voor de site response).

Appendices apart bijgeleverd op CD.



# 1 Inleiding

TNO-NITG, TNO Bouw en het KNMI hebben de afgelopen twee jaar een aantal studies uitgevoerd, bedoeld om de aspecten die invloed hebben op het seismisch risico ten gevolge van bevingen, geïnduceerd door de olie- en gaswinning, systematisch in kaart te brengen en het risico op basis van de nu bekende kennis en gegevens te kwantificeren. De aanleiding voor deze studies is de nieuwe mijnbouwwet, die de mijnbouwmaatschappijen per 1 januari 2003 onder andere verplicht om een risico-analyse uit te voeren en een meetplan te presenteren alvorens toestemming te krijgen voor winning.

De studies presenteren de gezamenlijke state-of the-art kennis van geïnduceerde seismiciteit gebaseerd op 17 jaar continue waarnemingen door het KNMI, de verzamelde productiegegevens van de maatschappijen (vertrouwelijk, maar verplicht gedeponeed bij TNO-NITG), de kennis van de diepe en ondiepe ondergrond van TNO-NITG en de bouwtechnische expertise van TNO Bouw.

Het betreft in totaal 3 deelstudies:

- TNO-NITG heeft in 2004 een deterministische seismische hazard-analyse uitgevoerd voor de onshore olie- en gasvelden in Nederland. In deze studie is onderzocht of het mogelijk is om een uitspraak te doen over de kans dat er in deze voorkomens aardbevingen optreden, op basis van de geologische, produktietechnische en mechanische kenmerken van de verschillende olie- en gasvoorkomens. De in het rapport beschreven techniek biedt tevens de mogelijkheid om een kans op aardbevingen in te schatten voor een nog te produceren voorkomen. De resultaten van het onderzoek zijn vastgelegd in *Van Eijs, 2004. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit. TNO-NITG rapport NITG 04-171-C.*
- Het KNMI heeft in 2003/2004 een probabilistische schatting uitgevoerd van de te verwachten grondbeweging boven verschillende onshore olie- en gasvelden in Nederland, die momenteel seismische activiteit vertonen. 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 van de geïnduceerde bevingen 3.9 op de schaal van Richter bedraagt. De resultaten van dit onderzoek zijn vastgelegd in *Van Eck, 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI scientific report; WR 2004-01.*
- TNO-NITG heeft in 2003/2004 een studie verricht naar de invloed van de lokale site response op de geschatte bodembeweging. Aan de hand van de resultaten zijn de seismische zonatiekaarten aangepast voor de site response. Daarnaast heeft TNO-NITG in samenwerking met TNO Bouw onderzoek uitgevoerd naar de schadegevoeligheid van gebouwen in de omgeving van de gasvelden. De resultaten van deze studie zijn vastgelegd in *Wassing, 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 1 en Rapportage fase 2. TNO-rapporten NITG 03-185-C en NITG 03-186-C.*

In dit rapport worden de resultaten van de drie verschillende deelstudies geïntegreerd en samengevat in de vorm van 6 kaarten. De nadruk van dit rapport ligt op de kwantificatie van de (kans op het optreden van) bodembeweging ten gevolge van geïnduceerde aardbevingen en de gebruiksmogelijkheden van de kaarten.

Bij elke bijlage wordt kort toegelicht op welke wijze de kaart tot stand is gekomen en welke informatie op de kaart wordt weergegeven. In de deterministische hazard analyse, die is uitgevoerd nadat de hazard studies van KNMI en TNO-NITG waren afgerond, is nieuw inzicht verkregen in de kans op beven van de verschillende olie- en gasvelden. Hierdoor zijn enkele eerdere aannames over de kans op beven van de verschillende velden herzien. Dit verklaart het feit dat het aantal olie- en gasvelden dat wordt weergegeven op de seismische hazard zonation kaarten in dit rapport is gewijzigd ten opzichte van de eerdere kaarten. In het laatste hoofdstuk wordt kort ingegaan op het gebruik van de kaarten.

## 2 Beschrijving van de kaarten

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

In de studie 'Deterministische Hazard Analyse voor Geïnduceerde Seismiciteit' is door TNO-NITG onderzocht welke eigenschappen (geologische, productietechnische en geomechanische eigenschappen) van de olie- en gasvoorkomens invloed hebben op het wel of niet optreden van aardbevingen. Om de voorkomens goed met elkaar te kunnen vergelijken is de dataset gesplitst op basis van de totale drukdaling in het voorkomen. Alleen de voorkomens met een drukval > 72 bar zijn met elkaar vergeleken. Uit de studie is gebleken dat het mogelijk is om aan de hand van twee parameters van een olie- of gasvoorkomen een uitspraak te doen over de kans op beven van dat voorkomen. Deze twee parameters zijn:

- E: de verhouding tussen de Young's moduli (stijfheidsmoduli) van de 'overburden' -en het reservoirgesteente;
- B: een maat voor de breukdichtheid van het reservoir.

Op basis van statistisch onderzoek naar de combinatie van deze parameters en gebruikmakend van informatie over de voorkomens die al gebeefd hebben, kunnen voorkomens ingedeeld worden in 4 kansklassen:

- Kans op aardbeving 0
- Kans op aardbeving 0.10
- Kans op aardbeving 0.52
- Kans op aardbeving 1

Op de kaart in bijlage 1 zijn de olie- en gasvelden op land en binnen de 3-mijls zone ingedeeld in de bovengenoemde 4 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 twee parameters betreft, sterk lijken op de voorkomens die reeds gebeefd hebben krijgen een relatief hoge kans (0.52) op een aardbeving toegekend. Voorkomens die weinig of geen gelijkenis vertonen met de velden die al gebeefd hebben krijgen een zeer geringe kans van op een aardbeving (0.10) of een kans van 0 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 (bijlage 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 kans van 0 tot een zeer geringe kans (0.10) van beven wordt toegekend. Een groot deel van de voorkomens in Groningen, Drente en Overijssel en enkele voorkomens in Noord-Holland daarentegen hebben een redelijke kans op beven (0.52) of hebben al gebeefd (1).



*Voor een uitgebreide beschrijving van de uitgangspunten, aannames en resultaten van de deterministische hazard analyse wordt hier verwezen naar Van Eijs, 2004. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit. TNO-NITG rapport NITG 04-171-C.*

## 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). Deze kaarten, die de te verwachten bodembewegingen aangeven, zijn gebaseerd op een probabilistische seismic hazard analyse. Deze analyse is gebaseerd op statistische modellen van de seismiciteit en empirische modellen voor het schatten van de groundbeweging, gegeven de kracht, diepte en afstand van de beving. Om de specifieke bodembeweging, veroorzaakt door kleine en ondiepe geïnduceerde bevingen, en de waarschijnlijkheid daarop te kunnen schatten, zijn de modellen geijkt op de waarnemingen van het seismisch netwerk in Nederland in de afgelopen 17 jaar.

Het resultaat van deze 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 om zich nu 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 damping 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 Van Eck, 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI scientific report; WR 2004-01.*

## 2.3 Bijlage 3: Site response

Afhankelijk van de samenstelling van de bovenste tientallen meters van de ondergrond kan er lokaal een extra damping 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 2 geeft pieksnelheden voor een gemiddelde vaste referentie-ondergrond (stijve grond). Amplificatie is hier gedefinieerd als opslinging van de groundbeweging 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 groundbeweging opgeslingerd worden. Deze klassen worden gekenmerkt door amplificatiefactoren: Deze geven een gemiddelde respons voor 'vergelijkbare' sites. In de klasse 'slappe grond' kan de groundbeweging tot een factor 1.5 opgeslingerd worden. In de klasse 'special study soils' kan de groundbeweging tot een factor 2 opgeslingerd worden. De amplificatie is afhankelijk van de amplitude van de groundbeweging 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 Wassing, 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 1 en Rapportage fase 2. TNO-rapporten NITG 03-185-C en NITG 03-186-C.*

#### 2.4 Bijlage 4: Seismische zonatiekaarten, gecorrigeerd voor 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 overig 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 10km 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 Van Eck, 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI scientific report; WR 2004-01 en Wassing, 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 1 en Rapportage fase 2. TNO-rapporten NITG 03-185-C en NITG 03-186-C.*

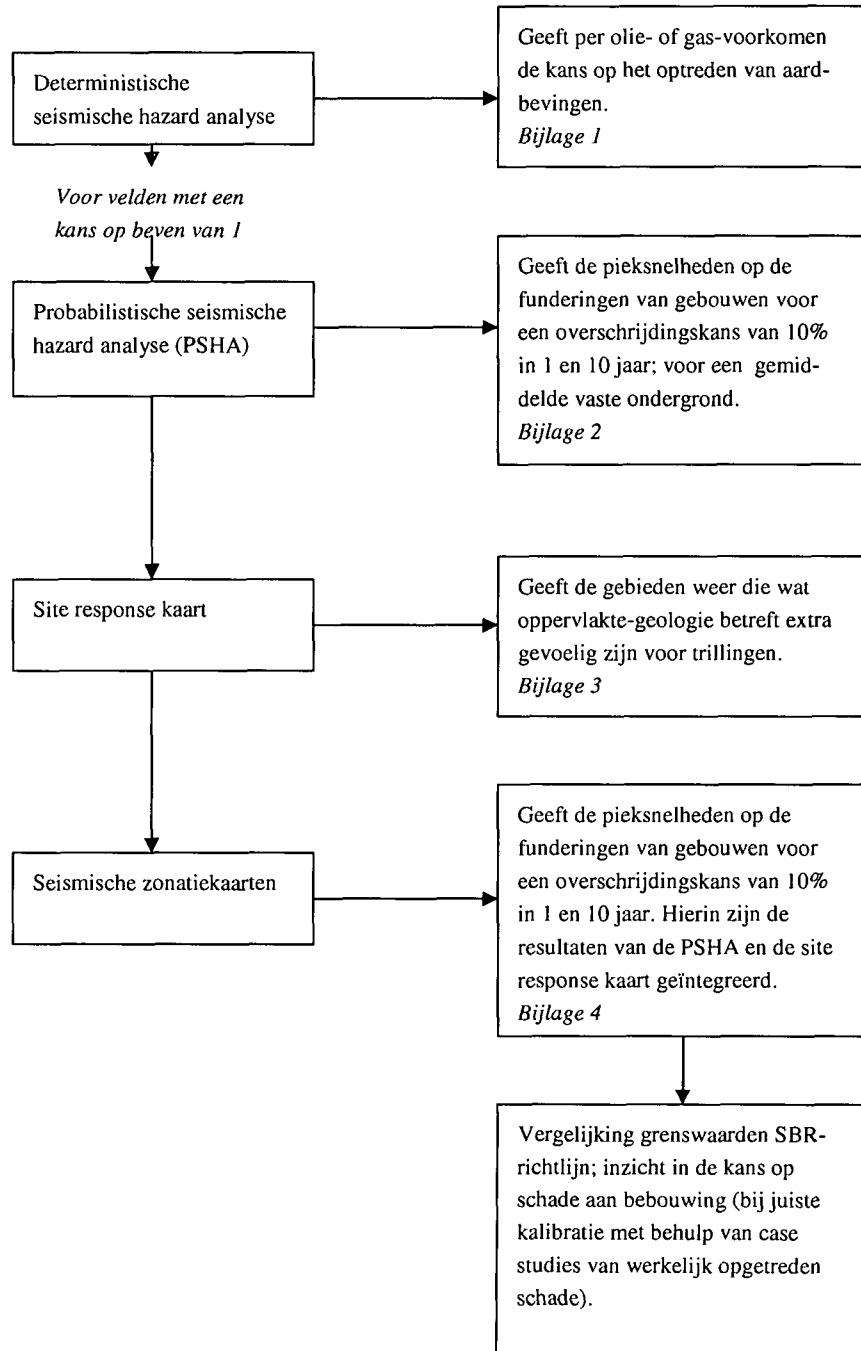
## 2.5 Gebruik van de kaarten

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 4 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.

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 trillingsnelheden voor verschillende typen woningen uit de SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen'. Volgens de SBR-richtlijn dienen de pieksnelheden eerst vermenigvuldigd te worden met een veiligheidsfactor (1.6) om de mogelijke opslingering in het gebouw in rekening te brengen. Onder de in de SBR-richtlijn gestelde grenswaarden wordt geen schade verwacht. Boven de SBR-richtlijn neemt de kans op schade betrekkelijk langzaam toe.

Hier wordt benadrukt dat de kaarten gebaseerd zijn op de op dit moment best beschikbare kennis en modellen, maar dat enkele van de modellen hun beperkingen kennen. Zo is uit een recente case studie voor Roswinkel gebleken dat met de gebruikte empirische dempingrelatie (Campbell, 1997) de pieksnelheden, en daarmee ook het risico op schade, op afstanden groter dan circa 7 km mogelijk aanzienlijk wordt overschat (Wassing, 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Aanpassing dempingsfunctie. TNO-rapport NITG 04-233-C). 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.

De pieksnelheden zijn tot een afstand van 10km van de rand van het veld in kaart gebracht.



Figuur 1. Opzet en toepassing van de kaarten.

### 3 Referenties

Campbell, K.W., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo-acceleration response spectra. In: Seism. Res. Lett., 68, pp.154-179.

Van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H., Dost, B., 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI Scientific report; WR 2004-01.

Waarts, P.P.H., Ostendorf, C.H., 2002. SBR-deel A: Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A – Schade aan gebouwen. Rotterdam, Stichting Bouwresearch, 2002.

Wassing, B.B.T., Maljers, D., Westerhoff, R.S., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., 2003. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 1. TNO-rapport NITG 03-185-C.

Wassing, B.B.T., Maljers, D., Westerhoff, R.S., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., Koopman, A., Dullemond, A., Roos, W., 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 2. TNO-rapport NITG 03-186-C.

Wassing, B.B.T., Waarts, P.P.H., 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Aanpassing dempingsfunctie. TNO-rapport NITG 04-233-C.

**Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen**

TNO-NITG  
Utrecht  
Princetonlaan 6  
Postbus 800015  
3508 TA Utrecht

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

T 030 256 44 70  
F 030 256 44 75  
[info@nitg.tno.nl](mailto:info@nitg.tno.nl)

**TNO-rapport NITG 04-233-C**

**Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen  
Onderzoek aanpassing dempingsfunctie**

Datum	15 december 2004
Auteur(s)	Drs. B.B.T. Wassing (TNO-NITG) Dr. Ir. P.H. Waarts (TNO Bouw)
Exemplaarnummer	1
Oplage	1
Aantal pagina's	13
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. BP Nederland Energie B.V. TOTAL Nederland B.V. Wintershall Noordzee B.V.
Projectnaam	Onderzoek aanpassing dempingsfunctie
Projectnummer	005.24104

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 onderzoekopdrachten 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.

© 2004 TNO

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Aanpassing en validatie dempingsfunctie.....</b>	<b>5</b>
2.1	Dempingsfunctie Campbell (1997) versus Dost (2004).....	5
2.2	Case Roswinkel 1997, $M_f=3.4$ .....	8
<b>3</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>13</b>



## 1 Inleiding

In 2003 is door TNO en KNMI in opdracht van het consortium bestaande uit Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., BP Nederland Energie B.V., TOTAL Nederland B.V. en Wintershall Noordzee B.V. onderzoek uitgevoerd naar het seismisch hazard door geïnduceerde aardbevingen en de gevoeligheid van de verschillende typen gebouwen voor schade door geïnduceerde seismiciteit. Op basis van modellen voor de seismiciteit van de verschillende gas- en olievelden en functies voor de demping van de trillingen door de ondergrond, de *site response* en de overdracht van naar de fundering en het gebouw is een seismische *hazard* analyse uitgevoerd. Als resultaat levert deze analyse *hazard zonation* kaarten op, die de pieksnelheden behorend bij een overschrijdingskans van 10% in 1 en 10 jaar weergeven. De pieksnelheden zijn vergeleken met de grenswaarden voor trillingssnelheden voor verschillende typen woningen uit de SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen'. Uit deze vergelijking wordt een indruk verkregen van de omvang van gebieden waar schade wordt verwacht. Onder de in de SBR-richtlijn gestelde grenswaarden wordt geen schade verwacht.

De modellen zijn getoetst aan de hand van de praktijkcase Roswinkel 1997. Hiertoe is voor een aardbeving met eenzelfde magnitude en hypocentrum als de werkelijke aardbeving in Roswinkel in 1997 ( $M_1=3.4$ ) bepaald hoeveel schadegevallen op basis van de modellen worden voorspeld. Het aantal schadegevallen is vervolgens vergeleken met het werkelijke aantal schadegevallen. Uit deze vergelijking blijkt dat het aantal woningen met schade dat met de huidige modellen voorspeld wordt met name op de grotere afstanden ( $>7$  km) veel hoger ligt dan het aantal dat in werkelijkheid is gemeld.

In dit onderzoek is getracht de dempingsfunctie, en dan met name voor grotere afstanden van het epicentrum, te verbeteren op basis van gegevens op intensiteitskaarten en door een betere verwerking van de invloed van de *site response*. Aan het eind van het onderzoek is nagegaan in hoeverre de aanpaste dempingsfunctie leidt tot een betere voorspelling van het aantal schadegevallen.

Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek.



## 2 Aanpassing en validatie dempingsfunctie

### 2.1 Dempingsfunctie Campbell (1997) versus Dost (2004)

In Dost (2004) worden enkele gangbare empirische relaties beschreven voor de *attenuation* van de *peak ground acceleration* (*pga*) en *peak ground velocity* (*pgv*) en wordt nagegaan welke van deze relaties gebruikt kunnen worden om de groundbeweging bij kleine ondiepe geïnduceerde aardbevingen te voorspellen. Dost et al (2004) concluderen dat de dempingsfunctie van Campbell (1997) een redelijke voorspelling geeft voor de groundbeweging bij kleine ondiepe geïnduceerde aardbevingen, maar concluderen tevens dat de nieuwe dempingsfuncties voor de *pga* en *pgv*, gebaseerd op gegevens van accelerometers en boorgatseismometers in Nederland, de *hazard*-schattingen kunnen verbeteren.

De seismische *hazard* analyse van het KNMI (beschreven in Van Eck, 2004) is gebaseerd op de dempingsfunctie gegeven in Campbell (1997). Uit een eerdere toetsing van de verschillende *hazard*-en schademodelen aan de praktijkcase Roswinkel blijkt dat het aantal schadegevallen dat op basis van de modellen voorspeld wordt met name voor de grotere afstanden overschat wordt (TNO-rapport NITG-03-186-C, 2003). Eén van de redenen hiervoor zou kunnen zijn dat de dempingsfunctie van Campbell (1997) de groundbeweging op grotere afstand van het epicentrum overschat.

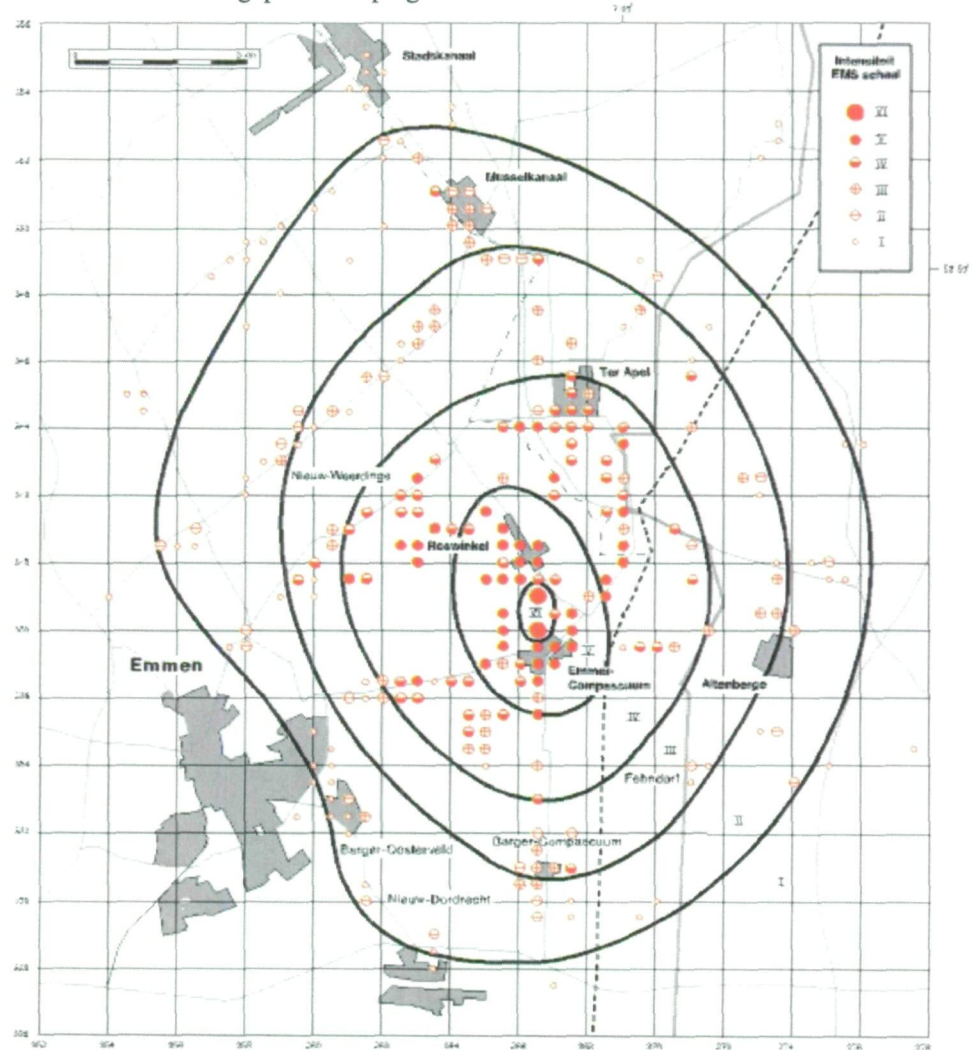
Wanneer de voorspelde *pgv* wordt uitgezet tegen de afstand tot het epicentrum van de beving (zie figuur 2a) blijkt dat de verwachtingswaarde voor de *pgv* op 15 km afstand van het epicentrum 2.5 mm/s bedraagt. Na vermenigvuldiging met de door de SBR-richtlijn vereiste veiligheidsfactor 1.6 ligt op deze afstand de *pgv* nog boven de SBR-grens van 3 mm/s voor CAT III gebouwen (monumenten/gebouwen in slechte staat). Schade kan pas optreden bij trillingssnelheden die een orde hoger zijn dan de voelbaarheidsgrens. De *pgv* op basis van de dempingsfunctie van Campbell lijkt daarom tegenstrijdig met het algemene beeld op de intensiteitskaart, die is opgesteld na de aardbeving van  $M_L = 3.4$  in Roswinkel (zie figuur 1). Hieruit blijkt dat buiten een straal van 10 tot 14 km de aardbeving niet meer gevoeld is (intensiteit I op de EMS-schaal). Uit gegevens van TNO Bouw (P. Waarts, pers. comm., 2004) blijkt dat de 'voelbaarheidsgrens' voor een trilling met (wat betreft frequentie en duur) vergelijkbare kenmerken als de aardbeving gemiddeld ligt bij ongeveer 0.2 mm/s. Vanaf ongeveer 0.2 mm/s zullen mensen de aardbeving beginnen te voelen; vanaf 0.8 mm/s zal nagenoeg iedereen de trilling zeer duidelijk hebben waargenomen. Met andere woorden: Het is onwaarschijnlijk dat de *pgv* op een afstand van 14 km de 0.4 mm/s overschrijdt. De dempingsfunctie van Campbell (1997) lijkt hiermee de snelheden in de 'staart' te overschatten (zie figuur 2a).

Dost et al (2004) geven aan dat de *hazard*-schattingen verbeterd kunnen worden door de op Nederlandse data gekalibreerde dempingsfunctie te gebruiken:

$$\log(V_h) = -1.53 + 0.74M_L - 0.00139r - 1.33\log(r)$$

Met:  $V_h$  de snelheid in cm/s,  $M_L$  de magnitude van de beving en  $r$  de afstand (km) tot het hypocentrum van de beving.

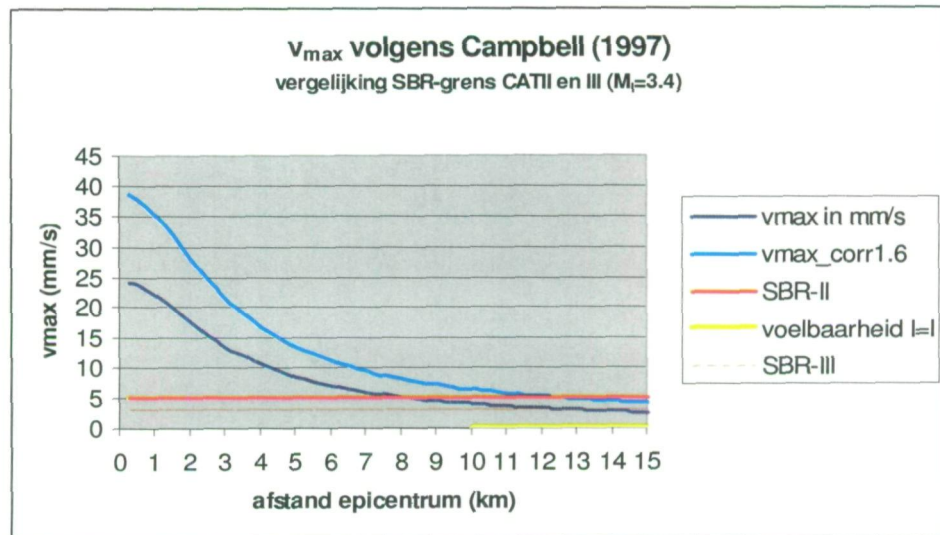
Dost et al (2004) gebruiken een correctiefactor 2 om de ‘gemiddelde’ site response van de bovenste 200m van de ondergrond in rekening te brengen. Voor een relatief stijve ‘referentie-ondergrond’ zoals aanwezig rondom Roswinkel (TNO-rapport NITG-03-186-C, 2003) geeft dit waarschijnlijk een overschatting van de *site response* – de snelheden afkomstig uit de dempingrelatie van Dost zijn derhalve door 2 gedeeld. Figuur 2b geeft bij een toenemende afstand tot het epicentrum de *pgv*'s weer die zijn berekend met de aangepaste dempingrelatie van Dost.



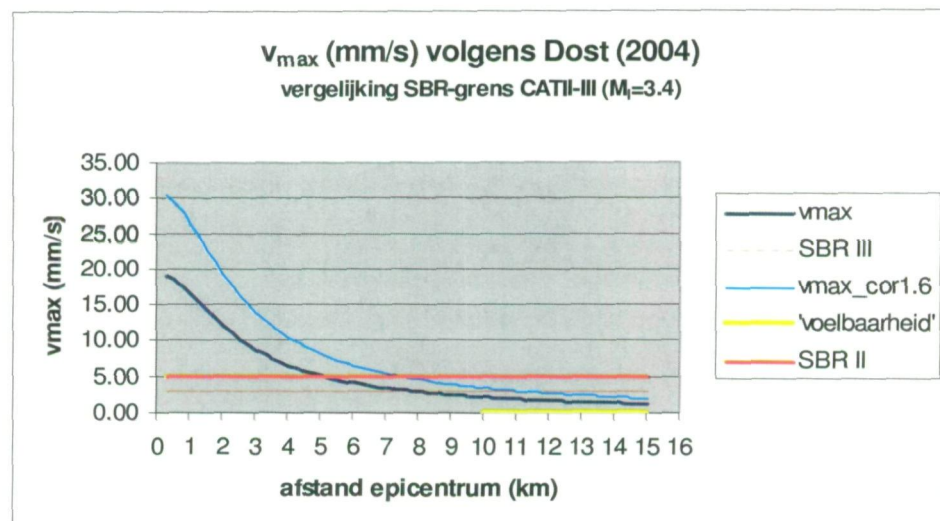
Figuur 1. Intensiteitskaart voor de aardbeving van Roswinkel 1997 ( $M_l=3.4$ ). Uit: Dost en Haak, 1997.

Uit figuur 2b blijkt dat de verwachtingswaarde voor de *pgv* op 15 km afstand van het epicentrum volgens deze relatie 1.2 mm/s bedraagt. Na vermenigvuldiging met de door de SBR-richtlijn vereiste veiligheidsfactor 1.6 ligt vanaf zo'n 11km de *pgv* onder de

SBR-grens van 3 mm/s voor CAT III gebouwen en wordt geen schade meer voorspeld. Hoewel de  $pgv$ -waarden berekend op basis van deze nieuwe relatie lager zijn dan de waarden van Campbell (1997), liggen ook bij deze relatie de snelheden nog een factor 3 boven de voelbaarheidsgrens. Ook deze dempingsfunctie lijkt hiermee de snelheden in de 'staart' te overschatten (zie figuur 2b).



Figuur 2a. Vergelijking van de verwachtingswaarde voor de  $pgv$  (mm/s) op basis van de relatie van Campbell (1997) met de SBR-grenswaarden voor CATII (metselwerk) en CATIII (slechte staat) woningen. In de figuur is tevens vanaf 10km de 'voelbaarheidsgrens' weergegeven.



Figuur 2b. Vergelijking van de verwachtingswaarde voor de  $pgv$  (mm/s) op basis van de relatie van Dost (2004) met de SBR-grenswaarden voor CATII (metselwerk) en CATIII (slechte staat) woningen. De relatie van Dost is gecorrigeerd voor de interactie met de site response. In de figuur is tevens vanaf 10km de 'voelbaarheidsgrens' weergegeven.

## 2.2 Case Roswinkel 1997, $M_L=3.4$

Het aantal schadegevallen in het geval van een aardbeving van  $M_L=3.4$  met een hypocentrum in Roswinkel is nogmaals berekend op basis van de aangepaste dempingsfunctie van Dost. Voor de berekening zijn de volgende aannames gedaan:

- De snelheid afkomstig uit de oorspronkelijke dempingsfunctie van Dost et al. (2004) is vermenigvuldigd met een factor 0.5 om een overschatting van het effect van de *site response* te voorkomen; de functie is nog niet gekalibreerd op de voelbaarheidsgrens;
- Gemiddeld gezien is er in het gebied rondom Roswinkel sprake van een relatief stijve ondergrond (referentie-ondergrond - geen opslinging);
- De *pgv* afkomstig uit de dempingsfunctie van Dost (2004) (gecorrigeerd voor een factor 0.5) is equivalent aan de  $v_{max}$  op de fundering (Van Eck et al, 2004);
- Voor  $\log(V_h)$  is een standaard deviatie van 0.33 aangehouden;
- Het aantal woningen binnen een bepaalde afstand van het epicentrum is bepaald op basis van databestanden van BridGis, met RD-coördinaten van alle woningen binnen een straal van 11km van het epicentrum.
- De  $v_{max}$  op een bepaalde afstand van het epicentrum wordt vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor 1.6 die een mogelijke opslinging in het gebouw in rekening brengt. Als uitgangspunt wordt gehanteerd dat er alleen een kans op schade door de aardbeving bestaat als de  $v_{max} * 1.6$  de SBR-grens overschrijdt. Dit betekent dat woningen op lokaties waar de SBR-grens niet wordt overschreden niet zijn meegerekend.
- De kans op schade van bebouwing bij een bepaalde snelheid op de fundering ( $v_{max}$ ) wordt gegeven door de relatie van Waarts et al. (1997) (in TNO-rapport NITG 03-186-C, 2003, p.21);

Er is onderscheid gemaakt tussen het aantal schadegevallen binnen een straal van 7km tot het epicentrum en het gebied daarbuiten. Volgens de opgave van de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. zijn er na de aardbeving in 1997 in totaal 214 schademeldingen ingediend die ook als terecht zijn beoordeeld, waarvan er 212 binnen een straal van 7km liggen en 2 erbuiten.

Tabel 1 geeft de verwachtingswaarde ( $p_{50}$ ) weer voor het aantal schadegevallen bij een aardbeving  $M_L=3.4$ . Uit tabel 1a blijkt dat de verwachtingswaarde voor het aantal schadegevallen door de aardbeving binnen een straal van 7km ongeveer een factor 2.5 hoger uitkomt dan het aantal gemelde en terecht bevonden schadegevallen (511 versus 212).

Uit tabel 1 blijkt ook dat de verwachtingswaarde voor het aantal schadegevallen ook met de nieuwe dempingsfunctie van Dost et al. (2004) bij de aardbeving (de autonome kans op schade meegerekend) buiten de straal van 7km aanzienlijk hoger ligt dan het door de NAM opgegeven getal (116 versus 2).

Binnen 7 km epicentrum

	p50	Geregistreerd
CATII	460	
CATIII	51	
totaal	511	212

Buiten 7 km epicentrum

	p50	Geregistreerd
CATII	19	
CATIII	97	
Totaal	116	2

Tabel 1. Voorspeld aantal schadegevallen bij een  $M_1=3.4$  aardbeving in Roswinkel op basis van hazard- en schademodelen.

#### *Invloed van de voelbaarheid op de geschatte schade*

Om te toetsen of de schattingen van het aantal schadegevallen, met name op de grotere afstanden van het epicentrum, kunnen verbeteren door wel rekening te houden met de voelbaarheidsgrens en te corrigeren voor een factor 3 overschatting in de 'staart' van de dempingrelatie, is de dempingrelatie opnieuw zeer globaal 'gefit' door een aantal datapunten (accelerometerdata Roswinkel, Voerendaal en de voelbaarheidsgrens).

Hier wordt benadrukt dat het een globale 'fit' van de dempingrelatie betreft. Er is gebruik gemaakt van  $pgv$ -data van accelerometers in Roswinkel op een afstand van circa 2.5km (Ros1 en Ros2,  $M=3.3$  en  $M=3.4$ ), de  $pgv$ -waarden van accelerometers rond Voerendaal, op een afstand van 4km (Voel en Voe2;  $M=3.5$ ) en de  $pgv$ -waarde behorend bij de voelbaarheidsgrens op 14 km afstand. Op een logaritmische schaal zijn de  $pgv$  data uitgezet tegen de afstand tot het hypocentrum ( $R$ ). Door deze punten is met behulp van de kleinste kwadraten-methode een rechte lijn gefit, die de relatie geeft tussen de  $\log(pgv)$  en de  $\log(R)$ . Vervolgens is aangenomen dat deze relatie de demping voor een magnitude 3.4 aardbeving weergeeft.

Op basis van deze nieuwe fit is opnieuw het aantal schadegevallen geschat; in tabel 2 wordt per afstandsklasse zowel het totale aantal huizen als het percentage huizen waarbij schade wordt voorspeld vergeleken met de schattingen waarbij geen rekening is gehouden met de voelbaarheid en vergeleken met het werkelijke totale aantal schadegevallen het werkelijke percentage schade. Uit deze vergelijking blijkt dat door rekening te houden met de voelbaarheidsgrens (op een afstand van zo'n 14km) de schatting vanaf zo'n 6 km van het epicentrum sterk kan verbeteren. Uit tabel 2 blijkt ook dat het aantal schadegevallen binnen de straal van 6 km van het epicentrum overschat wordt met een factor variërend tussen 1.1 en 4.7. Het totaal aantal voorspelde schadegevallen binnen de straal van 6 km van het epicentrum komt ongeveer een factor 2.1 hoger uit dan het aantal gemelde en terecht bevonden schadegevallen; gezien de verschillende onzekerheden (zoals bijvoorbeeld onzekerheden in het percentage van de huizen dat in slechte staat verkeert en het mogelijke verschil tussen de schade die in werkelijkheid optreedt en gemeld wordt) is dit een acceptabele schatting.



Afstand epicentrum (m)	In werkelijkheid gemeld en uitgekeerd*	Attenuation <i>zonder</i> Voelbaarheid	Attenuation <i>met</i> voelbaarheid
0-1000	31 (16%)	23 (11.4%)	33 (16.7%)
1000-2000	42 (8.6%)	39 (8.0%)	50 (10.3%)
2000-3000	44 (2.2%)	133 (6.6%)	149 (7.4%)
3000-4000	18 (2.0%)	47 (5.3%)	45 (5.1%)
4000-5000	35 (1.5%)	115 (4.9%)	108 (4.6%)
5000-6000	15 (0.6%)	110 (4.5%)	71 (2.9%)
6000-7000	0 (0%)	42 (4.3%)	3 (0.3%)
7000-8000	2 (0.1%)	36 (1.2%)	0 (0%)
8000-9000	0 (0%)	37 (0.6%)	0 (0%)
9000-10000	0 (0%)	43 (1.0%)	0 (0%)

*Tabel 2. Vergelijking van het aantal huizen dat schade ondervindt en het aantal dat wordt geschat op basis van de demping relatie van Dost (gecorrigeerd voor een factor 0.5) en een dempingrelatie waarbij rekening is gehouden met de voelbaarheid. \*het aantal huizen telt niet op tot het aantal schademeldingen van 214 gemeld in de tekst; niet van alle huizen konden de exacte x,y-coördinaten worden bepaald. Tussen haakjes staat per afstandsklasse ook het percentage (werkelijke en voorspeld) huizen dat schade ondervindt.*

### 3 Conclusies en aanbevelingen

De nieuwe dempingsfunctie van Dost et al (2004), gekalibreerd op gegevens van accelerometers en boorgatseismometers, is vergeleken met de dempingsfunctie van Campbell (1997), eerder gebruikt in de *hazardstudie* (Van Eck, 2004). De dempingsfunctie van Dost et al (2004) geeft de afname van de gemiddelde *peak ground velocity* (*pgv*) met toenemende afstand tot het hypocentrum van de beving, als functie van de magnitude van de beving. Dost et al (2004) gaat uit van een gemiddelde opslingering van een factor 2 in de bovenste 200m van de ondergrond. Voor een relatief stijve 'referentie-ondergrond' zoals aanwezig rondom Roswinkel (TNO-rapport NITG-03-186-C, 2003) geeft dit waarschijnlijk een overschatting van de *site response* – de snelheden uit de dempingsfunctie zijn voor dit onderzoek daarom gedeeld door een factor 2.

Hoewel de dempingsfunctie van Dost over het gehele afstands bereik gemiddeld een lagere *pgv* dan de dempingsfunctie van Campbell (1997) voorspeld, geven beide relaties op een afstand van 10-14 km *pgv* waarden die hoger liggen dan de 'voelbaarheidsgrens'. Dit is tegenstrijdig met de gegevens op de intensiteitskaarten, waar de voelbaarheidsgrens op een afstand van 10-14 km van het epicentrum wordt weergegeven. Wanneer de aangepaste dempingsfunctie van Dost gebruikt wordt om het aantal schadegevallen in Roswinkel te voorspellen, blijkt dat hiermee een acceptabele schatting verkregen wordt tot een straal van 7km, maar het aantal schadegevallen op grotere afstanden overschat. Een eerste toets toont dat door rekening te houden met de voelbaarheidsgrens de voorspellende waarde van de modellen op de grotere afstanden van het epicentrum sterk kan worden verbeterd. Gezien de resultaten lijkt het zinvol dat het KNMI in de toekomst ook de voelbaarheid in de kalibratie van de dempingsrelatie betreft.



## 4 Referenties

Dost, B., Van Eck, T., Haak, H., 2004. Scaling of peak ground acceleration and peak ground velocity recorded in the Netherlands. Pre-print Bolletino di Geofisica teorica ed applicata, 2004.

Van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H., Dost, B., 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI scientific report WR 2004-01.

Wassing, B.B.T., Maljers, D., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., Koopman, A., Dullemond, D., Roos, W., 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 2. TNO-rapport NITG 03-186-C.

Waarts, P.P.H., Ostendorf, C.H., 2002. SBR-deel A: Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen. Rotterdam, Stichting Bouwresearch, 2002.

Waarts, P.H., 1997. Kans op schade aan bouwwerken door trillingen. TNO rapport B90-822, 1991, revisie jan. 1993.