

TNO-KNMI rapport

Maximale schade door geïnduceerde aardbevingen: inventarisatie van studies
met toepassingen op Bergermeer

Datum: 3 mei 2011

Auteurs:

Ir. W. van Kanten-Roos (TNO)
Dr. B. Dost (KNMI)
Prof. Ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder (TNO)
Dr. T. van Eck (KNMI)

Samenvatting

Uit onderzoek van het KNMI en TNO naar de schade die op kan treden bij een ondiepe geïnduceerde aardbeving, blijkt dat schade alleen op hoofdlijnen is te kwantificeren. De kans op het ontstaan van (lichte) schade kan gekwantificeerd worden, er wordt echter in geen van de (in het verleden uitgevoerde) onderzoeken een uitspraak gedaan over de ernst van de schade bij grotere magnitudes. Hoewel er wel voortgang is geboekt met de schatting van de buitengrens van schade, is de verdere ontwikkeling van deze modellen afhankelijk van de beschikbaarheid van data voor schade veroorzakende aardbevingen. Deze dataset is klein en zal naar verwachting maar langzaam groeien. Ondanks dat de modellen niet gekalibreerd kunnen worden aan historische data en een betere gekwantificeerde voorspelling van het aantal woningen met schade op dit moment niet mogelijk is, is het wel mogelijk om een globale schatting te geven van de te verwachten ernst van de schade. Bestaande rekenmodellen laten zien hoe groot de kans is op lichte schade. De opgetreden schade bij een beving met magnitude $M=3.5$ laat zien dat ook matige schade kan ontstaan. Bij een aardbeving met magnitude $M=3.9$, de maximaal te verwachten beving, wordt verwacht dat het aantal schadegevallen met matige schade zal toenemen, maar niet dat er schade in een hogere categorie (aanzienlijke tot zware schade) zal ontstaan.

Inleiding

In Nederland gelden geen bouwvoorschriften voor belasting van trillingen buiten een gebouw. Er zijn wel richtlijnen beschikbaar, in de vorm van grenswaarden voor trillingssnelheden, waarbij bij overschrijding een (kleine) kans op schade bestaat (Stichting Bouw Research, SBR). De SBR richtlijn geeft overigens alleen aan dat bij overschrijding er schade kan ontstaan, het geeft geen informatie over de soort en ernst van de mogelijke schade. Trillingen als gevolg van geïnduceerde aardbevingen hebben een specifiek karakter, dat verschilt van natuurlijke aardbevingen. Het verschil zit vooral in de korte duur van de trilling in combinatie met een hoge maximale versnelling of snelheid van de groundbeweging. De oorzaak hiervan is dat geïnduceerde aardbevingen veel dichterbij het aardoppervlak plaats vinden dan tektonische (natuurlijke) aardbevingen. De kennis over geïnduceerde aardbevingen in Nederland is gebaseerd op observaties van de laatste 25 jaar (1986-2011). In deze periode is geen aardbeving geregistreerd van een sterkte (magnitude) groter dan $M=3.5$.

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken van onderzoek naar de relatie tussen de sterkte van geïnduceerde aardbevingen en de te verwachten schade. Vooral in de periode 2003-2004 is hier vooruitgang geboekt en dit heeft geresulteerd in een overzicht van de resultaten van deelstudies [7]

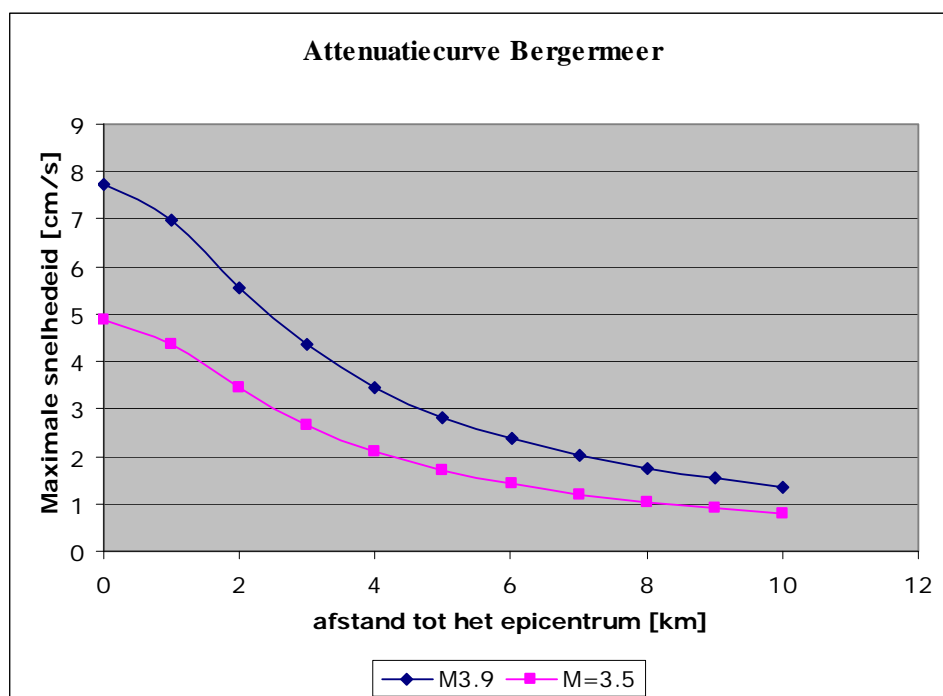
Relatie tussen trillingen en schade

Een uitgebreide studie van de relatie tussen de kans op schade aan gebouwen en geïnduceerde aardbevingen is in 1998 door TNO bouw uitgevoerd [2]. In deze studie is onderzoek gedaan naar het gebruik van de SBR richtlijn voor de inschatting van de kans op schade. Hierbij zijn versnellingsmetingen uit Noord-Nederland gebruikt. Resultaten van dit onderzoek zijn a) een inschatting van de kans op schade als functie van de maximale trillingssnelheid voor verschillende typen gebouwen (zie figuur 1) en b) een gemiddeld responsespectrum voor ondiepe aardbevingen in Noord-Nederland. Responsespectra geven inzicht in de mate waarin een gebouw reageert op een versnelling van de bodem. De vorm van het responsespectrum wijkt af van de Europese norm, zoals vastgesteld in Eurocode 8.

Wat kan er gebeuren

Gebaseerd op seismologische waarnemingen en kennis van de ondergrond zijn modellen gemaakt van wat er in de toekomst kan gebeuren, de zogenaamde hazardmodellen. Uitgaande van door het KNMI berekende hazard modellen [3][4] en door TNO berekende opslinger factoren als gevolg van de effecten van de ondiepe geologie [5][6], zijn kansmodellen voor het overschrijden van maximale versnellingen en daarvan afgeleide snelheden in Noord-Nederland ontwikkeld. De basis van deze hazardmodellen vormt de KNMI-database van geregistreerde aardbevingen in Noord-Nederland.

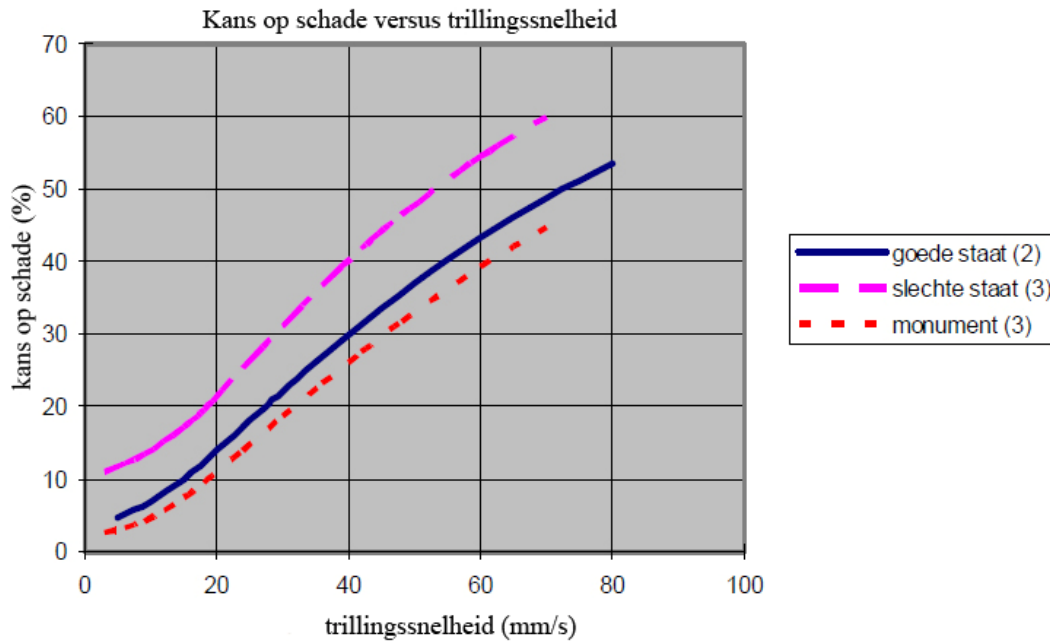
In [4] is de hazard berekend voor verschillende gasvelden, waaronder het Bergermeerveld. Schattingen van maximale snelheden van de bodembeweging voor dit veld zijn 40-60 mm/s voor een terugkeerperiode van de bevingen van $T=10$ jaar en $T=100$ jaar. Een terugkeerperiode van 10 jaar is ongeveer gelijk aan een 10% kans op het overschrijden van het maximum per jaar. Berekeningen zijn uitgevoerd voor een maximale magnitude van $M=3.5$. Aanpassing van deze waarde naar een $M_{\max} = 3.9$ heeft een beperkt effect van ca 10-20% op deze waarden, aangezien de kans op optreden van grotere bevingen kleiner is, zodat de schatting van de maximale snelheden naar 50-70 mm/s gaat.



Figuur 1 Maximale snelheid van de groundbeweging als functie van de epicentrale afstand voor een bron op 2.2 km diepte.

Indien de bevingen van $M=3.5$ en $M=3.9$ verondersteld worden met zekerheid op te treden in het Bergermeerveld ontstaan maximale snelheden (in het epicentrum) van 49 respectievelijk 77 mm/s. Dit volgt uit berekeningen op basis van empirische attenuatie functies, waarbij rekening gehouden is met de onzekerheid, door één keer de standaarddeviatie bij het resultaat op te tellen. De diepte van de aardbevingsbron is hierbij geschat op 2.2 km, de gemiddelde diepte van micro aardbevingen, die vanaf 2010 worden waargenomen in het Bergermeerveld met een set van trillingsopnemers (geofoons) op reservoir niveau.

Op een in dit geval altijd aanwezige afstand van epicentrum tot de rand van de bebouwing van 1 km is dit echter gedaald naar 43 en 69 mm/s. Uit figuur 2 is af te leiden dat deze maximale trillingssnelheden resulteren in ca 30 en 50% kans op schade voor een gebouw in goede staat. Op 3 km afstand zijn de maximale trillingssnelheden gedaald tot 27 en 44 mm/s (ca. 20 en 35% kans op schade).



Figuur 2 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 (uit [9], naar [2]) Het woord “schade” houdt in: lichte, niet constructieve schade (zie tabel 1).

Toetsing van modellen

In [5,6] is gekeken naar de validatie van hazardmodellen en de daaruit afgeleide schatting van de hoeveelheid woningen met schade. Voor Roswinkel bleek dat de verwachte aantallen woningen met schade veel hoger ligt dan het werkelijke aantal schademeldingen en dat de combinatie van de hazard kaarten en de SBR richtlijn (1% kans op schade) geen goed inzicht geeft in het totaal te verwachten aantal schadegevallen en de ernst van de schade [6, p26]. Aanbevolen werd een uitgebreidere kalibratie en validatie van de hazard en schade modellen uit te voeren. In 2007 is een vervolgrapport gemaakt [8], waarbij het doel was om tot een realistischer inschatting van de buitengrens van schade te komen, hetgeen vervolgens in [1] verder is uitgewerkt. De gevoeligheid van verschillende typen gebouwen is hierin onderzocht en er werd geconcludeerd dat de buitengrens voor schade beter bepaald kon worden. In de aanbevelingen wordt gemeld dat kalibratie met een groter aantal aardbevingen is aan te bevelen.

De huidige beschikbare dataset aan versnellingsmetingen is nog steeds beperkt en niet groot genoeg om een significante verbetering van de resultaten in bovengenoemde rapporten te bereiken. Vandaar dat het niet zinvol geacht wordt om op dit moment een nieuwe studie uit te voeren.

Schadebeoordeling

Het meest recente rapport over dit onderwerp [9] geeft niet alleen een uitleg over de materie, maar bevat ook een beschrijving van een gestandaardiseerde aanpak van het vastleggen en beoordelen van schade. Deze aanpak is vervolgens getoetst door toepassing op een vijftal geselecteerde panden in de provincie Groningen.

Beschouwing schade aan woningen in Bergen

De trillingssnelheden ter plaatse van de woningen zijn, uitgaande van het daadwerkelijk optreden van een $M=3.9$ aardbeving, zoals eerder afgeleid, maximaal 69 mm/s. Uit figuur 2 kan worden afgelezen dat bij een dergelijke trillingssnelheid de kans op schade voor de drie genoemde woningcategorieën als volgt is:

- Monumenten: 45%
- goede staat: 50%
- slechte staat: 60%

Op 3 km afstand is dit gereduceerd tot:

- Monumenten: 30%
- goede staat: 35%
- slechte staat: 45%

De ernst van de schade is hiermee nog niet gekwantificeerd. De ernst van schade kan primair worden onderverdeeld in (zie ook [9] en tabel 1):

- constructieve schade: veiligheid in het geding
- niet constructieve schade: veiligheid niet in het geding

Trillingen zullen bij lage snelheden geen constructieve schade tot gevolg hebben. Genoemde kansen zijn te relateren aan de kans van optreden van “niet constructieve schade”. Niet constructieve schade [9] is weer onder te verdelen in schade met consequenties voor de esthetica, de gebruikswaarde en de levensduur. De EMS schaal definieert 5 gradaties van schade aan gebouwen welke is gekoppeld aan het type gebouw (klasse A tot en met F). Op basis van hun kwetsbaarheid voor schade worden gebouwen in 6 gebouwtypes ingedeeld:

- A: los-gestapeld of klei
- B: metselwerk en natuursteen
- C: gewapend beton en degelijke houten constructies
- D, E, F: gebouwen ontworpen met een zekere graad van aardbevingsbestendigheid.

De meeste bouwwerken in Nederland zijn opgetrokken uit metselwerk en kunnen geclassificeerd worden als type B. Dit zal ook voor de meeste woningen in Bergen gelden.

De gradaties zijn te beschrijven volgens de European Macroseismic Scale (EMS, [10]) als:

Gradatie (ref. EMS)	Klasse (type gebouw)	omschrijving
1		Verwaarloosbare tot lichte schade (niet constructief)
	A-C	haarscheurtjes in een enkele muur; neervallen van slechts kleine stukjes pleisterwerk; in een enkel geval vallen loszittende stenen van hogere delen van gebouwen.
	D-F:	kleine scheurtjes in pleisterwerk op regels en in scheidingswanden.
2		Matige schade (licht constructief, matig niet-constructief)
	A-C	scheuren in veel muren; vallen van grotere stukken pleisterwerk; delen van schoorstenen komen omlaag.
	D-F	haarscheurtjes in penanten, kolommen en balken; metselwerk valt uit voegen van wanden; scheuren in scheidingsmuren; vallen van stukken brosse afdekklagen en pleisterwerk.
3		Aanzienlijke tot zware schade (matig constructief, zwaar niet-constructief)
	A-C	in de meeste muren grote en diepe scheuren; dakpannen of leien glijden weg; schoorstenen breken op de daklijn; breuk van enkele niet-constructieve onderdelen.
	D-F	scheuren in penanten en losraken van stukken beton, scheuren in balken.
4		Zeer zware schade (zwaar constructief, zeer zwaar niet-constructief)
	A-C	ernstige breuken in muren; gedeeltelijk bezwijken van constructieve onderdelen
	D-F	ernstige schade door ontwrichting van het bouwskelet verwoesting van beton waarbij wapeningsstaal zichtbaar kan worden; gedeeltelijke instorting; penanten en kolommen komen scheef te staan
5		Verwoesting (zeer zware constructieve schade)
	A-F:	algehele of vrijwel totale ineenstorting.

Tabel 1. Classificatie van schade aan gebouwen (metselwerk), volgens [10].

De schade, die is ontstaan na de bevingen in 2001 met een magnitude van $M=3.5$ (lokale trillingssnelheid bij bebouwing 43 mm/s) en $M=3.2$, is in de meeste gevallen te karakteriseren als schade categorie 1, lichte schade en in een enkel geval schade categorie 2, matige schade (tabel 1). Figuur 2 geeft aan wanneer lichte schade kan ontstaan. De figuur geeft echter geen informatie over de kans op *matige* schade. In [1] is geconcludeerd dat (een afgeleide van) de relatie uit figuur 1 voor het gebied rond Alkmaar conservatief is, dat wil zeggen: de relatie voorspelt meer schade dan in de praktijk is geclaimd. Indien deze theoretische inschatting desondanks wordt aangehouden dan zal de kans op matige schade bij een beving met magnitude $M=3.5$ liggen in de orde van 5%. Zwaardere schade is bij deze magnitude niet voorgekomen.

Wordt vervolgens uitgegaan van een gelijk verloop van de curve voor matige schade, dan volgt hieruit dat de (conservatieve) kans op matige schade bij een aardbeving met een magnitude van $M=3.9$ (lokale snelheid bij bebouwing 69 mm/s) als volgt is:

- monument: 20%
- goede staat: 25%
- slechte staat: 35%

Schade in categorie 3 (aanzienlijke tot zware schade) wordt niet verwacht. De ervaring leert, dat deze schade bij natuurlijke aardbevingen kan optreden bij snelheden boven de 100 mm/s.

Geconcludeerd wordt dat als een aardbeving met magnitude $M=3.9$ optreedt er in een aanzienlijk aantal gebouwen matige schade wordt verwacht maar nog geen schade uit de categorie 3. Concreet betekent dit dat er bij meer gebouwen scheuren in muren kunnen worden geconstateerd, dat er grotere stukken pleisterwerk kunnen vallen en in uitzonderingsgevallen delen van schoorstenen omlaag kunnen komen.

Opgemerkt wordt dat de uiteindelijke schade afhangt van het type en de staat van het gebouw ter plaatse. In dit rapport is niet naar individuele gevallen gekeken.

Referenties:

1. Roos, W., P.H.Waarts en B.B.T. Wassing, 2009, Kalibratiestudie schade door aardbevingen, *TNO rapport TNO-034-DTM-2009-04435*, 33pp.
2. Van Staalduinen, P.C. en C.P.W. Geurts, 1998, De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland: inventarisatie, *TNO rapport 97-CON-R1523-1*, 98pp.
3. Van Eck, T., F. Goutbeek, H. Haak & B. Dost, 2003, Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. *KNMI-publicatie: WR-2004-01*, ISBN 90-369-2248-8.
4. Van Eck, T., F.H. Goutbeek, H.W. Haak en B. Dost, Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in the Netherlands, *Engineering Geology*, 2006, **87**, 105-121, [doi:10.1016/j.enggeo.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.06.005).
5. Wassing, B.B.T., D. Maljers, R.S. Westerhoff, J.H.A. Bosch en H.J.T. Weerts, 2003, Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen, rapportage fase 1, *TNO-rapport NITG 03-185-C*, 77pp
6. Wassing, B.B.T., D. Maljers, J.H.A. Bosch en H.J.T. Weerts, A. Koopman, A. Dullemond, W. Roos, 2004, Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen, rapportage fase 2, TNO-rapport NITG 03-186-C, 31pp
7. Wassing, B.B.T., T. van Eck en R.M.H.E. van Eijs, 2004, Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen: Integratie van deelstudies, TNO rapport NITG 04-244-B; KNMI-publicatie 208, 10pp.
8. Wassing, B.B.T., P.H.Waarts en W. Roos, 2007, Kalibratie van hazard- en schademodellen Seismisch risico geïnduceerde aardbevingen, TNO-rapport 2007-U-R0407/B, 34pp.
9. De Lange, G., N.G.C. van Oostrom, S. Dortland, H. Borsje en S.A.J. de Rlichemont, 2011, Gebouwschade Loppersum, Deltareport 1202097-000-BGS-0003, 84pp.
10. Grünthal, G., 1998, "European Macroseismic Scale 1998", Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, Luxembourg 1998; Vol 15, 99pp.