

TNO-NITG
Utrecht
Princetonlaan 6
Postbus 800015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T 030 256 44 70
F 030 256 44 75
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.

Inhoudsopgave

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

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 ($M_f=3.4$) 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.

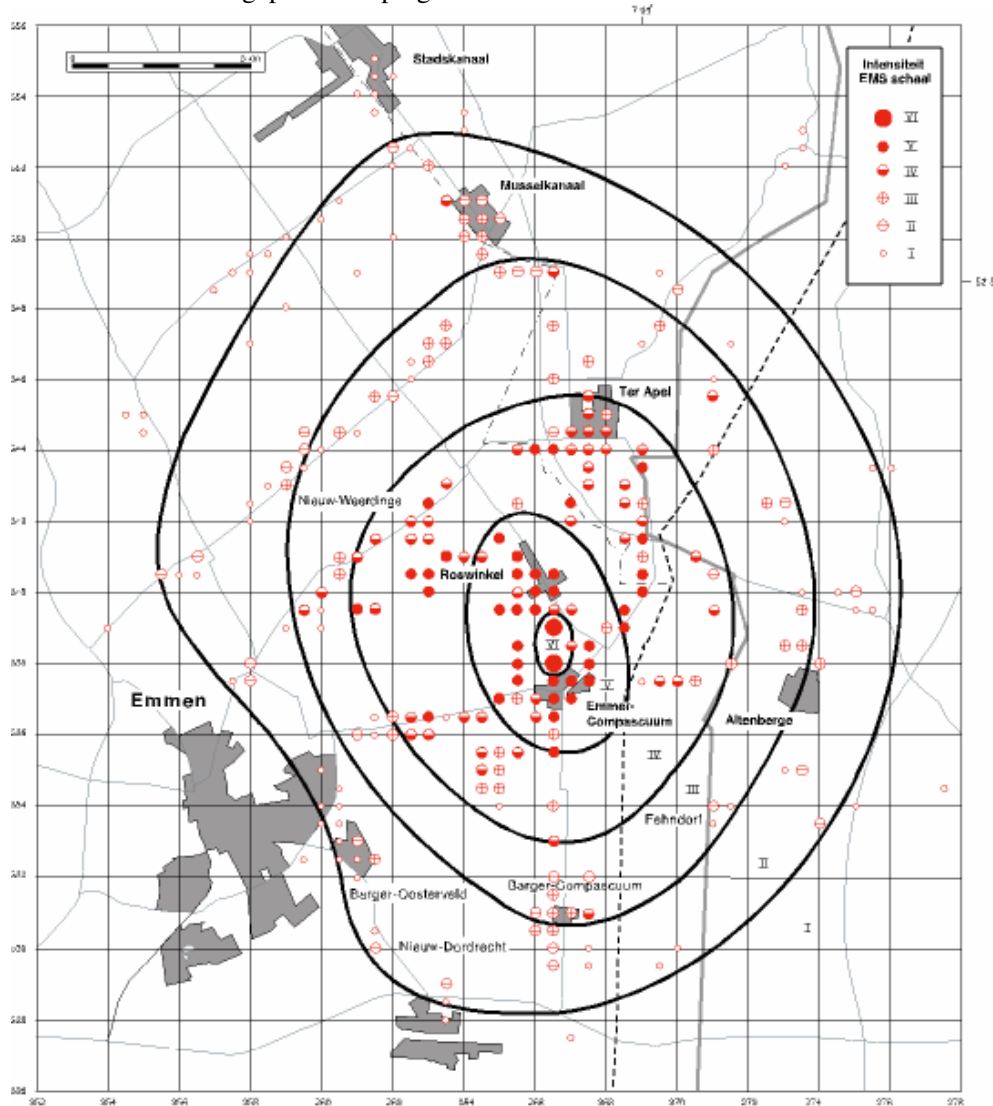
Wanneer de voorspelde *pgv* wordt uitgezet tegen de afstand tot het epicentrum van de beving (zie figuur 2a) blijkt dat de verwachtingswaarde voor de *pgv* op 15 km afstand van het epicentrum 2.5 mm/s bedraagt. Na vermenigvuldiging met de door de SBR-richtlijn vereiste veiligheidsfactor 1.6 ligt op deze 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.

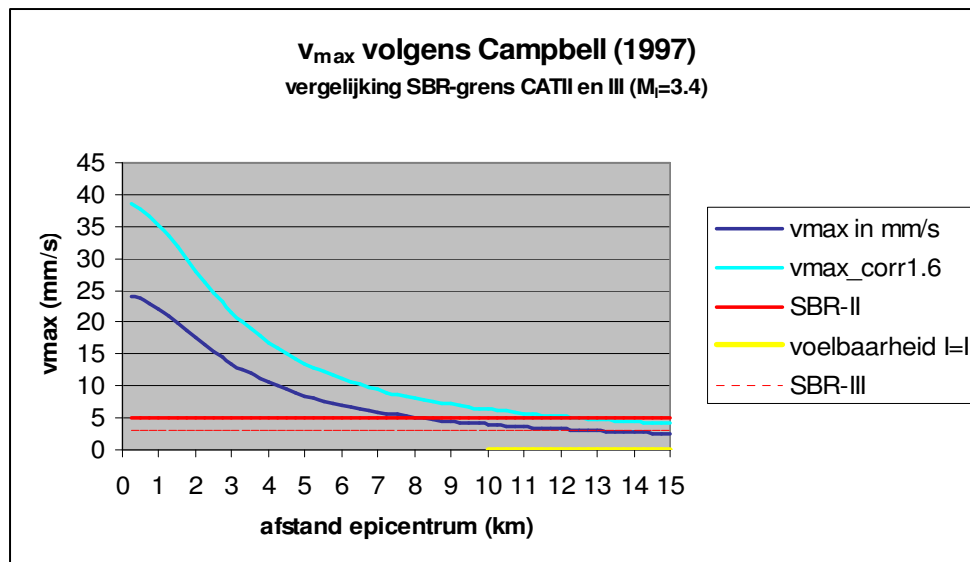
Dost et al (2004) gebruiken een correctiefactor 2 om de ‘gemiddelde’ site response van de bovenste 200m van de ondergrond in rekening te brengen. Voor een relatief stijve ‘referentie-ondergrond’ zoals aanwezig rondom Roswinkel (TNO-rapport NITG-03-186-C, 2003) geeft dit waarschijnlijk een overschatting 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.



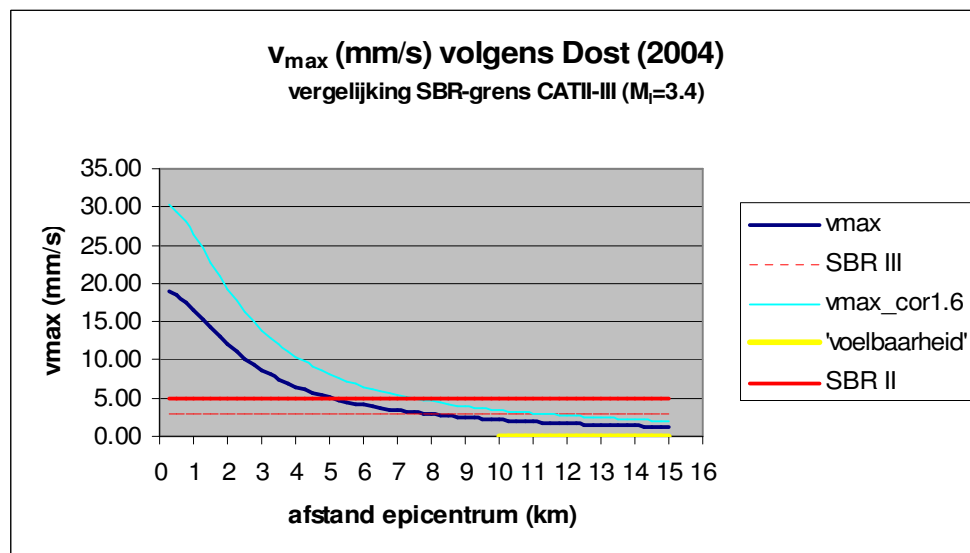
Figuur 1. Intensiteitskaart voor de aardbeving van Roswinkel 1997 ($M_l=3.4$). Uit: Dost en Haak, 1997.

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 opslingering);
- 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 opslingering 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 (Voe1 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 zonder Voelbaarheid | Attenuation met 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 afstandsbereik 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.