

**TNO-rapport**  
NITG 03-186-C

**Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen**  
**Rapportage fase 2**

Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

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

T 030 2564850  
F 030 2564855  
[info@nitg.tno.nl](mailto:info@nitg.tno.nl)

Datum	Januari 2004
Auteur(s)	B.B.T. Wassing, D. Maljers, J.H.A.Bosch, H.J.T.Weerts (TNO-NITG) A.Koopman, A.Dullemond, W.Roos (TNO-Bouw)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	31
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. BP Nederland Energie B.V. TotalNederland B.V. Wintershall Noordzee B.V.
Projectnaam	Kartering seismisch hazard geïnduceerde aardbevingen
Projectnummer	005.43025

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 onderzoeksopdrachten 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



## Samenvatting

In het kader van de per 1 januari 2003 gewijzigde Mijnbouwwet moeten per 1 januari 2004 seismische risico analyses in het winningsplan opgenomen worden. In het geval van olie- en gaswinning gaat het hierbij om geïnduceerde seismiciteit. Het consortium van partijen bestaand uit Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., BP Nederland Energie B.V., TotalNederland B.V. en Wintershall Noordzee B.V. heeft TNO opdracht verleend de gevoeligheid voor schade aan bebouwing ten gevolge van seismische activiteit als gevolg van de winning van olie en gas in kaart te brengen. Het doel van het project is het bepalen van mogelijke schade aan gebouwen door geïnduceerde seismiciteit rond op het Nederlandse vaste land in concessie zijnde olie- en gasvelden. Daarbij wordt rekening gehouden met de invloed van de ondiepe ondergrond, de zogenaamde *site response*, op het optreden van schade.

De mate waarin een seismische belasting schade kan toebrengen hangt af van:

- De sterkte en frequentie-inhoud van de seismische bron en de mate waarin de trilling gedempt wordt en van frequentie-inhoud verandert als gevolg van voortplanting vanaf de bron tot dicht onder het aardoppervlak (de zogenaamde *attenuation*).
- De *site response*. Eenmaal dicht bij het oppervlak beïnvloedt de reactie van de ondiepe lagen in sterke mate de frequentie-inhoud en de amplitude van het aardbevingssignaal.
- De aard van de constructie. Het type constructie en de staat waarin de constructie verkeert bepalen eveneens de mogelijke schade.

Op basis van modellen van het KNMI voor de seismiciteit van de verschillende gas- en olievelen en functies voor de *attenuation* van de trillingen door de ondergrond (beschreven in het rapport ‘Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes’, Van Eck et al., 2003) zijn binnen deze studie algemene *hazard zonation* kaarten gemaakt, waarop de pieksnelheden worden weergegeven behorend bij een overschrijdingskans van 10% in 1 en 10 jaar ( $T=10$ , resp.  $T=100$ ). De snelheden zijn pieksnelheden die kunnen optreden op het funderingsniveau van constructies. Uit onderzoek in fase 1 van het project is gebleken dat de lokale *site response* kan leiden tot een versterking van het signaal. Met name in gebieden waar dikkere afzettingen met lage schuifgolfsnelheden (slappe klei/veen) en afzettingen met grote stijfheidscontrasten (veen op zand) in de ondiepe ondergrond voorkomen kan een ‘opslingering’ van het signaal optreden. Deze gebieden zijn voor dit onderzoek in kaart gebracht en de pieksnelheden zijn gecorrigeerd voor het effect van de ondiepe ondergrond (*site response*) op het signaal. De *hazard zonation* kaarten geven gebieden aan waar, uitgaande van een 10% overschrijdingskans op jaar- of decade-basis ( $T=10$ , resp.  $T=100$ ), hogere of minder hoge pieksnelheden bereikt kunnen worden en geven daarmee inzicht in de lokaties waar meer of minder schade zou kunnen optreden. Omdat de bebouwingstypologie – en dichtheid boven de velden niet overal gelijk is, is in het kader van deze studie op basis van twee bij TNO aanwezige databases ook een analyse van deze aspecten uitgevoerd.

De *hazard zonation* kaart voor  $T=10$  geeft de hoogste snelheden (meer dan 40 mm/s) boven de gasvelden Roswinkel, Groningen en Annerveen Bergermeer op lokaties waar ondiep slappere lagen worden aangetroffen. Het noordelijk deel van het gebied boven het gasveld Groningen wordt gekenmerkt door een iets hogere seismische *hazard* ( $>30$ mm/s) dan het zuidelijke deel ( $>20$  mm/s). Dit kan verklaard worden uit het feit dat

in het noordelijke deel slappe holocene afzettingen aan maaiveld liggen, terwijl in het zuidelijke deel het vaste pleistocene oppervlak dicht onder maaiveld wordt aangetroffen. Bij het gasveld Roswinkel speelt de *site response* een minder duidelijke rol; hier wordt een groot deel van het gebied gekenmerkt door stijve pleistocene afzettingen aan het maaiveld. 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 de gebieden waar veenlagen dicht onder maaiveld voorkomen. Dezelfde trend wordt onderscheiden in het kaartbeeld voor T=100 (overschrijdingskans van 10% in 10 jaar). Ook hier tonen de gasvelden Roswinkel, Bergermeer, Groningen en Annerveen de hoogste seismische *hazard* (snelheden >60 mm/s). Bij deze hogere snelheden kunnen de slappe gronden de groundbeweging juist dempen.

In SBR-richtlijn 'Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen' worden grenswaarden voor de piekwaarde van de trillingsnelheid als functie van de frequentie gehanteerd, waaronder waarschijnlijk geen schade optreedt. Uit een vergelijking met de grenswaarden voor trillingen genoemd in de SBR-richtlijn blijkt dat de snelheden die direct boven en in de directe omgeving van de gasvelden voorspeld worden deze grenswaarden overschrijden.

De *hazard zonation* kaarten zijn gebaseerd op de op dit moment best beschikbare modellen voor de seismiciteit van de velden, de *attenuation* van het signaal en de *site response* (*hazard*-modellen), maar gaan gepaard met onzekerheden. De combinatie van de *hazard zonation* kaarten en de SBR-richtlijn levert geen inzicht in het totaal aantal schadegevallen en de ernst van de schade die kan optreden. Een vergelijking met het werkelijke aantal schademeldingen en de werkelijke aard van de gemelde schade is daarmee niet mogelijk. Een validatie van de gebruikte modellen (zowel *hazard*- als schademodellen) aan praktijkgegevens wordt belangrijk geacht alvorens tot een uiteindelijke seismische risico-analyse wordt overgegaan.

Aan het eind van deze fase van het project is een eerste validatie van de modellen aan de praktijk uitgevoerd. Op basis van de *attenuation* functies die aan de basis liggen van de seismische *hazard* kaarten en een door TNO-Bouw eerder afgeleide relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheid op funderingsniveau is een globale schatting gemaakt van het aantal schadegevallen bij een aardbeving met een magnitude 3.4 in Roswinkel. Hieruit blijkt dat het aantal woningen dat met de huidige *hazard*modellen en schade-relaties voorspeld wordt, met name op de grotere afstanden, veel hoger ligt dan het werkelijke aantal schademeldingen.

Er wordt aanbevolen om een uitgebreidere calibratie en validatie van de *hazard*- en schademodellen aan de hand van meerdere praktijkcases uit te voeren. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de belangrijkste onzekerheden in de verschillende stappen van de modellering. Deze calibratiefase zal leiden tot een *update*/aanpassing van de gebruikte seismische *hazard*modellen en een aan de praktijk gerelateerde relatie tussen het trillingsniveau en de aard van de schade voor geïnduceerde aardbevingen.

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>1</b>
1.1	Doelstelling van het project.....	1
1.2	Werkwijze.....	1
1.3	Achtergrondinformatie .....	2
1.4	Rapportage.....	3
<b>2</b>	<b>De ‘algemene hazard’ studie .....</b>	<b>5</b>
2.1	Interpretatie van de algemene <i>hazard zonation</i> kaarten .....	8
2.2	Onzekerheden m.b.t. de algemene seismische <i>hazard</i> analyse.....	9
<b>3</b>	<b><i>Site response</i> .....</b>	<b>11</b>
3.1	Uitgangspunten kartering site response .....	11
3.2	Werkwijze kartering site response.....	12
3.3	Resultaten kartering site response .....	14
3.4	Onzekerheden m.b.t. de <i>site response</i> .....	15
<b>4</b>	<b>Uitgangspunten voor de analyse van de gevoeligheid voor gebouwschade .....</b>	<b>17</b>
4.1	Schade aan gebouwen.....	17
4.2	Uitgangspunten .....	17
4.3	Beoordeling schade m.b.v. SBR richtlijn A .....	17
4.4	Indeling bebouwing in concessiegebieden .....	21
<b>5</b>	<b>Resultaten seismische <i>hazard</i> analyse en gevoeligheid voor schade .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>31</b>

Appendix 1. Aantal woningen per postcodegebied

Appendix 2. Algemene *hazard zonation* kaarten

Appendix 3. Site response kaart

Appendix 4. *Hazard zonation* kaarten (gecorrigeerd voor site response)

(Appendices bijgeleverd op CD)



# 1 Inleiding

In het kader van de per 1 januari 2003 gewijzigde Mijnbouwwet moeten per 1 januari 2004 seismische risico analyses in het winningsplan opgenomen worden. In het geval van olie- en gaswinning gaat het hierbij om geïnduceerde seismiciteit. Het consortium van partijen bestaand uit Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., BP Nederland Energie B.V., TotalNederland B.V. en Wintershall Noordzee B.V. heeft TNO-NITG opdracht verleend de gevoeligheid voor schade aan bebouwing ten gevolge van seismische activiteit als gevolg van de winning van olie en gas in kaart te brengen. TNO-Bouw heeft opgetreden als onderaannemer in het project en haar expertise op het gebied van schade aan bebouwing ingebracht. Het KNMI heeft adviezen gegeven en heeft de algemene seismische *hazard* analyse voor de olie- en gasvelden uitgevoerd. TNO-NITG heeft haar expertise op het gebied van het mechanisch gedrag van de ondergrond ingebracht en de projectleiding gevoerd.

## 1.1 Doelstelling van het project

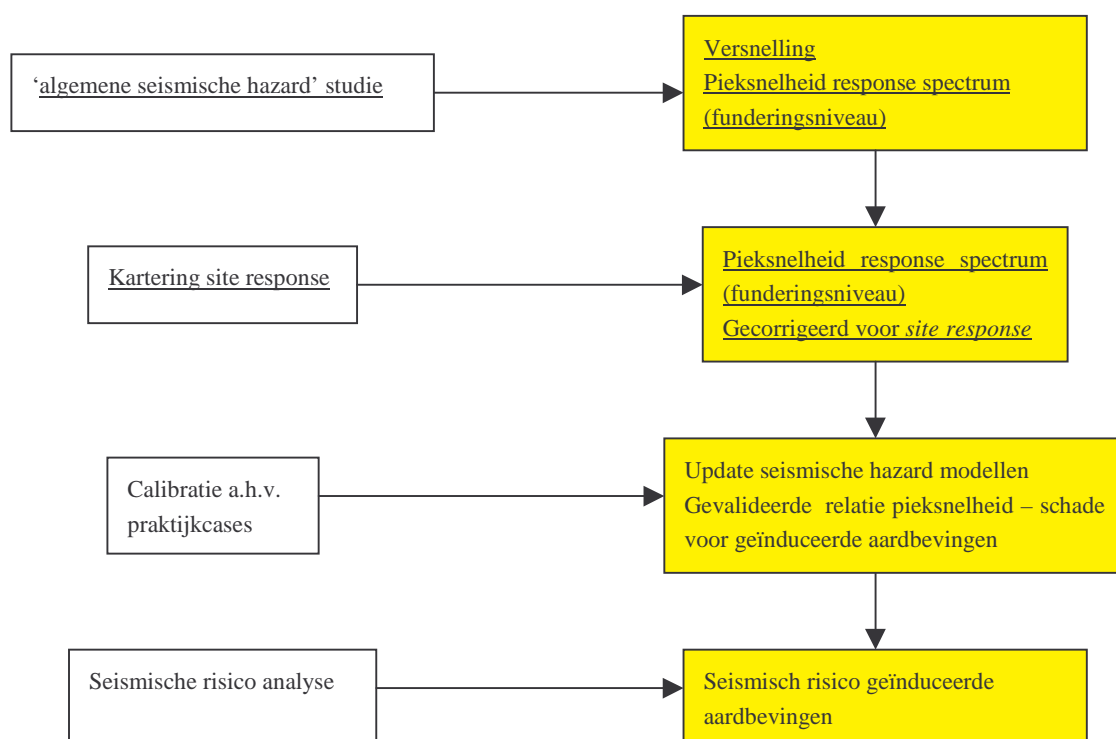
Het doel van het project is het bepalen van mogelijke schade aan gebouwen door geïnduceerde seismiciteit rond op het Nederlandse vaste land in concessie zijnde olie- en gasvelden. Daarbij wordt rekening gehouden met de invloed van de ondiepe ondergrond, de zogenaamde *site response*, op het optreden van schade. De mogelijke schade aan bebouwing wordt bepaald op basis van de op dit moment best beschikbare kennis en techniek op het gebied van Seismisch Risico Analyse (SRA) voor geïnduceerde aardbevingen.

## 1.2 Werkwijze

Het project is opgesplitst in meerdere fasen (zie ook figuur 1). In fase 1 is onderzocht welke methode het best gebruikt kan worden om de seismische *hazard* in kaart te brengen. Daarnaast is in fase 1 een veldonderzoek uitgevoerd om de dynamische eigenschappen van de afzettingen in het onderzoeksgebied te karakteriseren. De resultaten van fase 1 zijn beschreven in TNO-rapport NITG 03-185-C ‘ Seismisch *hazard* van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase1.’ In fase 2 van het project is de *site response* in kaart gebracht en de seismische *hazard* analyse uitgevoerd; het resultaat van de fase 2 is een voor de *site response* gecorrigeerde *hazard zonation* kaart waarop de pieksnelheden op funderingsniveau zijn weergegeven. De pieksnelheden op de *hazard zonation* kaart zijn vergeleken met de grenswaarden voor verschillende typen bebouwing die genoemd worden in de SBR-richtlijn ‘Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen’. Uitgangspunt hierbij is dat wanneer de voorspelde pieksnelheden de SBR-grenswaarden overschrijden er een kans bestaat op schade aan bebouwing. De combinatie van de *hazard zonation* kaarten en de SBR-richtlijn levert geen inzicht in het totaal aantal schadegevallen en de ernst van de schade die kan optreden. Een vergelijking met het werkelijke aantal schademeldingen en de werkelijke aard van de gemelde schade is daarmee niet mogelijk. Een dergelijke validatie van de gebruikte modellen (zowel *hazard*- als schademodelen) aan praktijkgegevens wordt belangrijk geacht alvorens tot een uiteindelijke seismische risico-analyse wordt overgegaan.

Aan het eind van fase 2 is daarom ook een eerste validatie van de *hazard*- en schademodellen aan de praktijk uitgevoerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de *case* Roswinkel 1997,  $M=3.4$ . Met behulp van de modellen die aan de basis liggen van de seismische *hazard* analyse en een door TNO-Bouw eerder afgeleide relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheid op funderingsniveau (Waarts, 1997) is een voorspelling gemaakt van het aantal schadegevallen bij een aardbeving met een magnitude 3.4. Deze voorspelling is vergeleken met het werkelijke aantal schademeldingen. Op basis van deze eerste validatie wordt geconcludeerd dat, alvorens wordt overgegaan tot een seismische risico analyse, een uitgebreide validatie van de modellen aan de hand van meerdere praktijkcases noodzakelijk is; mede om inzicht te krijgen in de aard en ernst van de schade die kan optreden. Deze calibratiefase zal worden uitgevoerd in fase 3 en leiden tot een update/aanpassing van de gebruikte seismische hazardmodellen en een aan de praktijk gerelateerde relatie tussen het trillingsniveau en de aard van de schade voor geïnduceerde aardbevingen. Op basis van de resultaten van fase 3 kan de uiteindelijke seismische risico-analyse worden uitgevoerd.

Dit rapport beschrijft de resultaten van fase 2 van het onderzoek.



*Figuur 1. Overzicht werkwijze (onderlijning geeft aan welke onderdelen van het onderzoek in fase 1 en fase 2 reeds zijn uitgevoerd).*

### 1.3 Achtergrondinformatie

De mate waarin een seismische belasting schade kan toebrengen hangt af van:



1. De sterkte en frequentie-inhoud van de seismische bron en de mate waarin de trilling gedempt wordt en van frequentie-inhoud verandert als gevolg van voortplanting vanaf de bron tot dicht onder het aardoppervlak (de zogenaamde *attenuation*).
2. De *site response*. Eenmaal dicht bij het oppervlak beïnvloedt de reactie van de ondiepe lagen in sterke mate de frequentie-inhoud en de amplitude van het aardbevingssignaal. Deze invloed/reactie van de ondiepe ondergrond op het signaal wordt het *site effect*/de *site response* genoemd.
3. De aard van de constructie. Het type constructie en de staat waarin de constructie verkeert bepalen eveneens de mogelijke schade.

De maximaal te verwachten magnitude van de aardbeving, de algemene karakteristieken van het signaal (frequentie-inhoud, tijdsduur) en de inschatting van de *attenuation* van het signaal zijn vastgelegd in de 'algemene' seismische *hazard* studie. Deze 'algemene' *hazard* studie is uitgevoerd door het KNMI. De resultaten van de algemene *hazard* studie vormen een belangrijk onderdeel voor de verdere analyse van de mogelijke schade die kan optreden aan bebouwing ten gevolge van geïnduceerde seismiciteit. Een uitgebreide beschrijving van de algemene *hazard* studie wordt gegeven in het KNMI rapport 'Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes', Van Eck et al., 2003.

In de algemene *hazard* analyse is nog geen rekening gehouden met de variaties in lokale *site response*. In fase 2 van dit project is de *site response* van de verschillende afzettingen boven en rondom de olie- en gasvelden in kaart gebracht.

Op basis van de resultaten van de algemene *hazard* analyse en de *site response* zijn *hazard zonation* kaarten opgesteld die aangeven waar, welke seismische belasting kan optreden in het onderzoeksgebied. Aan de hand van de geschatte seismische belasting kan voor verschillende typen woningen de kwetsbaarheid worden onderzocht.

## 1.4 Rapportage

In hoofdstuk 2 van dit rapport worden de resultaten van de algemene *hazard* studie van het KNMI kort samengevat. De resultaten van de kartering van de *site response* worden gepresenteerd in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt beschreven welke uitgangspunten bij de eerste analyse van de schadegevoeligheid zijn gehanteerd en wordt tevens een toelichting gegeven op de beoordeling van schade aan de hand van de SBR-richtlijn en de indeling van de gebouwen naar type in de concessiegebieden.

De resultaten van de seismische *hazard* studie, de analyse van de schadegevoeligheid op basis van de SBR-richtlijn en de eerste validatie van de gebruikte hazard- en schade modellen worden gepresenteerd in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 volgen de belangrijkste conclusies van fase 2 van het onderzoek en worden aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan.



## 2 De ‘algemene *hazard*’ studie

De waarden voor de ‘algemene seismische *hazard*’ zijn verkregen op basis van een probabilistische seismische *hazard* analyse (PSHA) die is uitgevoerd door het KNMI (Van Eck, 2003). In de PSHA wordt op basis van aannames van seismiciteitsmodellen en de distributie ervan de kans berekend dat een bepaalde groundbeweging (uitgedrukt in pga of pgv) op een specifieke lokatie wordt overschreden. Onder ‘seismic *hazard*’ wordt dus de kans verstaan dat op een specifieke lokatie een bepaalde waarde van de groundbeweging wordt overschreden. Een uitgebreide toelichting op de voor dit project uitgevoerde seismische *hazard* studie wordt gegeven in het KNMI rapport ‘Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes’, Van Eck et al, 2003. Hier wordt volstaan met een korte toelichting.

In de PSHA wordt aangenomen dat de aardbevingen *random* verdeeld over een specifieke seismische zone kunnen optreden. In het onderzoek van het KNMI is uitgegaan van een uniforme verdeling van de seismiciteit (op een diepte van ca 2.5km) over het oppervlak van een gasveld. Voor de *attenuation* (de demping van de groundbeweging tussen de bron en de lokatie) is gebruik gemaakt van de (empirische) *attenuation* relaties van Campbell (1997). In het algemeen geldt voor deze *attenuation* relaties dat zij zowel het effect van de ‘algemene’ *attenuation* in de diepere ondergrond als een (gemiddeld) ondiep *site* effect omvatten. Er wordt bij het bepalen van de *attenuation* functies echter zoveel mogelijk getracht de invloed van de specifieke *site response* te beperken. Dit houdt in dat in het algemeen lokaties met een sterke *site response*, dat wil zeggen lokaties met een slappe ondergrond of met scherpe contrasten in seismische snelheden in de ondergrond zoveel mogelijk buiten beschouwing worden gelaten. De *attenuation* functies geven hiermee een beschrijving van de groundbeweging in een relatief vaste ondergrond; voor lokaties met een slappe ondergrond en scherpe contrasten in snelheden moet nog rekening gehouden worden met het effect van de *site response* (zie ook hoofdstuk 3).

Van Eck (2003) onderscheidt in de seismische *hazard* analyse twee gevallen. Het eerste geval omvat de gasvelden waarbij in het verleden slechts zeer weinig of geen seismiciteit is waargenomen. Voor deze velden is uitgegaan van een seismiciteitsmodel waarbij geïnduceerde aardbevingen optreden als een stationair proces *random* verdeeld over een gebied met een geprojecteerd oppervlakte gelijk aan de oppervlakte van alle gasvelden samen in Noord-Nederland (Van Eck et al., 2003). Hierbij wordt aangenomen dat de frequentie-magnitude relatie die is afgeleid uit de tot nu toe waargenomen seismiciteit representatief is voor de seismiciteit die in de toekomst zal optreden. Op basis van deze aanname is voor de velden in Noord-Nederland een model opgesteld voor een zogenaamd ‘hypothetisch veld’. Het tweede geval omvat de velden waarbij men wel beschikt over een *record* van waargenomen seismiciteit. Voor deze velden zijn de seismiciteitsmodellen gebaseerd op de lokale informatie over de seismiciteit van dit veld uit het verleden. Dit geldt voor de gasvelden Roswinkel, Bergermeer en Groningen (Van Eck, 2003).

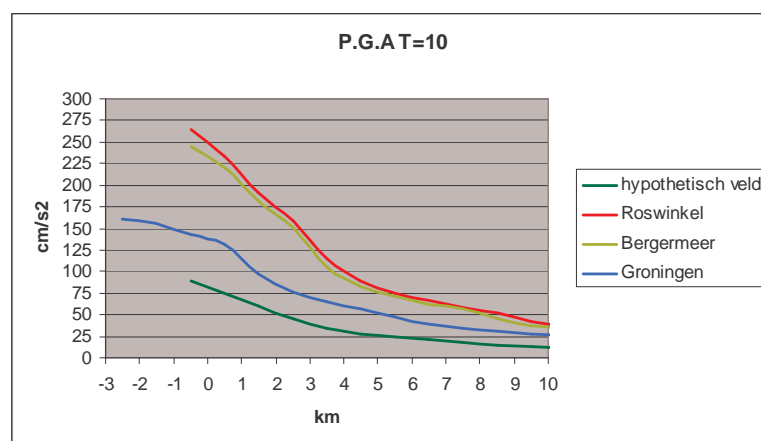
Voor een uitgebreide beschrijving van de algemene *hazard* studie en een onderbouwing van de modellen wordt verwezen naar Van Eck, 2003 .

De seismische *hazard* is berekend voor een overschrijdingskans van 10% in 1 jaar en een 10% overschrijdingskans in 10 jaar ( $T=10$ , resp.  $T=100$ ) voor een specifieke lokatie en wordt gegeven in de volgende parameters:

- de piekversnelling (pga in  $\text{cm/s}^2$ );
- de pieksnelheid van het response spectrum ( $V_{\max}$  in mm/s), bij 5% damping;
- de pieksnelheid van het response spectrum ( $V_{\max}$  in mm/s), bij 50% damping.

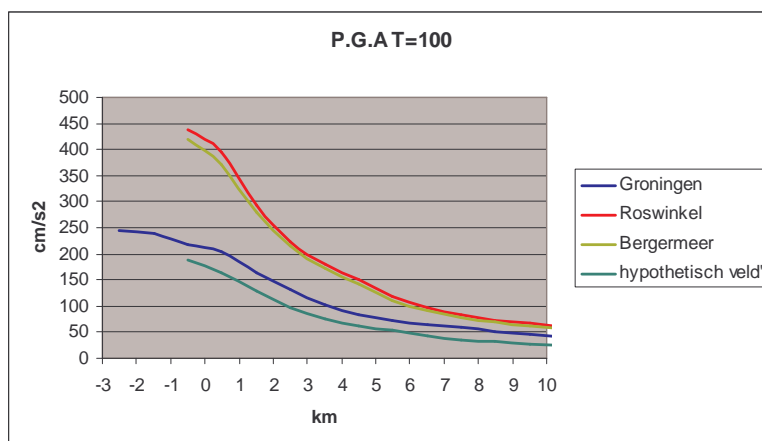
Naast de piekversnelling (pga) wordt de maximale respons van een één-massa-veersysteem met 5%, resp. 50% damping op de groundbeweging gegeven (bij een frequentie van 10Hz – de dominante frequentie van de aardbeving). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat een constructie kan worden gemodelleerd als een één-massa-veersysteem met visceuze damping. De maximale respons kan worden weergegeven als een maximale verplaatsing, snelheid of versnelling. De maximale respons is een maat voor de verplaatsing, snelheid of versnelling die op zal treden in een constructie met een vergelijkbare eigenfrequentie of natuurlijke periode als het massa-veer-systeem. Om een vergelijking met de grenswaarden genoemd in de SBR-richtlijn (zie hoofdstuk 4) mogelijk te maken wordt gebruik gemaakt van de topwaarde van de trillingssnelheid (mm/s). De berekende respons bij een dampingsmaat van 50% is van toepassing op de trillingen van de bouwconstructie als geheel en is te beschouwen als de trillingssterkte die op funderingsniveau in de bouwconstructie zou zijn opgetreden (Van Staalduinen & Geurts, 1998).

Eerder is genoemd dat de *attenuation* functies de groundbeweging in een ‘gemiddelde’ relatief vaste ondergrond beschrijven. Voor deze studie wordt aangenomen dat dit type ondergrond qua schuifgolfsnelheden overeenkomt met een vaste pleistocene of vaste zandige ondergrond in het onderzoeksgebied. De snelheden voor het massa-veer systeem zijn daarmee ook snelheden die gelden voor de respons van een constructie op bewegingen in een vaste ondergrond. Deze vaste ondergrond wordt in het vervolg van het rapport als de ‘referentie-ondergrond’ beschouwd.

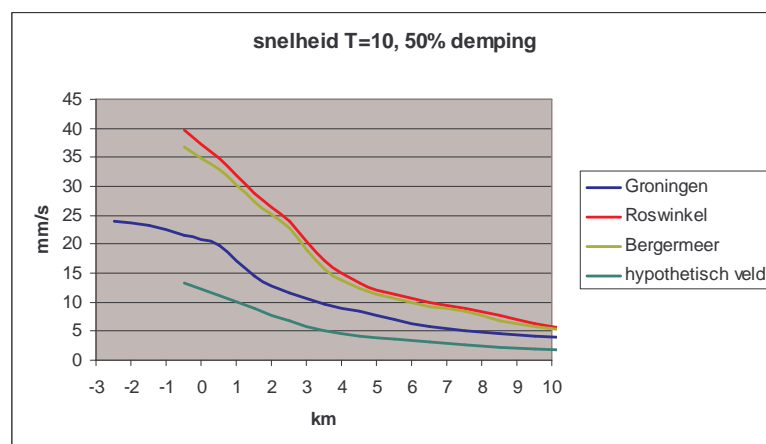


Figuur 1a. Piekversnelling ( $\text{cm/s}^2$ ) voor Roswinkel, Bergermeer, Groningen en een hypothetisch veld.  $T=10$ . Op de horizontale as is de afstand tot de rand van het veld weergegeven; de rand van het gasveld ligt op 0 km; een negatieve afstand betekent dat de lokatie binnen de grenzen van het gasveld ligt.

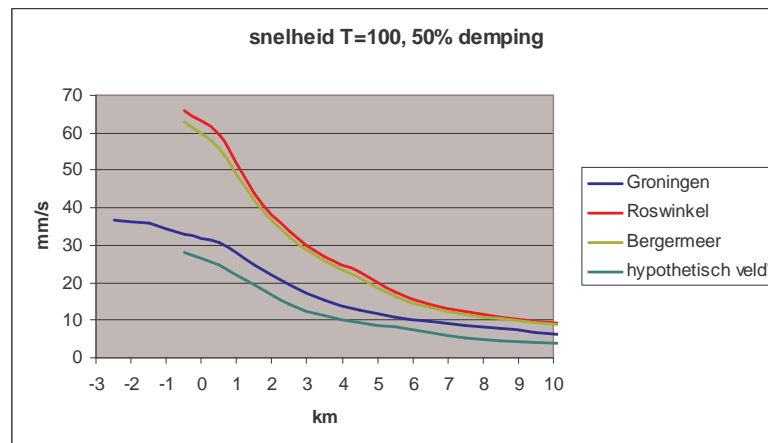
In de grafieken van figuur 1 wordt op basis van de studie van het KNMI (Van Eck, 2003) voor de 4 onderscheiden *hazard*-modellen (het hypothetische veld, Roswinkel, Groningen en Bergermeer) de afname van de waarden met een toenemende afstand tot het gasveld getoond. De grafieken in figuur 1a tot en met 1d tonen de waarden bij een overschrijdingskans van 10% per 1 jaar ( $T=10$ ) en een overschrijdingskans van 10% per 10 jaar ( $T=100$ ).



Figuur 1b. Piekversnelling ( $\text{cm/s}^2$ ) voor Roswinkel, Bergermeer, Groningen en een hypothetisch veld.  $T=100$ .



Figuur 1c. Pieknelheid voor het response spectrum, 50% demping, voor Roswinkel, Bergermeer, Groningen en een hypothetisch veld.  $T=10$ .



Figuur 1d. Pieksnelheid voor het response spectrum, 50% damping, voor Roswinkel, Bergermeer, Groningen en een hypothetisch veld.  $T=100$ .

In bijlage 2A tot en met D zijn de kaarten op basis van de resultaten van de studie van het KNMI met daarop de versnellingen voor de referentie-grond en de snelheden bij 50% damping van het massa-veer systeem voor de verschillende gasvelden toegevoegd. Deze versnellingen en snelheden gelden voor de referentie-grondklasse; op de lokaties waar slappe grond wordt aangetroffen dient nog rekening gehouden te worden met het effect van de *site response*. Voor de gasvelden Roswinkel, Groningen en Bergermeer zijn de lokale seismiciteitsmodellen toegepast. Voor een deel van de overige velden waar in het verleden weinig tot geen seismiciteit is waargenomen is het model voor het 'hypothetisch' veld toegepast. In een algemene studie op basis van confidentiële exploratie data leggen Van Eijs en Scheffers (2003) een verband tussen de formatie waaruit gewonnen wordt en het tot nu toe wel of niet optreden van seismiciteit. Uit deze studie blijkt dat bij winning uit formaties die niet tot het Perm en Carboon behoren, met uitzondering van het gasveld Roswinkel, tot nu toe geen geïnduceerde seismiciteit is opgetreden. Voor deze gasvelden is geen kwantitatieve analyse uitgevoerd.

## 2.1 Interpretatie van de algemene *hazard zonation* kaarten

De *hazard zonation* kaarten in bijlagen 2A en 2B geven de pieksnelheid van het responspectrum weer waarvoor een 10% overschrijdingskans bestaat op jaarbasis (kaart 2A) of per decade (kaart 2B). Anders gezegd: De kaarten geven per lokatie de pieksnelheid van het responspectrum weer waarvoor op jaarbasis (kaart 2A) of per decade (kaart 2B) een kans van 90% bestaat dat deze niet overschreden wordt. Omdat tevoren niet bekend is waar een geïnduceerde aardbeving plaatsvindt is er uitgegaan van een uniforme seismiciteit van het veld. De *hazard zonation* kaart geeft daarmee inzicht in de gemiddelde overschrijdingskans per lokatie. De kans dat op alle lokaties boven het

gehele veld de pieksnelheden zoals op de kaarten 2A en 2B zijn weergegeven overschreden worden is veel kleiner dan de 10% overschrijdingskans op respectievelijk jaar- en decade-basis. Kaart 2A en 2B geven zodoende gebieden aan waar, uitgaande van een 10% overschrijdingskans op jaar- of decade-basis, hogere of minder hoge pieksnelheden bereikt kunnen worden en geven daarmee inzicht in de lokaties waar, gegeven deze overschrijdingskans, meer of minder schade zou kunnen optreden, uitgaande van een gelijke bebouwingstypologie en –dichtheid. Omdat de bebouwingstypologie – en dichtheid boven een veld niet overal gelijk is, is in het kader van deze studie ook een analyse van deze aspecten uitgevoerd. In hoofdstuk 4 wordt hier nader op ingegaan.

## 2.2 Onzekerheden m.b.t. de algemene seismische *hazard* analyse

Geïnduceerde aardbevingen zijn relatief licht en vinden plaats op een geringe diepte. In het verleden zijn met name seismische *hazard* analyses uitgevoerd voor natuurlijke, zware aardbevingen op grotere dieptes; er is weinig bekend over de seismische *hazard* van geïnduceerde seismiciteit. Deze *hazard* studie is hiermee nieuw en gaat gepaard met grote onzekerheden. Van Eck et al. (2003) gaan in hun *hazard* studie uitgebreid in op de verschillende onzekerheden die geïntroduceerd worden door de aannames en modellen waarop de *hazard* analyse gebaseerd is. Als belangrijkste bron van onzekerheden noemen zij:

- de aanname van een stationaire seismiciteit;
- de aanname van een vereenvoudigd model waarin wordt uitgegaan van een uniforme ruimtelijke en Poisson temporele distributie voor het ‘hypothetisch veld’;
- het ontbreken van voldoende metingen om de *attenuation* relaties te staven;
- de onzekerheden in de maximale magnitude die kan optreden;
- de aanname van een uniforme seismiciteit over het geprojecteerde oppervlak van een gasveld.

Van bovengenoemde factoren leidt met name de onzekerheid in de *attenuation* relaties tot grote onzekerheden in de uitkomsten van de seismische *hazard* analyse (Van Eck, 2003). Momenteel wordt aangenomen dat de *hazard* slechts tot een afstand van ongeveer 10km van de rand van het gasveld op reële wijze kan worden geschat. Dit hangt samen met het feit dat de geïnduceerde bevingen een gemiddelde diepte hebben van 2.5km (Van Eck, 2003).





### 3 Site response

#### 3.1 Uitgangspunten kartering site response

Uit wereldwijde registraties van aardbevingen die in het verleden hebben plaatsgevonden en waarnemingen van de schade die door deze aardbevingen is veroorzaakt blijkt dat er een duidelijke relatie bestaat tussen het risico op schade en de samenstelling van de ondiepere ondergrond (Idriss, 1990). Afhankelijk van de aard van het aardbevingssignaal en de lokale samenstelling van de ondiepe ondergrond kan er een amplificatie van de beweging van de grond optreden, een verschuiving van de dominante frequenties in het signaal plaatsvinden en kunnen bepaalde frequenties in het signaal sterk worden gedempt. De lokale reactie van de ondiepe ondergrond op het aardbevingssignaal wordt de *site response* genoemd. Door de laterale afwisseling van afzettingen in de ondiepe ondergrond kan de *site response* variëren.

Uit literatuuronderzoek blijkt dat de *site response* in sterke mate afhangt van de schuifgolfsnelheid in de bovenste tientallen meters van de ondergrond. Diverse normen gebruiken een klassificatie van de ondergrond op basis van schuifgolfsnelheid om de gemiddelde *site response* te karakteriseren. Op basis van een literatuurstudie en de resultaten van de modellering van de *site response* is in fase 1 van het onderzoek geconcludeerd dat de methode en klassificatie die wordt beschreven door Borchardt (1994, 2002) goed toepasbaar is voor de kartering van de *site response* voor dit project. Deze klassificatie is voor dit project in gewijzigde vorm gebruikt om de *site response* in kaart te brengen. Een onderbouwing van de keuze voor de methode en klassificatie wordt gegeven in TNO rapport NITG 03-185-C, 2003.

Op basis van de gemiddelde schuifgolfsnelheid van de afzettingen in de bovenste 30m ( $V_{s,30}$ ) wordt de ondergrond ingedeeld in twee klassen, nl. de klassen ‘slappe grond’ en ‘stijve grond’. In tabel 1 wordt weergegeven door welke  $V_{s,30}$  deze klassen worden gekenmerkt. Daarnaast wordt op grond van lithologische kenmerken en dikte-criteria een extra klasse onderscheiden, nl. de klasse ‘special study soils’. Deze klasse omvat veenlagen dikker dan 3m en slappe veenlagen gelegen op een stijve (zandige of pleistocene) ondergrond met een dikte van 1-3m (zie tabel 1).

Tabel 1. Overzicht ondergrondklassen site response en amplificatiefactoren, afhankelijk van de versnelling.

Klasse	$V_{s,30}$ (m/s)	Overige Criteria	Factor 0.1g	factor 0.2g	factor 0.3g	factor 0.4g
‘slappe grond (SC-IV)’	<200	(Dikte >3m)	1.5	1.3	1.1	0.9
‘stijve grond (SC-III)’	200 –375	(Dikte >5m)	1	1	1	1
‘special study soil’	-	Slappe veenlagen >3m Veenlagen 1-3m dik op vaste ondergrond (zand/pleistocene)	2	2	2	2

Een belangrijk uitgangspunt van deze studie is de aanname dat de versnellingen en snelheden, die berekend zijn in de ‘algemene’ *hazard* studie van het KNMI representatief zijn voor de groundbeweging in een ‘gemiddelde’ vaste ondergrond aan maaiveld. Dit betekent dat in de klasse ‘stijve grond’ geen rekening wordt gehouden met een extra amplificatie van het signaal door de *site response*. Voor deze klasse wordt dus per definitie als amplificatiefactor een factor 1 aangehouden. Voor de overige twee grondklassen ‘slappe grond’ en ‘special study soils’ wordt de *site response* gekarakteriseerd door amplificatiefactoren; deze amplificatiefactoren zijn een maat voor de amplificatie van de groundbeweging ten opzichte van een referentie-lokatie met een vaste, stijve grond aan maaiveld. De amplificatiefactoren zijn afhankelijk van de amplitude van de groundbeweging (zoals deze in de algemene *hazard* studie bepaald is voor de vaste referentieklassse). De amplificatiefactoren nemen af bij een toenemende deformatie (piekversnelling); op deze wijze wordt rekening gehouden met het optreden van niet-lineair grondgedrag (d.w.z. de afname van de schuifmodulus en de toename van de demping met een toenemende schuifdeformatie).

Uit de literatuurstudie naar de *site response* en de modellering daarvan op diverse lokaties in het onderzoeksgebied blijkt dat de deze op verschillende lokaties sterk kan verschillen. De amplificatiefactoren in tabel 1 geven een gemiddelde respons voor ‘vergelijkbare’ lokaties. Door de respons van een groep lokaties te middelen wordt voorbijgegaan aan het feit dat elke lokatie een specifieke respons op de groundbeweging vertoont. Deze benadering kan zowel een onderschatting als een overschatting geven van de respons die in werkelijkheid optreedt. De bovengenoemde amplificatiefactoren dienen beschouwd te worden als een gemiddelde respons voor die specifieke ondergrondklasse. Op deze wijze is het, ondanks de sterke variatie in afzettingen in de ondiepe ondergrond, toch mogelijk de respons in het onderzoeksgebied in kaart te brengen. Het kaartbeeld van de site response geeft daarmee een regionaal overzicht van de ligging van gebieden die in meer of mindere mate gevoelig zijn voor opslingering van het aardbevingssignaal in de ondiepe ondergrond. De amplificatiefactoren zijn gedurende het vervolg van de analyse op deterministische wijze in rekening gebracht.

### 3.2 Werkwijze kartering site response

Tabel 2 geeft een overzicht van de verschillende afzettingen die binnen een diepte van 30m –mv in het onderzoeksgebied worden aangetroffen. Een uitgebreide beschrijving van de verschillende afzettingen wordt gegeven in TNO-rapport NITG 03-185-C.

Tijdens veldonderzoek in fase 1 van dit project zijn de schuifgolfsnelheden van de verschillende afzettingen bepaald. De schuifgolfsnelheid is o.a. sterk afhankelijk van de grondspanning en daarmee van de diepte waarop een afzetting wordt aangetroffen. Om een vergelijking van schuifgolfsnelheden van verschillende formaties op verschillende diepteniveaus mogelijk te maken en om een uitspraak te kunnen doen over de schuifgolfsnelheid op een andere diepte dan gemeten, kan een dieptecorrectie toegepast worden (zie TNO rapport NITG 03-185-C). Tabel 2 geeft voor elke formatie in het onderzoeksgebied de schuifgolfsnelheid op 10m diepte. Deze waarde moet beschouwd worden als een indicatieve waarde voor de schuifgolfsnelheid op deze diepte. Binnen de tijdsduur van dit project is het niet mogelijk geweest een uitgebreid overzicht te krijgen van de spreiding van de schuifgolfsnelheden in elke formatie. De indicatieve waarden kunnen gebruikt worden om er een gemiddeld beeld van de *site response* uit af te leiden.

Met behulp van de snelheden voor de verschillende afzettingen per diepte-interval kan voor elke willekeurige opbouw van de ondergrond een gemiddelde schuifgolfsnelheid van de bovenste 30m berekend worden. Deze gemiddelde snelheid  $V_{s,30}$  wordt berekend met behulp van de volgende formule:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum \left( \frac{h_i}{V_{s,i}} \right)}$$

Met  $h_i$  – de dikte van de  $i^{\text{de}}$  laag en  $V_{s,i}$  de schuifgolfsnelheid van de  $i^{\text{de}}$  laag.

Op deze wijze kan voor elke boring in de DINO (Data en Informatie Nederlandse Ondergrond) database (mits deze boring een diepte van 30m bereikt) een  $V_{s,30}$  berekend worden.

*Tabel 2. Overzicht van formaties (en hoofdlithologie) in het onderzoeksgebied en indicatieve waarden schuifgolfsnelheid omgerekend naar een diepte van 10m –mv.*

	<b>Formatie/lithologie</b>	<b>Schuifgolfsnelheid (10m)</b>
Holoceen	Nieuwkoop veen	85 m/s
	Naaldwijk zand	205 m/s
	Naaldwijk klei	150 m/s
	Naaldwijk klei van Bergen	175 m/s
	Echteld zand	225 m/s
	Echteld klei	130 m/s
Pleistoceen	Boxtel zand	255 m/s
	Boxtel leem	180 m/s
	Boxtel Drachten	355 m/s
	Kreftenheye zand	220 m/s
	Kreftenheye Zutphen	100 m/s
	Eem zand	160 m/s
	Eem klei	165 m/s
	Drente Schaarsbergen	205 m/s
	Drente Gieten	205 m/s
	Urk zand	250 m/s
	Urk klei	190 m/s
	Peelo zand	220 m/s
	Peelo klei	195 m/s
	Sterksel zand	180 m/s
	Waalre klei	170 m/s
	Waalre zand	180 m/s
	Stramproy klei	170 m/s
	Stramproy zand	290 m/s
Tertiair	Breda klei	205 m/s

#### *Kartering pleistocene gebieden*

In het algemeen geldt dat, wanneer er op een lokatie pleistocene afzettingen aan maaiveld liggen (en er dus binnen 30m –mv alleen pleistocene en oudere formaties voorkomen), de gemiddelde schuifgolfsnelheid van deze afzettingen in de bovenste 30m hoger ligt dan 200 m/s. Uitzondering hierop vormen die gebieden waar dikke afzettingen van het Laagpakket van Zutphen (Formatie van Kreftenheye) en dikke afzettingen van de Eem Formatie worden aangetroffen. De gebieden met pleistoceen aan maaiveld kunnen in het algemeen, met uitzondering van de bovengenoemde gebieden, worden ingedeeld in klasse III. Voor het grootste gedeelte van het pleistocene gebied wordt dan ook geen extra amplificatie door de *site response* verwacht.

In de pleistocene gebieden waar wel afzettingen van het Laagpakket van Zutphen of afzettingen van de Eem Formatie worden aangetroffen, is per boring de  $V_{s,30}$  berekend. Op basis van de  $V_{s,30}$  is de ondergrond ter plaatse van de boorlokatie in de klasse ‘slappe grond’ of de klasse ‘stijve grond’ ingedeeld. Vervolgens is in deze gebieden per rastercel van 500\*500m bepaald wat de meest voorkomende klasse in de cel is. Aan de cel van 500\*500m wordt vervolgens die klasse toegekend.

#### *Kartering holocene gebieden*

In de gebieden waar holocene afzettingen aan het maaiveld worden aangetroffen is de kartering grotendeels uitgevoerd op basis van de boringen in de DINO-database van TNO-NITG. Met behulp van de indicatieve waarden van de schuifgolfsnelheden per meter diepte-interval is per boring de  $V_{s,30}$  berekend. Daarbij is zowel gebruik gemaakt van boringen met een diepte van 30m en meer, als van boringen met een geringere diepte die de top van het Pleistoceen bereiken. In het laatste geval is aangenomen dat het ontbrekende interval bestaat uit pleistocene afzettingen en is gerekend met een gemiddelde snelheid voor het Pleistoceen. Op basis van de  $V_{s,30}$  is de ondergrond ter plaatse van de boorlokatie in de klasse ‘slappe grond’ of de klasse ‘stijve grond’ ingedeeld. Vervolgens is in deze gebieden per rastercel van 500\*500m bepaald wat de meest voorkomende klasse in de cel is. De cel van 500\*500m krijgt vervolgens die klasse toegekend.

Na deze analyse is de klasse ‘special study soils’ gekarteerd. Hierbij is gezocht in de DINO-database naar boringen waar meer dan 3m veen (in de bovenste 5m beneden het maaiveld) of 1-3m veen op een stijve ondergrond wordt aangetroffen. Rastercellen waarvan de meerderheid van de boringen in de klasse ‘special study soils’ valt krijgen het label ‘special study soil’ toegekend.

In de gebieden waar boringen van voldoende kwaliteit of diepte in DINO ontbreken is de ondergrond op basis van de informatie in nabijgelegen rastercellen en aanvullende regionaal geologische kennis over het verbreidingsgebied van de verschillende geologische afzettingen ingedeeld in een ondergrondklasse.

### **3.3 Resultaten kartering site response**

In bijlage 3 is de kaart met de verschillende ondergrondklassen toegevoegd. In uitgestrekte gebieden in het oosten van het land, in de provincies Overijssel, Drenthe en het zuidoosten van de Provincie Groningen en het zuidelijk deel van Friesland liggen de pleistocene afzettingen aan of zeer dicht onder het oppervlak. Deze gebieden vallen in de klasse ‘stijve ondergrond’; hier wordt (gemiddeld gezien) weinig opslingering

verwacht. Ook in het noordelijk deel van West-Brabant, ten zuiden van de grote rivieren, wordt weinig opslingering verwacht. In het westen wordt een relatief vaste, stijve zandondergrond aangetroffen in het duin- en strandwallengebied en rondom de (voormalige) grote riviergeulen. In de noordelijke punt van de Wieringermeer ligt een stuwwal in de ondergrond; hier wordt onder meer de pleistocene vaste keileem dicht onder het maaiveld aangetroffen.

De klasse 'slappe ondergrond (IV)' wordt o.a. aangetroffen in uitgestrekte gebieden achter de duin- en strandwallen in de provincies Zuid- en Noord-Holland en in de kuststrook van Friesland en Groningen. Deze gebieden zijn gedurende het Holocene marien beïnvloed; hier worden vanaf maaiveld dikke pakketten weinig geconsolideerde mariene kleien, kleihoudende zanden en dunnere veenlagen aangetroffen. Ook de mariene getijdegeulen zijn gekarteerd als 'slappe grond', omdat in deze geulen zandige afzettingen voorkomen die overwegend kleihoudend zijn. Ook hier wordt nog een amplificatie van het signaal verwacht. Verder wordt de klasse 'slappe grond' aangetroffen in het noordwesten van Overijssel; hier worden dikke afzettingen van het Laagpakket van Zutphen (Formatie van Kreftenheye) in de ondergrond aangetroffen. Ook het rivierengebied, waar over uitgestrekte gebieden slappe (kom)kleien van de Formatie van Echteld voorkomen, wordt grotendeels geklassificeerd als 'slappe grond'.

De klasse 'special study soil' wordt gevonden in de veengebieden van Zuid-Holland en Noord-Holland, direct ten noorden van Amsterdam. Hier worden dicht onder maaiveld relatief dikke veenlagen aangetroffen (>3m dikte). Dunnere veenlagen (1-3m dik) direct op vaste afzettingen worden o.a. op enkele lokaties in de strandvlaktes en het duingebied in de kuststrook van Zuid-Holland aangetroffen. Ook langs de rand van het 'pleistocene gebied' in de provincies Friesland en Groningen worden over uitgestrekte gebieden veenlagen direct op vaste pleistocene afzettingen aangetroffen. Lokaal komen in het voormalige Hunzedal 'special study soils' voor. Voor de overige pleistocene gebieden geldt dat ook hier zeer lokaal slappe veenlagen voorkomen; deze zeer lokale voorkomens zijn op basis van de boorgegevens in DINO niet in kaart te brengen.

### 3.4 Onzekerheden m.b.t. de *site response*

In hoofdstuk 2 zijn een aantal factoren genoemd die leiden tot onzekerheden in de schattingen van de algemene seismische *hazard* uitkomsten. Ook de schatting van de *site response* gaat gepaard met onzekerheden, die leiden tot onzekerheden in de schatting van de uiteindelijke *hazard zonation* kaart:

- op basis van het aantal metingen van de schuifgolfsnelheid kan de variatie van de schuifgolfsnelheden in de diverse afzettingen op verschillende dieptes in het onderzoeksgebied niet gekwantificeerd worden; er wordt gekarteerd op basis van een indicatieve waarde van de *site response*;
- de amplificatiefactoren geven een gemiddelde respons voor 'vergelijkbare' lokaties; door de respons van een groep lokaties te middelen wordt voorbijgegaan aan het feit dat elke lokatie een specifieke respons op de groundbeweging vertoont;
- de schatting van de amplificatiefactoren voor de klasse 'special study soils' is gebaseerd op een beperkt aantal modelberekeningen en niet gebaseerd op waarnemingen van werkelijk opgetreden amplificaties (zoals het geval bij de klasse IV 'slappe grond');

- de opbouw van de bovenste 30m is alleen bekend op lokaties waar boorgegevens beschikbaar zijn. Voor de tussenliggende gebieden wordt een schatting gemaakt van de bodemopbouw op basis van omliggende boringen en geologische kennis.
- geologische fenomenen kleiner dan 500m (bijvoorbeeld smalle geulsystemen) zijn niet in kaart gebracht.

## 4 Uitgangspunten voor de analyse van de gevoeligheid voor gebouwschade

### 4.1 Schade aan gebouwen

Aan de hand van de berekende seismische belasting (pieksnelheid op funderingsniveau) kan voor de aanwezige gebouwen vastgesteld worden of deze gevoelig zijn voor schade. De hoeveelheid schade die optreedt ten gevolge van een aardbeving is niet alleen afhankelijk van de seismische belasting, maar ook van de bebouwingstypologie en -dichtheid boven een veld. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de indeling van de bebouwing in verschillende typen, de bepaling van de dichtheid aan woningen in de concessie gebieden en de beoordeling van de schadegevoeligheid aan de hand van de SBR-richtlijn.

### 4.2 Uitgangspunten

Voor de beoordeling van de schadegevoeligheid zijn in deze fase van het onderzoek de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. Op basis van de conclusies uit een eerder onderzoek naar de relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland (van Staalduinen & Geurts, 1998) wordt de SBR richtlijn A *Trillingen. Schade aan gebouwen. Meet- en beoordelingsrichtlijn* gehanteerd voor de beoordeling van de schade ten gevolge van de aardbevingen.
2. De beoordeling van de gevoeligheid voor schade is uitgevoerd voor woningen op basis van twee, bij TNO aanwezige, databases.

### 4.3 Beoordeling schade m.b.v. SBR richtlijn A

SBR richtlijn A, die grotendeels gebaseerd is op de oude SBR-richtlijn (uitgave 1993) en de Duitse DIN norm 4150, uitgave 1999, hanteert grenswaarden voor de piekwaarde van de trillingsnelheid als functie van de frequentie, waaronder waarschijnlijk geen schade optreedt.

De richtlijn doet nadrukkelijk geen uitspraak over welke maatregelen genomen moeten worden of wie in een bepaald geval verantwoordelijk gesteld zou moeten worden. Een hoog trillingsniveau in een bepaald gebouw kan het gevolg zijn van een te sterke bron maar evenzeer van een ongunstige grondopbouw of een trillingsgevoelige constructie. De technische en juridische implicaties kunnen in al deze gevallen verschillend zijn.

Schade aan een bouwwerk wordt in SBR-richtlijn A als volgt omschreven: schade aan een bouwwerk is een verandering van de eigenschappen of van de positie van (een onderdeel van) een bouwwerk, met één of meer van de volgende gevolgen:

- een verlies van functie, zoals het bezwijken van dragende onderdelen;
- een vermindering van de integriteit van het onderdeel of van het bouwwerk als geheel met betrekking tot zijn dragende functie, waarbij sprake is van een significante vermindering van de veiligheid op de korte of langere termijn (vermindering van de verwachte levensduur);

- een vermindering van de economische waarde of van de gebruikswaarde, zoals bij scheurvorming in afwerklagen of betegeling.

De SBR richtlijn doet geen uitspraak over de mate van schade, met andere woorden, de schade wordt niet gekwantificeerd.

Voor het beoordelen van schade aan een bouwwerk door trillingen onderscheidt de SBR richtlijn 3 categorieën gebouwen. Aan deze 3 categorieën gebouwen worden verschillende grenswaarden toegekend. De drie categorieën zijn als volgt omschreven:

#### Categorie 1:

- In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout;
- Onderdelen van een bouwwerk, die geen deel uitmaken van de draagconstructie (bijv. scheidingsconstructies), indien deze bestaan uit gewapend beton of hout;
- Draagconstructies van bouwwerken, geen gebouw zijnde, welke bestaan uit metselwerk zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke

Gebouwen gemaakt uit staal vallen buiten de scope van SBR richtlijn A. Deze zijn in het algemeen minder kwetsbaar dan gebouwen van categorie 1.

#### Categorie 2

- In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk;
- In goede staat verkerende onderdelen van een gebouw, die niet tot de draagconstructie behoren, zoals bijvoorbeeld scheidingsconstructies, die bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brosse steenachtige materialen.

#### Categorie 3

- Onderdelen van oude en monumentale gebouwen met grote cultuurhistorische waarde.
- In slechte staat verkerende gebouwen uit metselwerk of onderdelen daarvan.

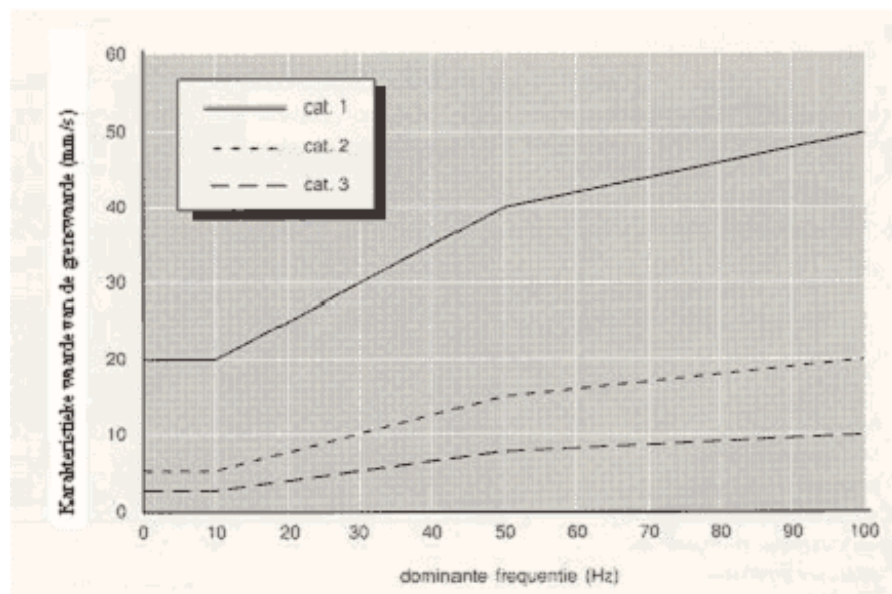
Er is sprake van een slechte bouwkundige staat, indien:

- de sterkte van de draagconstructie in belangrijke mate is verminderd door reeds aanwezige schade.
- de onderlinge samenhang van onderdelen of de sterkte van verbindingen tussen onderdelen zodanig is, dat deze door trillingen kan bezwijken of in belangrijke mate kan verzwakken.

Omstandigheden, die duiden op een slechte bouwkundige staat zijn bijvoorbeeld: reeds aanwezige scheurvorming, kieren, sterke vervormingen, verzakkingen en scheefstand van een gebouw.

De rekenwaarden van de grenswaarden waaronder geen schade valt te verwachten kunnen worden afgeleid uit onderstaande figuur. In deze figuur worden de karakteristieke waarden van de grenswaarden ( $V_{kar}$ ) gegeven.





*Figuur 2 Karakteristieke waarde van de grenswaarde op begane grondniveau als functie van de dominante frequentie*

De dominante frequentie van lichte, ondiepe aardbevingen ligt rond de 10 Hz. Uit figuur 2 kan worden afgelezen dat de karakteristieke waarde van de grenswaarden dan 20 mm/s, 5 mm/s en 3 mm/s bedraagt voor woningen uit respectievelijk categorie 1, 2 en 3. Voor de beoordeling is het type trilling ook van belang; het type trilling wordt middels een veiligheidsfactor in rekening gebracht. De rekenwaarde van de grenswaarde wordt bepaald volgens:

$$V_r = \frac{V_{kar}}{\gamma_t}$$

Hierin is:

$V_r$  de rekenwaarde van de grenswaarde;

$V_{kar}$  de karakteristieke waarde van de grenswaarde;

$\gamma_t$  de partiële veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt.

Trillingen kunnen worden onderverdeeld in kortdurende, herhaald kortdurende en continue trillingen. Lichte, ondiepe aardbevingen zijn pulsachtig dus kunnen worden ondergebracht bij kortdurende trillingen. De partiële veiligheidsfactor,  $\gamma_t$ , is dan 1,0. De rekenwaarde van de grenswaarde voor de drie categorieën is gegeven in onderstaande tabel.

*Tabel 3. Rekenwaarde voor de grenswaarde,  $V_r$ , voor de drie categorieën woningen*

Categorie	$V_r$ [mm/s]
1	20
2	5
3	3

De rekenwaarde van de grenswaarde dient vergeleken te worden met de rekenwaarde van de trillingssnelheid,  $V_d$ , welke wordt bepaald door:

$$V_d = V_{top} \cdot \gamma_v$$

Waarin:

$V_d$  de rekenwaarde van de trillingssnelheid;

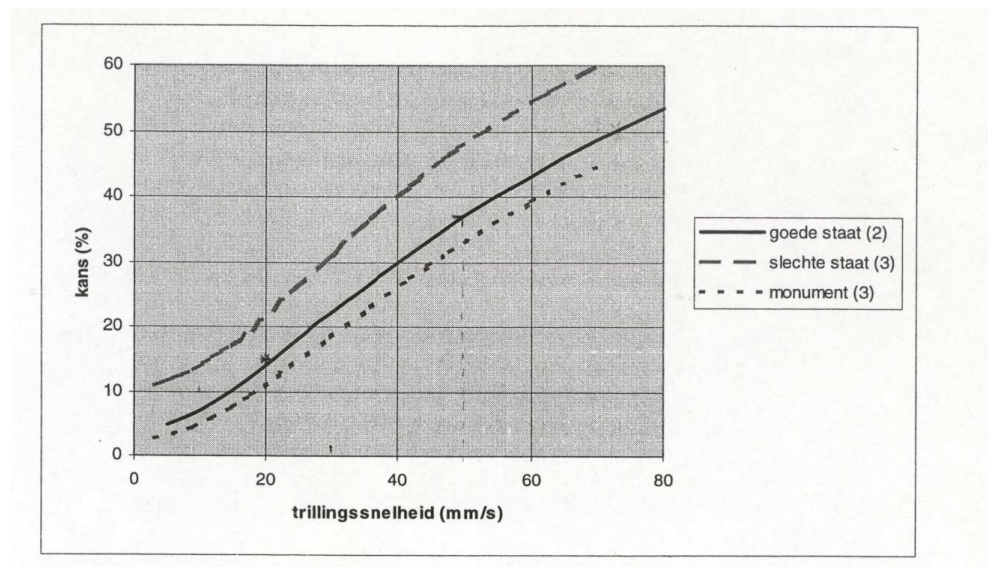
$V_{top}$  de gemeten of statistisch bepaalde topwaarde van de trillingssnelheid in het meetpunt;

$\gamma_v$  de partiële veiligheidsfactor die het type meting in rekening brengt.

De topwaarde van de trillingssnelheid is bepaald op funderingsniveau (zie hoofdstuk 2). Het is niet zeker dat dit de plaats is waar de grootste trillingssterkten optreden. Deze onzekerheid leidt ertoe dat een veiligheidsfactor,  $\gamma_v$ , op de berekende resultaten wordt gezet voordat deze beoordeeld kunnen worden. Deze veiligheidsfactor is bij beoordeling volgens meetmethode “indicatieve meting” 1,6.

Zowel bij een beperkte meting als bij een indicatieve meting dienen de gebouwen te worden ingedeeld in de categorie van het maatgevende onderdeel. Dit wil zeggen dat gebouwen met een betonnen draagstructuur, welke is ingevuld met metselwerk, moeten worden ingedeeld in categorie 2.

Bij overschrijding van de rekenwaarde voor de grenswaarde bestaat er een kans op schade. Uit onderzoek van Waarts (1997) blijkt dat de kans op schade bij metselwerkconstructies tussen de 3 en 11 % bedraagt wanneer wordt voldaan aan de grenswaarden uit de SBR Richtlijn. In figuur 3 is de kans op schade, als functie van de pieksnelheid op de fundering gegeven voor categorie 2 en categorie 3.



*Figuur 3. Kans op schade als functie van de piekwaarde voor de trillingssnelheid, op de fundering gemeten, voor categorie 2 en categorie 3: onderscheid makend in monumenten en in slechte staat verkerende gebouwen, ontleend aan (Waarts, 1997)*

Gezien de grote hoeveelheid woningen uit categorie 1 waarbij de (betonnen) draagstructuur is ingevuld met metselwerk wordt de curve van categorie 2 tevens aangenomen als benadering van de curve voor categorie 1.

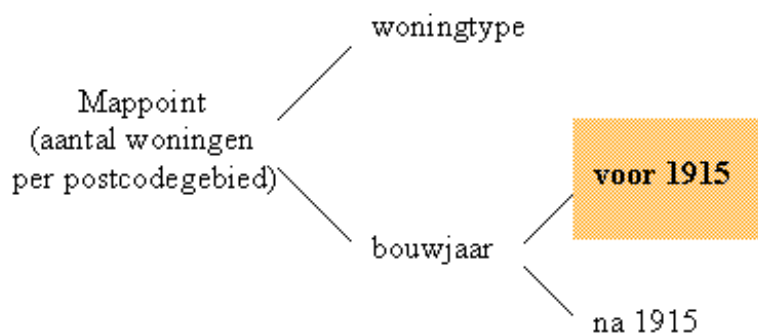
#### 4.4 Indeling bebouwing in concessiegebieden

Op basis van twee, bij TNO aanwezige, databases wordt een inschatting gemaakt van het aantal woningen per postcodegebied, verdeeld over de SBR categorieën. Op dit moment zijn er geen databases voorhanden die zo'n inschatting mogelijk maken voor andere bouwwerken dan woningen (utiliteitsbouw).

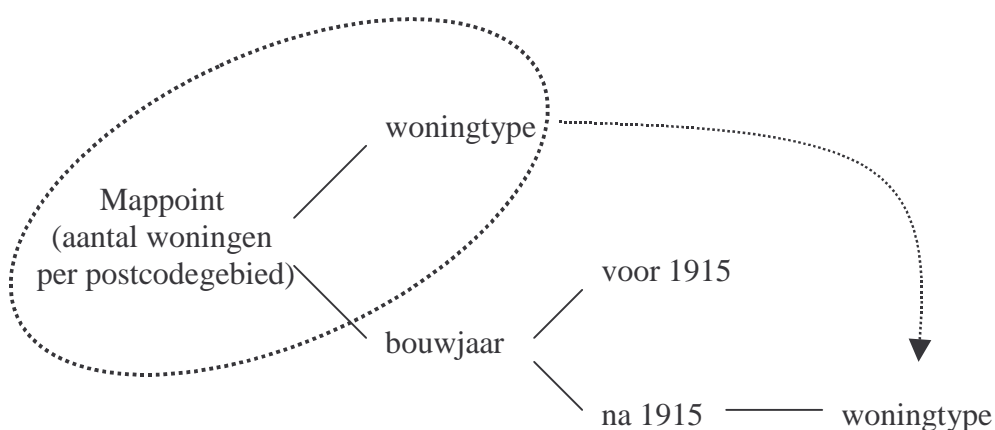
Voor de onderverdeling van de woningen in de concessiegebieden is gebruik gemaakt van de volgende twee databestanden:

1. Microsoft Mappoint 2002. Hier is onder andere informatie in opgenomen over het aantal woningen per postcode (4-cijferig) verdeeld naar woningtype en verdeeld naar bouwjaar.
2. Een door TNO Bouw ontwikkelde database van de woningvoorraad (MEB). Dit is een database met een bouwkundige beschrijving van de gehele woningvoorraad in Nederland. De woningvoorraad wordt hierin onderverdeeld naar woningtype (7 verschillende), constructiewijze (5 verschillende) en bouwjaar.

Door koppeling van deze beide databases wordt een inschatting gemaakt van het aantal woningen per postcodegebied verdeeld naar de SBR categorieën. Hierbij is als volgt te werk gegaan. Allereerst zijn alle woningen die voor 1915 zijn gebouwd uit de Mappoint database gefilterd. Deze woningen zullen voornamelijk uit monumenten bestaan. Hiermee is categorie 3 uit de SBR richtlijn bepaald. In de SBR richtlijn wordt naast monumenten ook gesproken over woningen welke in slechte staat verkeren. Aangezien woningen die in een slechte staat verkeren in alle bouwjaren kunnen voorkomen en er daarnaast geen gegevens bekend zijn over de verdeling van deze woningen over de bouwjaren is dit buiten beschouwing gelaten.



Vervolgens zijn de woningen uit de andere bouwjaren (periodes) onderverdeeld naar woningtypen volgens de verdeling op postcodeniveau.



Op basis van de matrix, woningtype x bouwjaar, is een koppeling gemaakt met MEB, waarin de woningtypes zijn onderverdeeld naar bouwwijze en bouwjaar. Omdat de woningtypologie uit beide databases niet overeenkomt, moeten de woningtypen uit Mappoint geconverteerd worden naar de woningtypen uit MEB. Deze conversie is gebaseerd op deskundig inzicht, maar is desalniettemin globaal (zie Tabel 4).

In de MEB database worden de volgende bouwwijzen onderscheiden:

- Traditionele bouw I (metselwerk, steens muur)
- Traditionele bouw II (metselwerk, spouwmuur)
- Gietbouw
- Montagebouw
- Houtskeletbouw

De eerste twee genoemde bouwwijzen (traditionele bouw I en II) vallen onder categorie 2 van de SBR richtlijn. Gietbouw, Montagebouw en Houtskeletbouw vallen onder categorie 1.

Tabel 4. Conversie woningtypen

		woningtype MEB						
		Eengezins- woning 1 bouwlaag	eengezins- woning 2 bouwlagen	eengezins- woning > 2 bouwlagen	Portiek- woning	galerij- woning	Mai- sonette	overig meer- gezins
woningtype Mappoint	Vrijstaande woning	5%	95%					
	Twee onder 1 kap	3%	97%					
	Hoekhuis in een rij	1%	97%	2%				
	Tussenwoning	1%	97%	2%				
	Boven/beneden/ portiekwoning				100%			
	Flat / etagewoning					90%	10%	

Per 4-cijferig postcode gebied is een verdeling gemaakt in de drie SBR klassen. Het absolute aantal woningen per klasse is in een drietal kaarten aangegeven. Gebieden met hoge bebouwingsdichtheid van een bepaalde klasse zijn donkerder gekleurd dan gebieden met een lage bebouwingsdichtheid. De resultaten zijn toegevoegd in Bijlage 1.



## 5 Resultaten seismische *hazard* analyse en gevoeligheid voor schade

Bijlage 4 toont de seismische *hazard zonation* kaarten voor het onderzoeksgebied. In deze kaarten is het resultaat van de ‘algemene *hazard* studie’ (bijlage 2) gecorrigeerd voor de *site response*; hiertoe is de pieksnelheid van het response spectrum bij 50% demping vermenigvuldigd met een amplificatiefactor die afhangt van de versnelling en de ondergrondklasse die op een lokatie wordt aangetroffen. Dit levert een kaartbeeld met een pieksnelheid van het response spectrum voor 50% demping voor  $T=10$  en  $T=100$ . Deze pieksnelheid van het response spectrum kan worden beschouwd als de pieksnelheid die optreedt in het gebouw op het funderingsniveau.

De *hazard zonation* kaarten in bijlage 4 geven per lokatie de snelheid weer waarvoor een kans van 10% bestaat dat deze gedurende één jaar ( $T=10$ ), resp. 10 jaar ( $T=100$ ) kan worden overschreden. Anders gezegd: voor deze lokatie bestaat een kans van 90% dat deze snelheid gedurende een jaar ( $T=10$ ), resp. 10 jaar ( $T=100$ ) niet zal worden overschreden.

### *Hazard zonation kaarten*

Op de kaart in bijlage 4A worden de snelheden weergegeven behorend bij een overschrijdingskans van 10% in een jaar. De kaart geeft de hoogste snelheden (meer dan 40 mm/s) boven de gasvelden Roswinkel, Groningen, Annerveen en Bergermeer, op de lokaties waar ‘special study soils’ of slappe grond aan maaiveld wordt aangetroffen. Het noordelijk deel van het gebied boven het gasveld Groningen wordt gekenmerkt door een iets hogere seismische *hazard* ( $>30$  mm/s) dan het zuidelijke deel ( $>20$  mm/s). Dit kan verklaard worden uit het feit dat in het noordelijke deel slappe holocene afzettingen aan maaiveld liggen, terwijl in het zuidelijke deel het vaste pleistocene oppervlak dicht onder maaiveld wordt aangetroffen. Bij het gasveld Roswinkel speelt de *site response* een minder duidelijke rol; hier worden slappe afzettingen aangetroffen in de zuidoostelijke punt van het voormalige Hunzedal; het overige deel van het gebied wordt gekenmerkt door pleistocene afzettingen aan het maaiveld. 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 de gebieden waar ‘special study soils’ aan maaiveld liggen. Dezelfde trend wordt onderscheiden in het kaartbeeld voor  $T=100$  (overschrijdingskans van 10% in 10 jaar). Ook hier tonen de gasvelden Roswinkel, Bergermeer, Groningen en Annerveen de hoogste seismische *hazard* (snelheden  $>60$  mm/s). Bij deze hogere snelheden kunnen de slappe gronden (klasse IV) de groundbeweging dempen. De snelheden ( $T=100$ ) voor Bergermeer zijn bijvoorbeeld in het duin- en strandwallengebied iets hoger dan in de slappe holocene gebieden.

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 vanaf de rand van het veld in kaart gebracht. Momenteel wordt aangenomen dat de *hazard* tot op een afstand van ongeveer 10 km van de rand van het veld op reële wijze kan worden geschat (Van Eck, 2003).

### *Vergelijking SBR-grenswaarden*

Uit de *hazard zonation* kaart (bijlage 4A) blijkt dat de pieksnelheden, die op basis van de huidige hazard modellen voorspeld worden voor een 10% overschrijdingskans in 1 jaar (na correctie met een veiligheidsfactor 1.6) boven alle gasvelden hoger is dan de grenswaarde van 20 mm/s voor de minst schadegevoelige categorie I, genoemd in de SBR-richtlijn. Bij de gasvelden Groningen, Annerveen, Bergermeer en Roswinkel ligt de snelheid die op basis van de huidige modellen voorspeld wordt voor T=10 (na correctie met een factor 1.6) ook in de directe omgeving hoger dan de SBR-grenswaarde voor categorie I. Voor de gebieden in de directe omgeving van de overige velden ligt de snelheid voor T=10 alleen boven de grenswaarde voor categorie I als er sprake is van een ongunstige bodemopbouw (slappe grond of 'special study soils'). Op basis van de huidige seismische modellen wordt voor de pieksnelheid voor T=10 op een grotere afstand (oplopend tot een afstand van 10 km) van het gasveld nog een waarde voorspeld die hoger is dan de SBR-grenswaarde voor de meest voorkomende categorie II (metselwerk).

De combinatie van de *hazard zonation* kaarten en de SBR-richtlijn levert geen inzicht in het totaal aantal schadegevallen en de ernst van de schade die kan optreden. Een vergelijking met het werkelijke aantal schademeldingen en de werkelijke aard van de gemelde schade is daarmee niet mogelijk. Een dergelijke validatie van de gebruikte modellen (zowel *hazard*- als schademodelen) aan praktijkgegevens wordt belangrijk geacht alvorens tot een uiteindelijke seismische risico-analyse wordt overgegaan.

### *Eerste validatie van de modellen: case Roswinkel 1997*

Een eerste globale validatie van de *hazard*- en schademodelen is uitgevoerd aan de hand van de case Roswinkel 1997, magnitude 3.4. Op basis van de *attenuation* functies die aan de basis liggen van de seismische *hazard* analyse en een door TNO-Bouw eerder afgeleide relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheid op funderingsniveau uit figuur 3 (Waarts, 1997) is een globale schatting gemaakt van het aantal schadegevallen bij een aardbeving met een magnitude 3.4.

Deze schatting is vergeleken met het werkelijke aantal schademeldingen. Het werkelijke aantal schademeldingen voor de beving Roswinkel 1997 bedraagt 234 meldingen, waarvan slechts één melding geregistreerd is buiten een straal van 6 à 7 km van het epicentrum van de beving. Op basis van de huidige *hazard*- en schademodelen worden binnen een straal van 10 km 1250 schadegevallen voorspeld, waarvan 690 schadegevallen binnen een straal van 6 à 7 km van het epicentrum en de overige schadegevallen in het gebied er buiten.

Uit deze validatie blijkt dat het aantal woningen dat met de huidige *hazard*modellen en schade-relaties voorspeld wordt, met name op de grotere afstanden, veel hoger ligt dan het werkelijke aantal schademeldingen. Bij deze validatie is nog geen rekening gehouden met de belangrijkste onzekerheden in de verschillende stappen van de modellering, nl. onzekerheden in de:

- *attenuation* functie
- *site response* (als uitgangspunt is gehanteerd dat de site response een minder belangrijke rol speelt, aangezien de ondergrond van Roswinkel hoofdzakelijk uit pleistocene zanden bestaat)
- response van de verschillende typen gebouwen op de groundbeweging
- relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheid op de fundering



- lokatie en de aantallen woningen op een bepaalde afstand van het epicentrum

en onzekerheden in:

- het werkelijk aantal woningen met schade; dit kan afwijken van het totaal aantal schademeldingen.

De huidige modellen en schade-relaties geven nog geen inzicht in de aard van de schade die kan optreden.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van modellen van het KNMI voor de seismiciteit van de verschillende gas- en olievelden en functies voor de *attenuation* van de trillingen door de ondergrond (beschreven in het rapport ‘Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes’, Van Eck et al., 2003) zijn binnen deze studie algemene *hazard zonation* kaarten gemaakt, waarop de pieksnelheden worden weergegeven behorend bij een overschrijdingskans van 10% in 1 en 10 jaar ( $T=10$ , resp.  $T=100$ ). De snelheden zijn pieksnelheden die kunnen optreden op het funderingsniveau van constructies. Uit onderzoek in fase 1 van het project is gebleken dat de lokale *site response* kan leiden tot een versterking van het signaal. Met name in gebieden waar dikkere afzettingen met lage schuifgolfsnelheden (slappe klei/veen) en afzettingen met grote stijfheidscontrasten (veen op zand) in de ondiepe ondergrond voorkomen kan een ‘opslingering’ van het signaal optreden. Deze gebieden zijn voor dit onderzoek in kaart gebracht en de pieksnelheden zijn gecorrigeerd voor het effect van de ondiepe ondergrond (*site response*) op het signaal (zie bijlage 4A en 4B). De *hazard zonation* kaarten geven gebieden aan waar, uitgaande van een 10% overschrijdingskans op jaar- of decade-basis ( $T=10$ , resp.  $T=100$ ), hogere of minder hoge pieksnelheden bereikt kunnen worden en geven daarmee inzicht in de lokaties waar meer of minder schade zou kunnen optreden. Omdat de bebouwingstypologie – en dichtheid boven de velden niet overal gelijk is, is in het kader van deze studie op basis van twee bij TNO aanwezige databases ook een analyse van deze aspecten uitgevoerd.

SBR richtlijn A hanteert grenswaarden voor de piekwaarde van de trillingsnelheid als functie van de frequentie, waaronder waarschijnlijk geen schade optreedt. Uit een vergelijking met de grenswaarden voor trillingen genoemd in de SBR-richtlijn blijkt dat de snelheden die direct boven en in de directe omgeving van de gasvelden voorspeld worden deze grenswaarden overschrijden. De SBR richtlijn doet geen uitspraak over de mate van schade.

De *hazard zonation* kaarten zijn gebaseerd op de op dit moment best beschikbare modellen voor de seismiciteit van de velden, de *attenuation* van het signaal en de *site response* (*hazard*-modellen), maar gaan gepaard met onzekerheden. De combinatie van de *hazard zonation* kaarten en de SBR-richtlijn levert geen inzicht in het totaal aantal schadegevallen en de ernst van de schade die kan optreden. Een vergelijking met het werkelijke aantal schademeldingen en de werkelijke aard van de gemelde schade is daarmee niet mogelijk. Een validatie van de gebruikte modellen (zowel *hazard*- als schademodelen) aan praktijkgegevens wordt belangrijk geacht alvorens tot een uiteindelijke seismische risico-analyse wordt overgegaan.

Op basis van de *attenuation* functies die aan de basis liggen van de seismische *hazard* kaarten en een door TNO-Bouw eerder afgeleide relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheid op funderingsniveau is een globale schatting gemaakt van het aantal schadegevallen bij een aardbeving met een magnitude 3.4 in Roswinkel. Hieruit blijkt dat het aantal woningen dat met de huidige *hazard* modellen en schade-relaties voorspeld wordt, met name op de grotere afstanden, veel hoger ligt dan het werkelijke aantal schademeldingen.

Er wordt aanbevolen om een uitgebreidere calibratie en validatie van de *hazard*- en schademodelen aan de hand van meerdere praktijkcases uit te voeren. Hierbij dient

rekening gehouden te worden met de belangrijkste onzekerheden in de verschillende stappen van de modellering. Deze calibratiefase zal leiden tot een update/aanpassing van de gebruikte seismische hazardmodellen en een aan de praktijk gerelateerde relatie tussen het trillingsniveau en de aard van de schade voor geïnduceerde aardbevingen. Pas na deze fase kan worden overgegaan op het inschatten van het schaderisico. De schatting van een ‘damage scenario’, de kansverdeling van totale schade door een gebeurtenis, moet worden gebaseerd op een aardbevingsscenario compleet met een uitgebreide analyse van zowel verschillende *hazard* modellen, als verschillende schade modellen.

## 7 Referenties

- [1] Borchardt, R. D., 1994-1. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). In: Earthquake Spectra, Vol. 10, No.4, pp.617-654.
- [2] Borchardt, R.D., 1994-2. Simplified Site Classes and Empirical Amplification factors for site-dependent code provisions. In Proceedings of the NCEER. SEAOC/BSSC workshop on site response during earthquakes and seismic code provisions, University of Southern California, Los Angeles, November 18-20, edited by G.M. Martin.
- [3] Borchardt, R.D., 2002. Empirical evidence for site coefficients in building code provisions. In: Earthquake Spectra, Vol. 18, No. 2, pp. 189-217.
- [4] Campbell, K.W., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo-absolute acceleration response spectra. In: Seism. Res. Lett., 68, pp. 154-179.
- [5] Idriss, I.M., 1990. Response of soft soil sites during earthquakes. In: H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings, Vol. 2, May, pp. 273-289.
- [6] Van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H., Dost, B., 2003. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes.
- [7] Van Staalduinen P.C., 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] Waarts, P.P.H., Ostendorf, C.H., 2002. SBR-deel A: Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen. Rotterdam, Stichting Bouwresearch, 2002.
- [9] Waarts, P.H., 1997. Kans op schade aan bouwwerken door trillingen. TNO rapport B90-822, 1991, revisie jan. 1993.
- [10] 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

