

TRILLINGSSCHADE AAN GEBOUWEN
INFORMATIEDOCUMENT

Versie 1.0

Augustus 2017

© Dit rapport bevat de stand der kennis van juli 2017. Het copyright van dit rapport ligt bij de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. Het copyright van de onderliggende studies berust bij de respectievelijke auteurs. Dit rapport of delen daaruit mogen alleen met een nadrukkelijke status-en bronvermelding worden overgenomen of gepubliceerd.

Voorwoord

Voor u ligt een zogeheten ‘informatiedocument’ met een handzame samenvatting van de huidige publiekelijk beschikbare kennis over het effect van trillingen op gebouwen. Aanvullend wordt ingegaan op de rol van *aardbevingstrillingen* en hun effect op gebouwen. Hierbij wordt ook ingezoomd op de situatie in het Groningen gasveld, waar sprake is van schade aan gebouwen als gevolg van aardbevingen door gaswinning.

Dit informatiedocument kent verschillende aanleidingen:

Advies Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV). Een van de aanbevelingen van het OVV-rapport uit 2015 (en onlangs nog eens herhaald) is dat betrokkenen bij de gaswinning in de communicatie en het contact met bewoners transparanter moeten zijn over onzekerheid. Die onzekerheid betreft ook het vaststellen van een causaal verband tussen aardbevingen en schade aan gebouwen.

Appendix 9 van het Groningen Winningsplan 2016. Deze appendix bevatte een eerste analyse van ontvangen schadeclaims en observaties van schade aan gebouwen in het Groningen gasveld.¹ Hieruit bleek dat schademeldingen en feitelijk opgetreden schade geen identieke grootheden zijn. De appendix eindigde met de vaststelling dat verder onderzoek nodig is naar:

- a. Het precieze gebied waar voldoende aardbevingsenergie kan vrijkomen om daadwerkelijk schade aan gebouwen te kunnen veroorzaken;
- b. De precieze relatie tussen schadeclaimrapporten en daadwerkelijke schade;
- c. De beoordeling van schademeldingen als A-, B- of C-schade, mede naar aanleiding van de toename van C-schades halverwege 2015.

De Wet Bewijsvermoeden Gaswinning Groningen. Deze wet stelt nieuwe eisen aan schadedossiers in Groningen.² De wet regelt een bewijsvermoeden voor fysieke schade aan gebouwen indien in een groot aantal gelijksoortige schadegevallen vaststaat dat verreweg het grootste deel van die gevallen aan één bepaalde oorzaak moet worden toegeschreven.

Groningen Instemmingsbesluit. Onderdeel hiervan is een instructie door de minister van Economische Zaken aan NAM voor het uitvoeren van additionele technische studies voor het berekenen van de te verwachte schade als gevolg van geïnduceerde aardbevingen.³

Dit informatiedocument behandelt de volgende onderwerpen:

- Grondbeweging door aardbevingen, in het bijzonder de rol daarbij van de aardbevingsmagnitude, de afstand van een gebouw tot het epicentrum en de lokale grondgesteldheid.
- Schade aan gebouwen door trillingen, in het bijzonder de EMS-98 schaal en het bijbehorende veldhandboek voor het classificeren van schade.
- Het waarnemen van de grondbeweging (en/of trillingen) in Groningen met behulp van het KNMI-netwerk van geofoons in de diepe ondergrond en het TNO-netwerk van gebouwensensoren op het maaiveld.
- De beoordeling – met behulp van de SBR-trillingsrichtlijn – van de mate waarin een trilling schade aan gebouwen kan veroorzaken.
- De effecten van trillingen door aardbevingen in Groningen – over de rol van (herhaalde) kleine aardbevingen, het vaststellen van de kans op schade door aardbevingen en het meting-gedreven afbakenen van een effectgebied voor individuele aardbevingen.

Met dit informatiedocument hoopt NAM bij te dragen aan een verdieping van de discussie over de gaswinning in Groningen. Voor de samenstelling is gebruik gemaakt van openbare bronnen, van onder meer TNO, KNMI, SBR, Deltares en het ministerie van VROM.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
1 Grondbewegingen door aardbevingen	5
1.1 Vrijkomende spanningen in de ondergrond.....	5
1.2 Magnitude.....	5
1.3 Afstand tot het epicentrum.....	5
1.4 Lokale grondgesteldheid.....	6
1.5 De EMS-1998 schaal.....	7
1.6 Classificeren van schade: het veldhandboek.....	11
2 Meten is weten	12
2.1 Waarnemen van grondbeweging en/of trillingen.....	12
2.2 KNMI seismisch monitoring netwerk.....	12
2.2.1 Meten is weten: accelerogram van de Huizingebeving van 2012	14
2.3 TNO-netwerk van gebouwensensoren.....	15
3 Gebouwschade als gevolg van gaswinning	17
3.1 Trillingen in gebouwen.....	17
3.2 Trillingen in gebouwen boven het Groningen gasveld.....	17
3.3 Trillingsschade.....	19
3.4 SBR-trillingsrichtlijn Deel A.....	19
3.4.1 Toepasbaarheid op trillingen door aardbevingen	20
3.4.2 Het bepalen van de SBR-drempelwaarden	20
3.5 Andere mijnbouwgerelateerde gebouwschade (bodemdaling).....	22
4 Effecten van de Groningse aardbevingen	23
4.1 Kleine aardbevingen veroorzaken geen schade.....	23
4.2 Kans op schade aan gebouwen door aardbevingen.....	24
4.3 Effectgebied.....	27
4.4 Mate van schade.....	30
5 Reageren	32
6 Literatuurverwijzingen	33

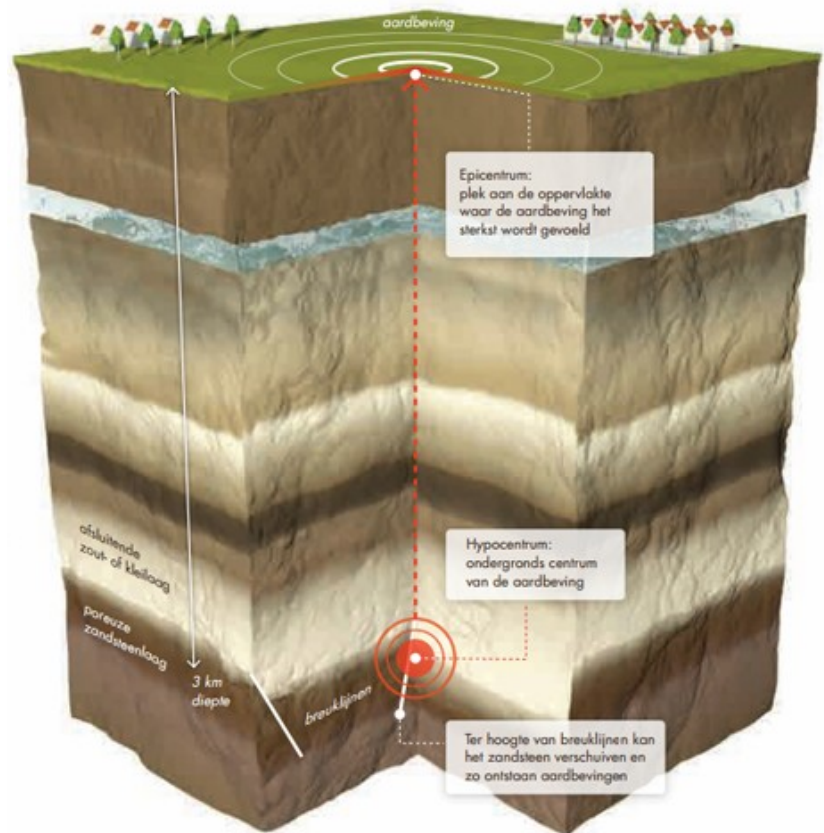
1 Grondbewegingen door aardbevingen

1.1 Vrijkomende spanningen in de ondergrond

Aardgas bevindt zich in een poreuze zandsteenlaag op ongeveer drie kilometer diepte. Als het gas uit deze laag wordt gehaald krimpt de bodem. Deze krimp is echter niet overal even sterk. Dit kan spanningen in de (diepe) ondergrond veroorzaken. Wanneer deze spanning vrijkomt, is sprake van een aardbeving – met trillingen aan het aardoppervlak als gevolg.

De grondbeweging vormt de drijvende kracht achter aardbevingsschade aan gebouwen. De intensiteit van deze grondbeweging wordt grotendeels bepaald door drie factoren:⁴

1. Magnitude, ofwel de hoeveelheid vrijkomende energie;
2. Afstand tot het epicentrum;
3. Lokale grondgesteldheid.



1.2 Magnitude

In 1935 ontwierp de Amerikaanse seismoloog Charles Richter (1900-1985) zijn later beroemd geworden magnitudeschaal. De magnitude geeft de kracht van een aardbeving weer en wordt uitgedrukt in eenheden op de schaal van Richter. De magnitude wordt berekend aan de hand van de grootte van de uitslagen op een seismogram (een opname van de beweging over tijd)¹. De schaal van Richter is logaritmisch. Het verband

tussen de vrijkomende energie E in Joule en de magnitude M wordt gegeven door de formule:

$$M = \frac{2}{3} \log\left(\frac{E}{2}\right) - 3$$

In deze formule ligt besloten dat met elke eenheid meer op de magnitudeschaal de vrijkomende hoeveelheid energie ruim dertig keer² zo groot wordt. De magnitude van de aardbeving bij Huizinge in 2012 bedraagt 3.6. Dat is 250 keer sterker dan een aardbeving met magnitude 2.0; 1.500 keer sterker dan een aardbeving met magnitude 1.5; en maar liefst 8.000 keer sterker dan een aardbeving met magnitude 1.0.

¹ Paragraaf 2.2.1 geeft een voorbeeld van een accelerogram. Hier is de versnelling van de grond door de aardbeving uitgezet tegen de tijd.

² De vrijkomende hoeveelheid energie is bij benadering proportioneel met de amplitude (de 'maximale uitslag') tot de macht 3/2. Dat betekent dat bij een 10 keer zo grote amplitude (wat overeenkomt met één eenheid op de magnitude schaal) de vrijkomende energie $10^{3/2} = 31.6$ maal zo groot is.

1.3 Afstand tot het epicentrum

De afstand tot het epicentrum is de tweede bepalende factor voor de intensiteit van de groundbeweging. Bij een aardbeving komt energie vrij. Hierdoor ontstaan seismische golven. Een fysische eigenschap van alle golven is dat zij met het toenemen van de afgelegde afstand aan kracht inboeten. In het geval van seismische golven gebeurt dit via geometrische spreiding en absorptie (d.w.z. demping) in de grond.⁵ Seismische golven worden onderverdeeld in seismische *oppervlaktegolven* die aan de oppervlakte van de aarde bewegen en seismische *body-golven* die door de aarde bewegen.

De eerstgenoemde categorie van seismische oppervlaktegolven (ook bekend als Raleigh en Love golven) veroorzaakt bij tektonische (d.w.z. natuurlijke) aardbevingen vaak schade op grotere afstand van het epicentrum. Voor de aardbevingen in Groningen spelen oppervlaktegolven echter geen rol van betekenis.⁶ Dat komt door de lagere magnitudes in Groningen en de geringe diepte waarop in Groningen de aardbevingen plaatsvinden, waardoor de afstand tussen het epicentrum en gebouwen kort is.⁷

Bij de tweede categorie van seismische body-golven wordt gewoonlijk een verder onderscheid gemaakt tussen *primaire golven* (pressure waves of P-waves, plaatje A) en *secundaire golven* (Shear-waves of S-waves, plaatje B). Primaire golven doen de grond trillen in de richting waarin de golf zich voortbeweegt. Deze golven bewegen het snelst en worden bij een aardbeving als eerste gevoeld. P-golven veroorzaken in de regel weinig schade. De tweede categorie van body-golven zijn de S-golven. Deze staan loodrecht op de richting waarin de golf zich voortbeweegt en schudden de grond heen en weer. Het zijn deze S-golven die in de praktijk de meeste schade aan gebouwen veroorzaken. Ook in Groningen is dat het geval.

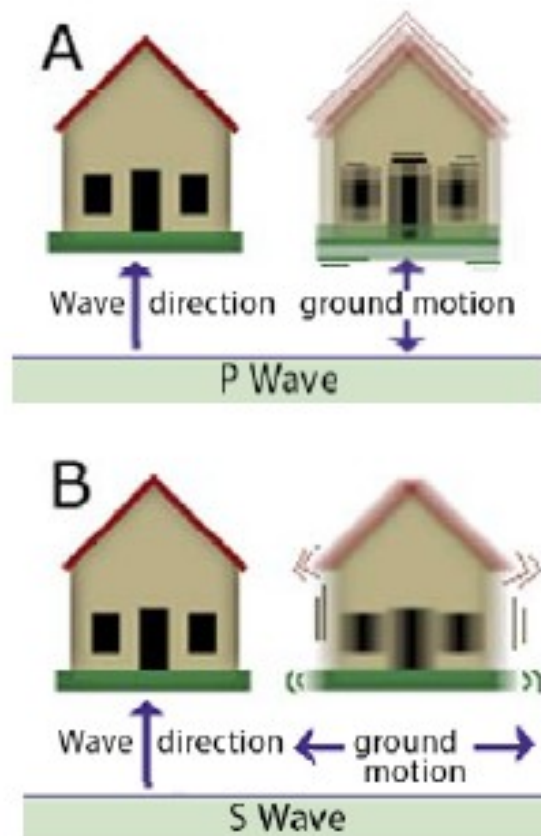


Figure 1: House Shake Motion

- A:** *P waves, or compressional waves, are seismic body waves that shake the ground back and forth in the direction that the wave is moving. P waves travel fastest and are generally felt first. They usually cause very little damage.*
- B:** *S, or secondary waves or shear waves, are seismic body waves that shake the ground back and forth perpendicular to the direction the wave is moving.*

1.4 Lokale grondgesteldheid

De lokale grondgesteldheid (d.w.z. de situatie waarin de ondiepe ondergrond zich bevindt) is de derde bepalende factor voor de intensiteit van de groundbeweging. Trillingen kunnen in de bovenste meters van de bodem worden 'opgeslingerd'. Dat gebeurt vooral als de grond uit los materiaal bestaat. Dit is in delen van Groningen het geval. De mate van 'opslingering' is afhankelijk van onder meer de trillingsintensiteit en frequentie, de schuifgolfsnelheid (bijvoorbeeld in de toplaag van 30 meter, V_{s30}) en de duur van de trilling.⁸

Recente analyses laten zien dat de invloed van lokale grondgesteldheid op gebouwenschade fors achterblijft bij de impact van de magnitude en de afstand van een gebouw tot het epicentrum⁹. Wel is het mogelijk dat op

specifieke locaties de ondiepe ondergrond veranderd is door menselijk ingrijpen in de ondiepe ondergrond. Daarbij gaat het onder meer om kanalen, terpen en wierden. Er vindt momenteel nader onderzoek plaats naar de impact hiervan op schade aan gebouwen.¹⁰

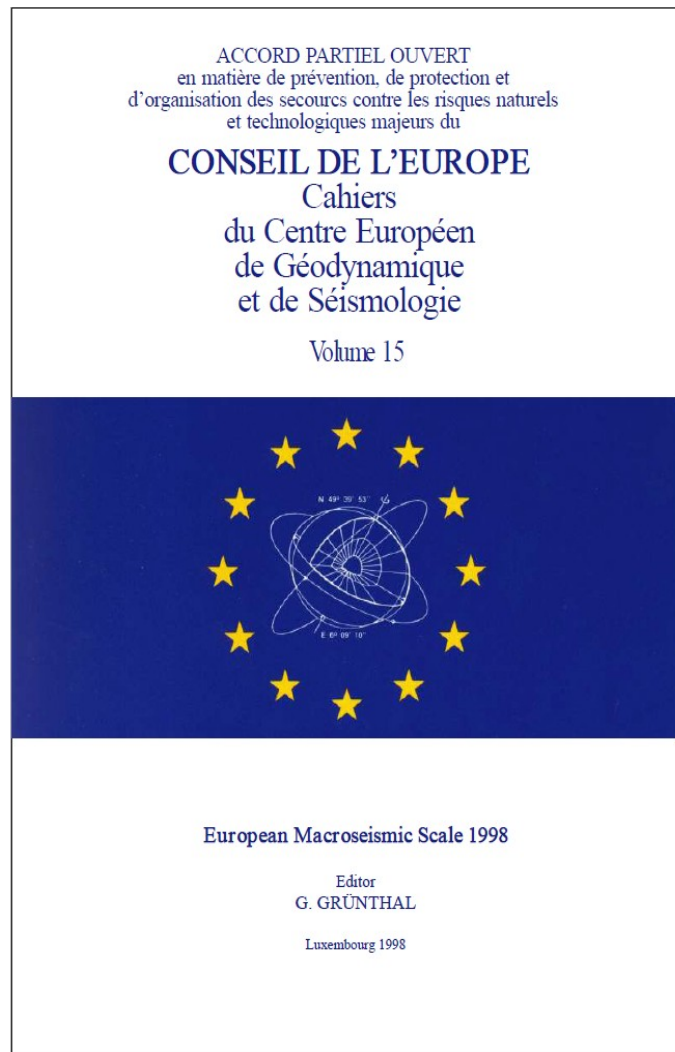
1.5 De EMS-1998 schaal

De *European Seismological Commission* (ESC) is een commissie van de *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior* (IASPEI), die verbonden is aan de *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG). Doel van het ESC is om seismologische studies en projecten te bevorderen. Men richt zich daarbij op Europa en haar directe omgeving (o.a. de Oeral en Noord-Afrika).

Aan het eind van de jaren tachtig besloot de ESC om een Europese Macroseismische Schaal (EMS) te ontwikkelen voor het meten van de impact van aardbevingen en daaruit voortvloeiende trillingen op mensen en gebouwen. Mede dankzij een jarenlange testperiode is deze intensiteitsschaal inmiddels uitgegroeid tot een internationale standaard. De huidige versie van de schaal staat bekend onder de naam *EMS-98*.

EMS-98 is bewust ontworpen om de samenwerking tussen seismologen en ingenieurs te bevorderen, in plaats van enkel door seismologen te worden gebruikt. De intensiteitsschaal bevat een gedetailleerde handleiding, met richtlijnen, illustraties en praktijkvoorbeelden.


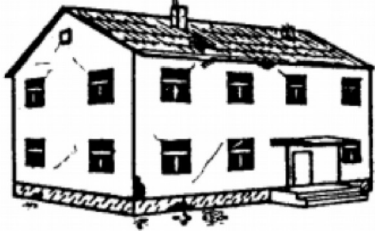



De EMS-98-schaal kent twaalf intensiteitsniveaus, lopend van 'niet gevoeld' tot 'volledig verwoestend'. Op de volgende pagina staan de eerste zes niveaus van EMS-98 vermeld, met voor elk niveau een overzicht van de bijbehorende effecten op respectievelijk mensen, objecten & natuur en gebouwen.



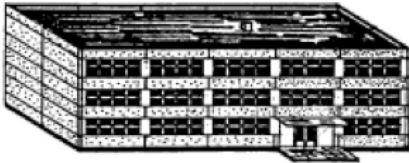
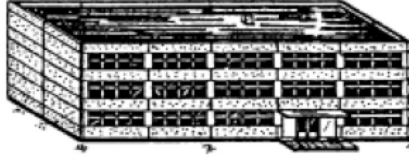
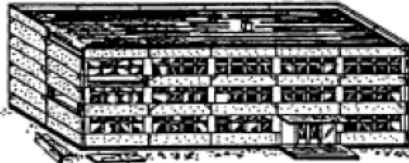
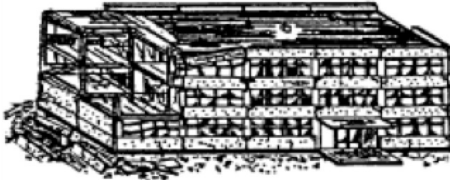

Voorpagina van de European Seismic Scale 1998, door de Europese Seismologische Commissie (G. Grünthal), 1998.

Eerste zes EMS98-niveaus van aardbevingsintensiteit	Effect op mensen	Effect op objecten en natuur	Effect op gebouwen
I – Niet gevoeld	Niet gevoeld, zelfs niet onder de meest gunstige omstandigheden.	Geen effect.	Geen schade
II – Nauwelijks gevoeld	De aardbeving is alleen gevoeld in enkele gevallen (<1%) door individuen in rust op een bijzonder ontvankelijke positie binnen een gebouw.	Geen effect.	Geen schade.
III – Zwak	De aardbeving is gevoeld door enkele mensen in gebouwen. Mensen die stil staan voelen een slingerende beweging of een zwak beven.	Hangende objecten slingeren een beetje.	Geen schade.
IV – Voornamelijk waargenomen	De aardbeving wordt binnen gevoeld door velen, maar buiten door enkelen. Een paar mensen worden wakker. Het trillingsniveau is niet beangstigend. Een zwak trillen of slingeren van gebouw, kamer, stoel of bed wordt waargenomen.	Aardewerk, glazen, ramen en deuren rammelen. Hangende objecten zwaaien. Lichte meubelen trillen in sommige gevallen. Houtwerk kraakt in enkele gevallen.	Geen schade.
V – Sterk	De aardbeving wordt door velen binnenshuis gevoeld, buiten door weinigen. Een paar mensen zijn bang en rennen buiten. Veel slapende mensen worden wakker. Waarnemers voelen een sterk schudden of schommelen van het hele gebouw, kamer of meubilair.	Hangende voorwerpen slingeren aanzienlijk. Aardewerk en glazen schudden tegen elkaar aan. Kleine, zware en/of balancerende objecten kunnen verschoven worden of vallen. Deuren en ramen zwaaien open of dicht. In een paar gevallen breken vensterramen. Vloeistoffen gaan heen en weer en kunnen uit goed gevulde containers klotsen. Dieren binnenshuis kunnen ongemakkelijk worden.	Schade klasse 1 (Damage State I; cosmetische schade) aan een paar zwakkere gebouwen (gebouwen in kwetsbaarheidsklasse A of B.)
VI – Licht beschadigend	Gevoeld door de meeste binnen en buiten. Een paar personen verliezen hun balans. Veel mensen zijn bang en rennen naar buiten.	Kleine voorwerpen met een gewone stabiliteit kunnen vallen en meubels kunnen verschoven raken. In een aantal gevallen kunnen borden en glaswerk breken. Boerderijdieren (zelfs buiten) kunnen bang zijn.	Schadeklasse 1 (Damage State I; cosmetische schade) wordt veroorzaakt aan veel gebouwen van kwetsbaarheidsklassen A en B. Een paar gebouwen in kwetsbaarheidsklasse A en B lijden schade van Schadeklasse 2; een paar gebouwen van kwetsbaarheidsklasse C lijden schade van Schadeklasse 1.

EMS-98 maakt het mogelijk om waargenomen aardbevings schade aan gebouwen te classificeren. Schade aan gebouwen wordt binnen EMS-1998 beoordeeld aan de hand van een schade classificatie. Dit gebeurt voor twee hoofd categorieën: metselwerk gebouwen (*unreinforced masonry buildings*) en gebouwen van gewapend beton (*reinforced concrete buildings*). De beide plaatjes hieronder geven voor elk van de hoofd categorieën de bijbehorende schade classificatie. Deze classificaties worden in de figuren aangeduid als *grade*; in de praktijk zijn ze beter bekend als *damage state* (Nederlands: schade klasse).

Classification of damage to masonry buildings	
	<p>Grade 1: Negligible to slight damage (no structural damage, slight non-structural damage) Hair-line cracks in very few walls. Fall of small pieces of plaster only. Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.</p>
	<p>Grade 2: Moderate damage (slight structural damage, moderate non-structural damage) Cracks in many walls. Fall of fairly large pieces of plaster. Partial collapse of chimneys.</p>
	<p>Grade 3: Substantial to heavy damage (moderate structural damage, heavy non-structural damage) Large and extensive cracks in most walls. Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual non-structural elements (partitions, gable walls).</p>
	<p>Grade 4: Very heavy damage (heavy structural damage, very heavy non-structural damage) Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.</p>
	<p>Grade 5: Destruction (very heavy structural damage) Total or near total collapse.</p>

Classificatie van schade aan metselwerk gebouwen volgens EMS-98. Illustratie afkomstig uit EMS-98, European Seismological Commission, 1998.

Classification of damage to buildings of reinforced concrete	
	<p>Grade 1: Negligible to slight damage (no structural damage, slight non-structural damage) Fine cracks in plaster over frame members or in walls at the base. Fine cracks in partitions and infills.</p>
	<p>Grade 2: Moderate damage (slight structural damage, moderate non-structural damage) Cracks in columns and beams of frames and in structural walls. Cracks in partition and infill walls; fall of brittle cladding and plaster. Falling mortar from the joints of wall panels.</p>
	<p>Grade 3: Substantial to heavy damage (moderate structural damage, heavy non-structural damage) Cracks in columns and beam column joints of frames at the base and at joints of coupled walls. Spalling of concrete cover, buckling of reinforced rods. Large cracks in partition and infill walls, failure of individual infill panels.</p>
	<p>Grade 4: Very heavy damage (heavy structural damage, very heavy non-structural damage) Large cracks in structural elements with compression failure of concrete and fracture of rebars; bond failure of beam reinforced bars; tilting of columns. Collapse of a few columns or of a single upper floor.</p>
	<p>Grade 5: Destruction (very heavy structural damage) Collapse of ground floor or parts (e. g. wings) of buildings.</p>

Classificatie van schade aan gewapend beton gebouwen volgens EMS-98. Illustratie afkomstig uit EMS-98, European Seismological Commission, 1998.

Deze kwalitatieve beschrijvingen vormen een zeer nuttig, praktisch en algemeen geaccepteerd classificatiesysteem voor waargenomen aardbevingschade aan gebouwen. EMS-98 vormt ook in Nederland een belangrijke bouwsteen voor de besluitvorming ten aanzien van aardbevingen en de daardoor veroorzaakte schade. EMS-98 vervult mede daardoor een belangrijke rol in zowel het Winningsplan 2016 als het instemmingsbesluit van de minister. Ook figureert EMS-98 prominent in tal van andere relevante wetenschappelijke studies.

1.6 Classificeren van schade: het veldhandboek

Om de classificatie van aardbevings schade te vergemakkelijken heeft de *European Commission Joint Research Centre* (JRC) een speciaal veldhandboek opgesteld voor de evaluatie van schade aan gebouwen na aardbevingen. Met dit veldhandboek in de hand kunnen gebouwen eenduidiger worden toegewezen aan de hoofdcategorieën 'metselwerk' of 'gewapend beton'. Voorts wordt het zo eenvoudiger om waargenomen schade daarna eenduidig toe te wijzen aan een van de vijf onderscheiden schadeklassen (damage states). Dat gebeurt aan de hand van een standaardformulier. Verder bevat het handboek voorbeeldfoto's van beschadigde gebouwen met de bijbehorende schadeklasse. Het veldhandboek richt zich vooral op de hogere schadeklassen (zo ontbreekt een typerend voorbeeld van schade behorend bij de laagste schadeklasse 1 (DS1)).

Deze zeer praktische methode laat echter nog steeds ruimte voor verschillende interpretaties. Daarom vindt op dit moment aanvullend onderzoek plaats. Dit onderzoek richt zich op het verder vergroten van de eenduidigheid van de classificatie van waargenomen schade naar de vijf schadeklassen.

JRC Scientific and Technical Reports

Field Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES)

Carlo BAGGIO, Alberto BERNARDINI, Riccardo COLOZZA
Livio CORAZZA, Marianna DELLA BELLA, Giacomo DI PASQUALE, Mauro DOLCE
Agostino GORETTI, Antonio MARTINELLI
Giampiero ORSINI, Filomena PAPA, Giulio ZUCCARO

Translation from Italian: Maria ROTA and Agostino GORETTI

Editors: Artur V. PINTO, Fabio TAUCER



EUR 22898 EN - 2007



Voorpagina van het veldhandboek Field Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term counter measures (AeDEA) by the European Commission Joint Research Centre (JRC), 2007.

2 Meten is weten

2.1 Waarnemen van grondbeweging en/of trillingen

Onderzoek laat zien dat de grenswaarde waarboven trillingen door mensen worden gevoeld afhankelijk is van de frequentie en richting van de trilling. Bij het waarnemen van trillingen spelen ook indirecte effecten een rol, zoals het horen van het 'rammelen van de servieskast'. Onderzoek laat tevens zien dat een eenmaal gevoelde trilling door mensen verschillend kan worden ervaren. Zo is de mate van hinder die mensen van trillingen ervaren mede afhankelijk van de soort blootstelling (bijvoorbeeld incidenteel of continu) en de situatie waarin die persoon zich bevindt (bijvoorbeeld of iemand zit of staat, in rust is of actief iets doet, en of er veel of weinig achtergrondactiviteiten zijn).

Het herhaald waarnemen van trillingen (zowel direct als indirect), leidt er vaak toe dat mensen ook geloven dat deze daadwerkelijk schadelijk zijn voor hun huis. Echter, er is gebleken dat zolang trillingen beneden een bepaald drempelniveau blijven deze trillingen geen schade aan gebouwen veroorzaken, ook niet als sprake is van herhaalde trillingen.¹¹ Mensen zijn dus 'gevoeliger' voor trillingen dan gebouwen.

Voor een objectieve beoordeling van grondbewegingen en hun effecten zijn betrouwbare metingen nodig. Dit is de reden waarom de afgelopen jaren fors in Groningen is geïnvesteerd om meer en betere informatie te kunnen vergaren over trillingen. Zo zijn het meetnet (zie paragrafen 2.2 en 2.3 hieronder voor een beschrijving) en de bijbehorende instrumenten aanzienlijk uitgebreid. Compactie, bodemdaling, aardbevingen, grond- en gebouwbewegingen kunnen daardoor veel nauwkeuriger worden gemeten dan nog maar enkele jaren geleden. Het *Study and Data Acquisition Plan*¹² bevat een overzicht van deze meetinstrumenten. Inmiddels is Groningen op dit gebied het best bemeten stukje aarde.

De belangrijkste data voor de schadebeoordeling* zijn afkomstig van het KNMI en TNO. Deze meetgegevens zijn volledig onafhankelijk en worden hieronder beschreven.

2.2 KNMI seismisch monitoring netwerk

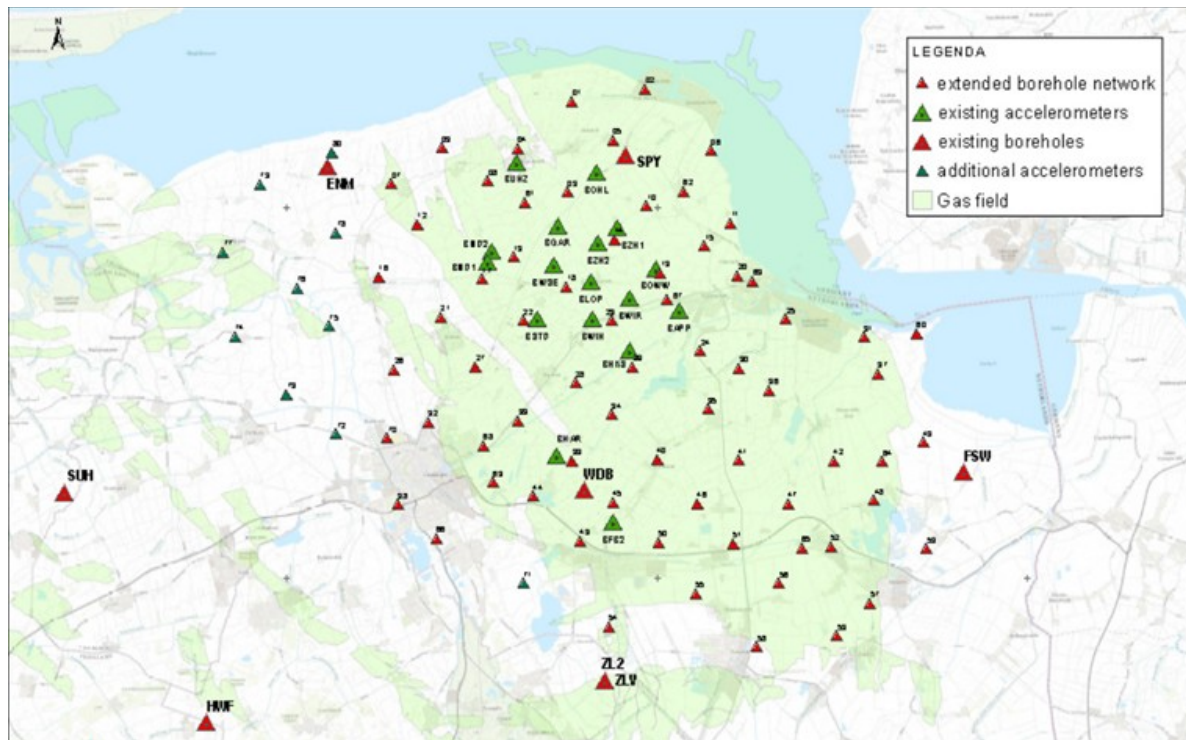
Het KNMI is de nationale autoriteit op het gebied van seismologie. Het KNMI beschikt over een uitgebreid netwerk van seismometer-stations om zo de seismiciteit in en rond Nederland en Caribisch Nederland te kunnen meten. Het netwerk bestaat uit *broadband* seismometers, geofoons in ondiepe boorgaten (van ongeveer 200 meter diepte) en versnellingsmeters aan het grondoppervlak.¹³



* Voor het beoordelen van eventuele overlast door trillingen wordt in Nederland gebruik gemaakt van de SBR-trillingsrichtlijn met betrekking tot hinder voor personen in gebouwen. Dit informatiedocument gaat hier niet verder op in aangezien de duur van trillingen als gevolg van aardbevingen vele malen korter is dan die van andere trillingen waar de SBR-trillingsrichtlijn zich op richt.

Locaties van KNMI-meetwerk in Nederland (links) en Caribisch Nederland (rechts). In blauw de locaties van de broadband seismometers; in groen de geofoons in boorgaten, en in oranje de versnellingsmeters aan het grondoppervlak.

In het volgende plaatje wordt verder ingezoomd op het Groningen gasveld.



Groningen: uitbreiding van het KNMI-netwerk in Noord-Nederland

De seismische waarnemingen van het KNMI vormen de basis van alle inzichten in aardbevingen in Groningen. Het KNMI gebruikt deze waarnemingen onder meer voor de berekening van het epicentrum van de verschillende aardbevingen. Het KNMI doet dit onafhankelijk van derden, inclusief NAM. Tot nu toe zijn er elf aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan 3,0 op de schaal van Richter; 87 hadden een kracht tussen de 2,0 en 3,0.

Het KNMI stelt zijn meetgegevens publiekelijk beschikbaar voor onderzoekers en andere geïnteresseerden. Het KNMI doet dit via zijn website. Daar is ook veel andere interessante informatie te vinden.¹⁴



Het KNMI heeft sinds oktober 2015 drie services opgesteld die toegang geven tot seismologische data van het KNMI-netwerk en daarvan afgeleide producten.

1. **Seismisch en akoestisch data portaal:** een gebruiksvriendelijke interface met event informatie en de ruwe data van de seismologische meetstations van het KNMI.
2. **Rapid Raw Strong Motion portaal voor Nederland:** Een meer specialistische interface, voor met name wetenschappers en ingenieurs, naar ruwe acceleratie data en daarvan afgeleide "Peak Ground Accelerations" (PGA) waarden.
3. **FDSN web services:** een technische interface, met name voor ontwikkelaars en onderzoekers, in de vorm van de FDSN-webservices.
4. **Hazard map:** hazard map per locatie in Groningen

Hieronder volgt een korte beschrijving en de link naar deze 4 data services.



Op deze pagina zijn links te vinden naar de aardbeving-catalogus van Nederland, in verschillende formaten. Deze files worden automatisch geüpdate, wanneer er een nieuwe aardbeving heeft plaatsgevonden.

Getuigde bevingen

- [all_inhoud.json](#)
- [all_inhoud.csv](#)
- [all_inhoud.kml](#)
- [all_inhoud.pdf](#)

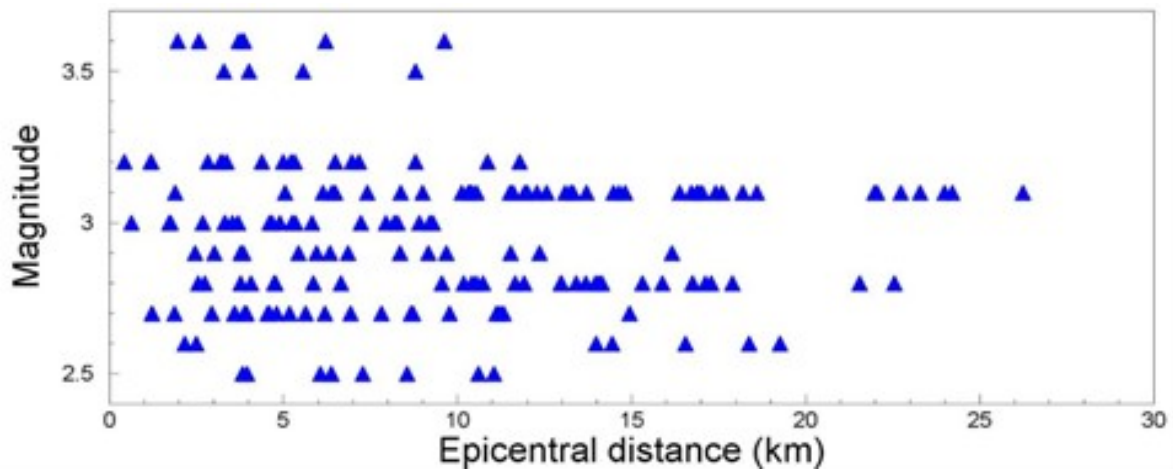
Tektonische bevingen in en rondom Nederland

- [all_sectonic.json](#)
- [all_sectonic.csv](#)
- [all_sectonic.kml](#)
- [all_sectonic.pdf](#)

KNMI-website

De metingen van het KNMI bestrijken alle grondbewegingen. De volgende figuur bevat alle door een Groningse KNMI-geofoon tot dusver geregistreerde aardbevingen vanaf magnitude 2,5 (verticale as). De hoogst geregistreerde magnitude bedraagt 3,6 (de Huizingebeving uit 2012), dit is de waarde aan het uiteinde van de

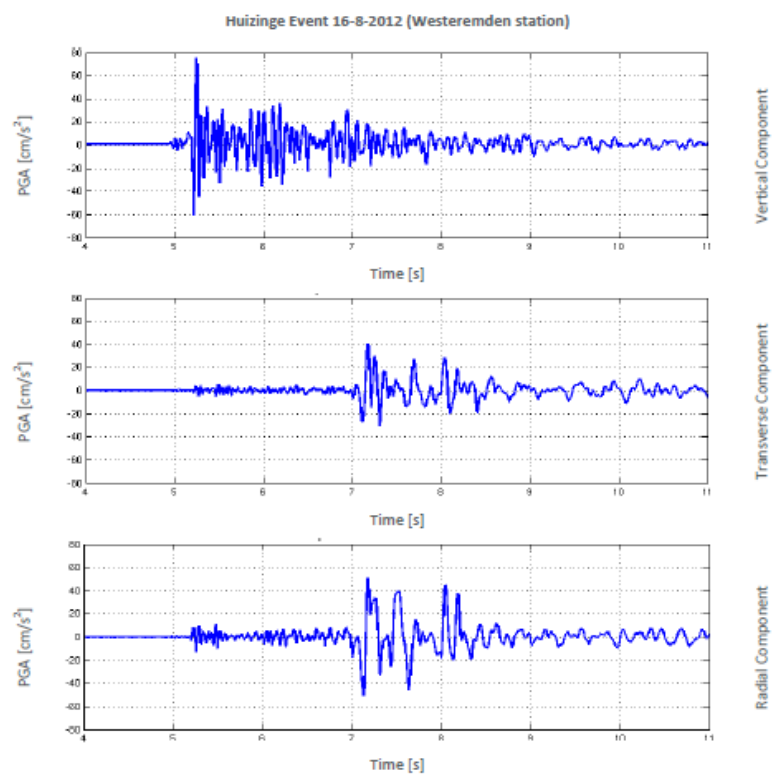
y-as. De horizontale x-as laat een spreiding zien van 0 tot 27 kilometer afstand van de epicentra van de geregistreerde aardbevingen.



Aan de hand van deze gegevens kan voor elke locatie de groundbeweging als gevolg van een aardbeving op betrouwbare wijze worden vastgesteld. Dit betekent ook dat voor elke locatie in en om het Groningen gasveld bekend is in welke mate de grond heeft getrild. De verwachting is dat in de toekomst bewoners vrijwel onmiddellijk na een aardbeving over deze informatie kunnen beschikken. Op basis daarvan zal het mogelijk worden bewoners snel te informeren over de vraag of hun woning wel of niet in het effectgebied van een aardbeving staat – en of zij wel of niet rekening moeten houden met de mogelijkheid van schade aan hun woning als gevolg van deze specifieke aardbeving.

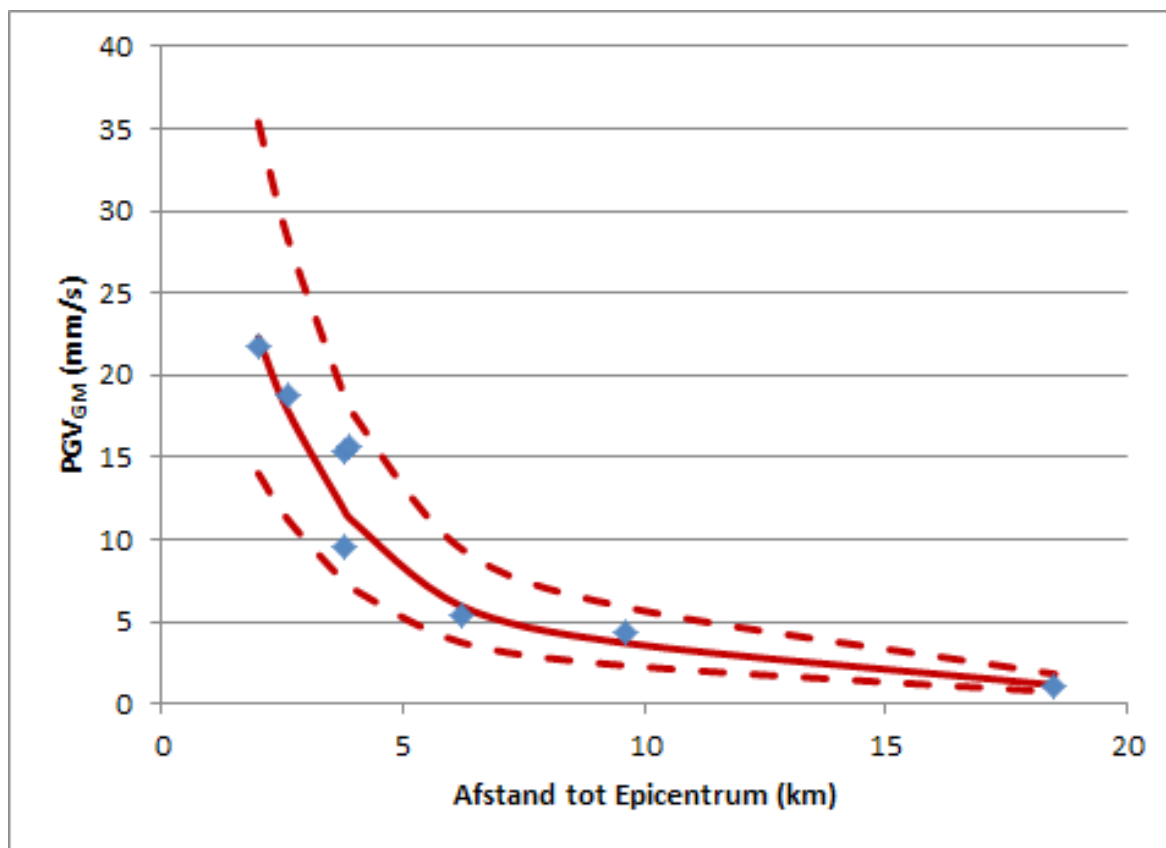
2.2.1 Meten is weten: accelerogram van de Huizingebeving van 2012

De figuur hiernaast is een zogeheten ‘accelerogram’. Het toont het door de versnellingsmeter bij Westeremden vastgelegde signaal van de aardbeving van Huizinge van 16 augustus 2012. Het accelerogram bevat de hoogste grondversnelling die tot nu toe in het hele Groningen gasveld is gemeten. Bovenaan zien we de verticale component van de versnelling, in het midden de transversale component (d.w.z. in de richting vanaf het epicentrum) van de versnelling en onderaan de loodrechte (d.w.z. op de lijn van het epicentrum) component. Het accelerogram laat tevens zien dat de Huizingebeving enkele seconden heeft geduurd. Dat is een groot verschil met natuurlijke (tektonische) aardbevingen die soms wel minutenlang kunnen doorgaan.



Accelerogram aardbeving Huizinge op 16 augustus 2012. Meting Accelerogram aardbeving Huizinge op 16 Augustus 2012. Meting verricht door de versnellingsmeter nabij Westeremden (niet ver van het epicentrum).

Het KNMI doet in zijn rapport *The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen)* verslag van metingen en analyses met betrekking tot de Huizingebeving.¹⁵ De figuur hieronder bevat de metingen van acht versnellingsmeters, aangegeven door de blauwe ruiten.



Gemeten piekgrondsnelheid (Peak Ground Velocity, PGV) in acht versnellingsmeter-stations gedurende de Huizingebeving. De verwachtingswaarde wordt weergegeven door de rode lijn. De onderbroken lijnen geven de onzekerheden rond de verwachtingswaarde weer.

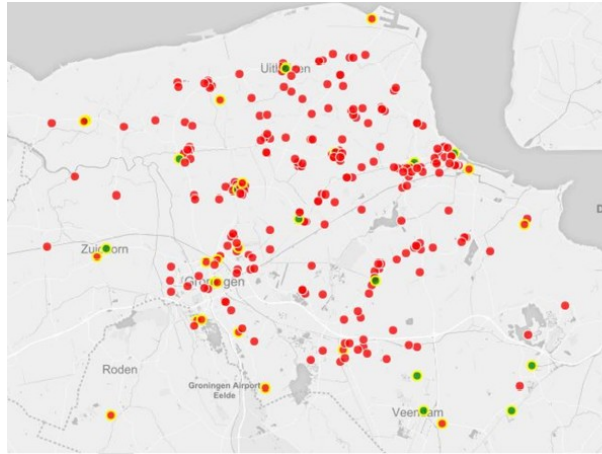
De figuur maakt duidelijk dat de piekgrondsnelheid conform de verwachting (zie paragraaf 1.3) sterk afneemt naarmate de afstand tot het epicentrum toeneemt. Binnen 5 kilometer afstand van het epicentrum blijkt de piekgrondsnelheid reeds gehalveerd.

2.3 TNO-netwerk van gebouwensensoren

Boven het Groningen gasveld is ook een aantal versnellingsmeters geïnstalleerd in en aan de funderingen van gebouwen. Deze zogeheten gebouwensensoren maken het mogelijk om de grondsnelheid in gebouwen zelf te meten. Deze installatie is gebeurd volgens de eisen van de Stichting Bouwresearch (SBR). Op dit moment zijn er al meer dan 300 gebouwensensoren in Groningen. Dit netwerk wordt beheerd door TNO. TNO is tevens verantwoordelijk voor de verwerking en analyse van de meetgegevens.

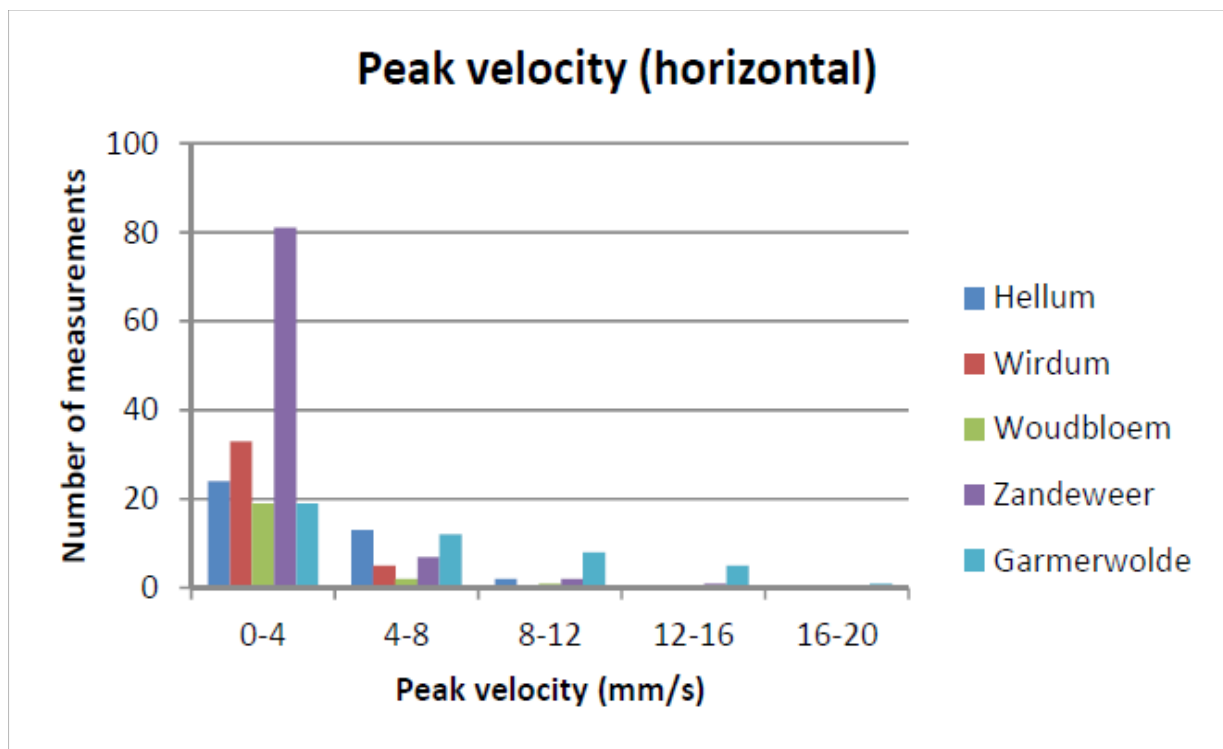


Vibration monitoring system. Links de gebouwen-sensor-recorder en rechts de gebouwen-sensor zelf.



Geïnstalleerde gebouwsensoren per november 2015

Onderstaande figuur bevat de resultaten van een analyse uitgevoerd door TNO. Deze betreffen alle aardbevingen waarin de gebouwsensoren een pieksnelheid van 1 millimeter per seconde of meer aangaven én waarbij sprake was van een magnitude van 2.5 of meer op de schaal van Richter. De gemeten pieksnelheid is opgedeeld in intervallen van steeds 4 mm/s. Het staafdiagram laat zien dat het merendeel van de waarnemingen in het interval met de laagste pieksnelheid valt (<4 mm/s). De hoogste pieksnelheid was 16.1 mm/s, bij de aardbeving van Garmerwolde in 2015.¹⁶



Pieksnelheid (horizontaal) van getriggerde gebouwsensoren voor de vijf opgetreden aardbevingen.

3 Gebouwschade als gevolg van gaswinning

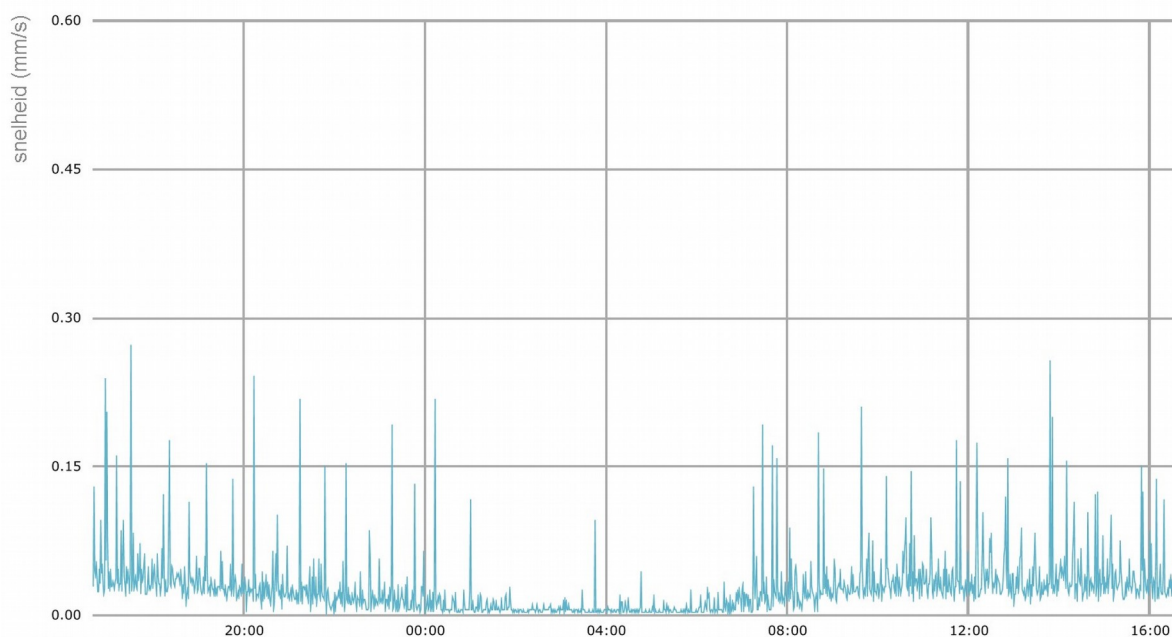
3.1 Trillingen in gebouwen

Elk huis trilt als gevolg van normaal gebruik. Dat gebeurt onder andere door mensen die door het huis heen lopen, deuren die dichtslaan, de wasmachine die heen en weer schudt of kinderen die tegen een muurtje voetballen. Dergelijke trillingen door interne bronnen die samenhangen met het beoogde gebruik van een gebouw vallen binnen het ontwerp van dat gebouw. Zij worden echter zelden expliciet bij het ontwerp betrokken, omdat het voldoen aan andere eisen die aan de constructie worden gesteld (bijvoorbeeld een voldoende stijfheid van vloeren) doorgaans een goed functioneren onder deze dynamische belastingen met zich mee brengt.

Trillingen kunnen ook van buiten het gebouw komen. Daarbij kan men denken aan een vrachtwagen die door de straat rijdt, aan hei- en bouwactiviteiten of aan de knal van een straaljager die door de geluidsbarrière gaat en aardbevingen. Er zijn nog veel meer voorbeelden te geven. Omdat elk gebouw een zeker incasseringsvermogen heeft voor belastingen die buiten het ontwerp kader vallen, zijn deze trillingen niet automatisch schadelijk. Dat geldt ook voor aardbevingen.¹⁷

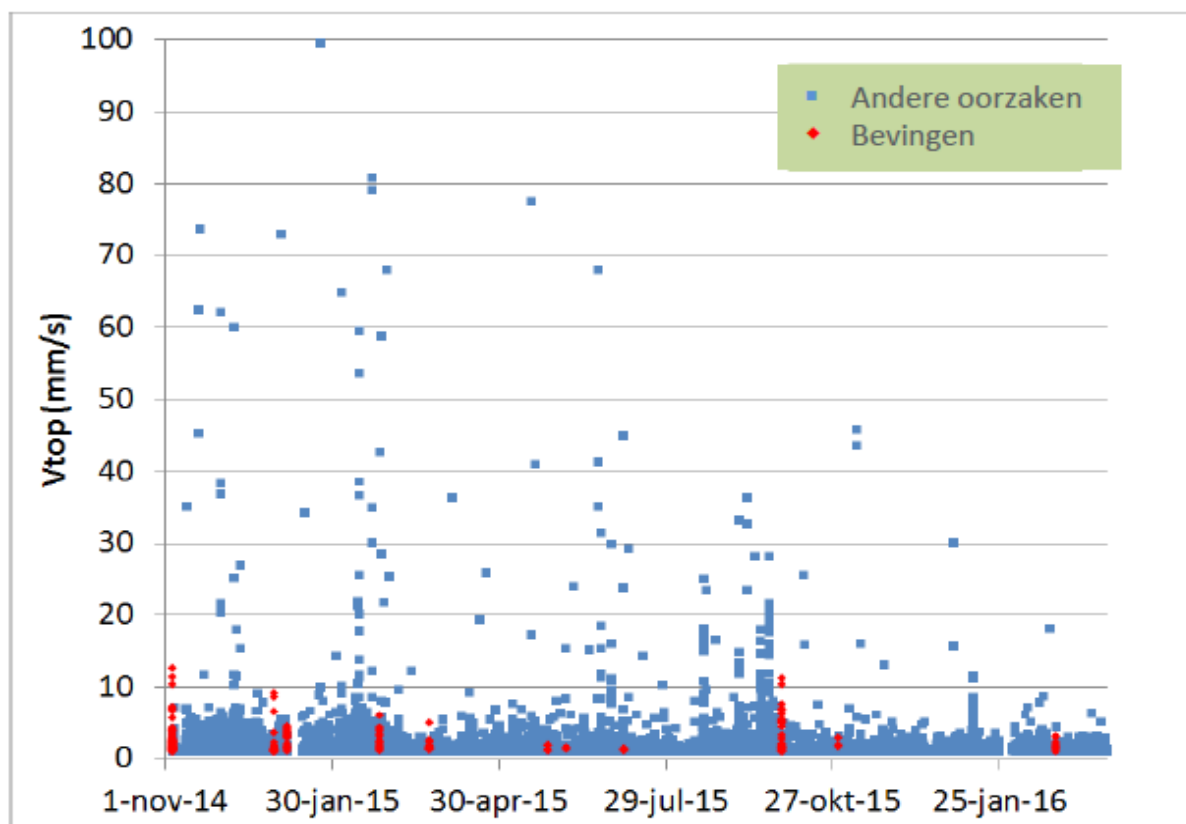
3.2 Trillingen in gebouwen boven het Groningen gasveld

De TNO-gebouwsensoren registreren alle trillingen die zich voordoen, ongeacht de vraag of deze door aardbevingen worden veroorzaakt of door andere factoren. Op www.nam.nl zijn de metingen van elk van de gebouwsensoren in openbare gebouwen live te volgen (de metingen voor de overige gebouwen, bijna allemaal woonhuizen, zijn vanwege privacyoverwegingen afgeschermd). Het plaatje hieronder toont de metingen van de gebouwsensor in het gemeentehuis van Bedum, de zogenoemde 'hartslag', op een dag zonder aardbeving. De curve laat zien dat het pand vrijwel voortdurend trilt. De metingen laten tevens zien dat de trillingen overdag een stuk groter zijn dan 's nachts, wanneer het gebouw nagenoeg leeg is. Meerdere keren per dag trilt het gemeentehuis met een snelheid van meer dan 0.2 mm/s.



Hartslag van de gebouwsensor in het gemeentehuis van Bedum op 14 en 15 juli 2017, vanaf 16:00 tot 16:00 uur. Bron: TNO. Analyses van TNO laten zien dat woonhuizen op een vergelijkbare wijze trillen.¹⁸

Hogere trillingsniveaus komen in gebouwen in Groningen geregeld voor, zoals onderstaande figuur laat zien. Dit plaatje is afkomstig uit het Winningsplan 2016.¹⁹ De rode stippen in de figuur tonen pieksnelheidsmetingen die rechtstreeks verband houden met aardbevingen. De blauwe stippen tonen pieksnelheidsmetingen verbonden aan gebeurtenissen die níet aan aardbevingen kunnen worden gerelateerd.



Pieksnelheid zoals geregistreerd door het netwerk van TNO.

Nadere analyse van de meetgegevens laat zien dat vooral bouwwerkzaamheden en verkeersactiviteit (denk aan vrachtwagens in de straat) de oorzaak zijn van sterke trillingen:

	Max (mm/sec)	Gemiddeld (mm/sec)	Mediaan (mm/sec)
Bouwwerkzaamheden	80,1	3,8	1,6
Aardbevingen	16,1	3,1	1,9
Verkeer	10,0	1,3	1,2

Drie oorzaken van trillingen in gebouwen.

Het Instituut voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies (TNO-IBBC) heeft al in de jaren tachtig van de vorige eeuw een aantal casestudies uitgevoerd. Hieruit bleek dat trillingen veroorzaakt door normaal wegverkeer, gemeten op de fundering van gebouwen, een maximale trillingsnelheid bereiken van tussen de 0,3 en 3,0 mm/s. De dominante frequentie van verkeerstrillingen ligt rond de 10 Hertz, doorgaans hetzelfde frequentiebereik als dat van aardbevingen. Deze resultaten komen overeen met vergelijkbaar Brits onderzoek naar verkeerstrillingen.²⁰

Na de constatering van trillingschade aan gebouwen is aanvullend onderzoek nodig om de precieze oorzaak daarvan vast te kunnen stellen.

3.3 Trillingsschade

De mate waarin trillingen schade aan gebouwen veroorzaken hangt af van vele factoren. Een niet-uitputtend overzicht:

- De hoeveelheid energie die is vrijgekomen; een trilling moet immers over voldoende energie beschikken om überhaupt schade te kunnen veroorzaken;
- De mate en duur van de groundbeweging ter plaatse;
- De oriëntatie van het gebouw ten opzichte van de beweegrichting (haardmechanisme);
- Type en geometrie van het huis: vrijstaand, rijtjeshuis, hoogbouw of laagbouw;
- Type fundering: op palen of staal;
- Gebruikte bouwmaterialen: beton, hout of metselwerk;
- Bouwkwiteit, vakmanschap;
- De staat van het huis: zijn er reeds bestaande gebreken?

Bij het beoordelen van schade en het bepalen van de oorzaak van de schade zijn er een aantal overwegingen:

- **Trillingen van (onderdelen van) gebouwen gaan gepaard met wisselende vervormingen en spanningen.** Dit kan tot schade leiden als de spanningen dusdanig groot zijn dat de sterkte van het onderdeel wordt overschreden. Deze schade treedt direct op en niet pas na enige tijd. Dat komt doordat de drijvende kracht voor dit schademechanisme ophoudt zodra de trilling stopt.
- **Gebouwschade ten gevolge van trillingen kan ook indirect optreden.** Dit is het geval wanneer trillingen van het gebouw of trillingen uit de omgeving leiden tot spanningswisselingen van de funderingsgrondslag van het gebouw. Dit kan leiden tot zogenaamde ‘verdichting’ van grondlagen en daarmee mogelijk tot (ongelijkmatige) zettingen van het gebouw. Dit laatste leidt tot een gewijzigde statische spanningstoestand in het gebouw, wat vervolgens weer kan leiden tot schade aan het gebouw. Er zijn twee mechanismen waarlangs indirecte trillingsschade aan gebouwen kan ontstaan. Beide zijn sterk afhankelijk van de bodemeigenschappen ter plaatse:
 1. **Zettingen van verdichtbare funderingsgrondlagen.** Dit kan leiden tot rechtstreekse zettingen van funderingselementen of tot extra negatieve kleef op funderingspalen door verdichting van zandlagen boven de funderingsgrondlaag.
 2. **Opbouw van wateroverspanningen in de funderingsgrondlaag.** Dit kan leiden tot een tijdelijk verlaagde effectieve spanning in de ondergrond. Wanneer de bodem slap is (en derhalve geen herverdelingscapaciteit heeft) kan dit leiden tot extra zetting van funderingselementen. Overigens kunnen wateroverspanningen in zandlagen binnen enkele uren na het stoppen van de trillingen weer verdwijnen.
- **Verdichting van grondlagen vergt een grote hoeveelheid energie.** Het ontstaan van zettingen als gevolg van grondverplaatsingen, bijvoorbeeld bij het ontgraven van bouwputten, is een vaak optredende oorzaak van schade aan gebouwen.
- **Zettingsschade komt veel voor in heel Nederland.** Dit onderstreept nog eens het feit dat niet alle zettingsschade het gevolg is van aardbevingen.
- **Aardbevingstrillingen moeten voldoende energie hebben om in staat te zijn om schade te veroorzaken.** Als er onvoldoende energie is, dan kan de schade niet geweten worden aan de aardbeving.²¹

3.4 SBR-trillingsrichtlijn Deel A

Er bestaan verschillende internationale normen voor het beoordelen van trillingsniveaus en hun effect op gebouwen. Voor de Groningse situatie is de meest relevante richtlijn de door SBR (Stichting Bouwresearch) in 2002 gepubliceerde richtlijn *Schade aan gebouwen Deel A uit de Meet- en beoordelingsrichtlijn: Trillingen*.²² Deze richtlijn is grotendeels gebaseerd op de Duitse norm DIN 4150 (uitgave 1999).²³ De drempelwaarden behorend bij de SBR-trillingsrichtlijn zijn rechtstreeks overgenomen uit de Duitse norm DIN 4150. (Drempelwaarden worden ook wel aangeduid als ‘grenswaarden’).²⁴ Deze vermeldt dat de drempelwaarden op basis van concrete ervaringen zijn verkregen en dat ‘compliance with this value ensures that damage will not occur.’ Zolang de trillingen onder deze drempelwaarden liggen acht de SBR-trillingsrichtlijn het ‘onwaarschijnlijk’ dat deze schade aan gebouwen kunnen veroorzaken. De kans op gebouwschade wordt op deze gronden als aanvaardbaar klein beoordeeld.

Overigens dient te worden vermeld dat zwaardere trillingen niet per se schade veroorzaken; wanneer de drempelwaarde wordt overschreden, kan alleen niet worden uitgesloten dat er schade is als gevolg van de betreffende trilling.

3.4.1 Toepasbaarheid op trillingen door aardbevingen

De Duitse DIN-norm noemt expliciet 'Erdbeben' (aardbeving) als mogelijke trillingsbron. De drempelwaarden zijn hier gewoon op van toepassing. NB: *Schwingung* = trilling; *Erdbeben* = aardbeving.

De toelichting op de SBR-trillingsrichtlijn geeft helder aan: 'De richtlijn heeft betrekking op alle trillingsbronnen, voor zover de daardoor veroorzaakte trillingen in het beschouwde frequentie-interval voorkomen'. Verder: 'Deze richtlijn heeft betrekking op de beoordeling van de invloed van de trillingssterkte in het frequentie-interval van 1 tot 100 Hz.' De dominante frequenties voor de aardbevingen in het Groningen gasveld liggen ruim binnen dit interval. Dat blijkt onder meer uit een empirische analyse door TNO van vijf aardbevingen in 2014 en 2015 in het gebied. De horizontale dominante frequenties van deze aardbevingstrillingen liggen tussen 1 en 10 Hz; de frequentie van de verticale beweging ligt tussen 1 en 15 Hz.²⁵ De SBR-trillingsrichtlijn is daarmee gewoon toepasbaar op aardbevingstrillingen in het Groningen gasveld.

5.2 Stochastische Schwingung

5.2.1 Beschreibung

Eine stochastische Schwingung kann nicht durch eine funktionale (formelmäßige) Abhängigkeit zwischen der unabhängigen Veränderlichen, der Zeit t , und der abhängigen Veränderlichen, der Größe x , beschrieben werden. Für eine stochastische Schwingung kann der Wert x der Schwingung $x(t)$ für keinen vorgegebenen Zeitpunkt t vorausberechnet werden.

ANMERKUNG 1: Die stochastischen Schwingungen werden auch als regellose Schwingungen oder Zufallsschwingungen bezeichnet. Zu den stochastischen Schwingungen gehört auch das Rauschen.

ANMERKUNG 2: Beispielsweise ist eine registrierte Schwingung nach einem Erdbeben eine deterministische Schwingung. Der noch unbekannte Zeitverlauf eines zu erwartenden Erdbebens ist eine stochastische Schwingung.

3.4.2 Het bepalen van de SBR-drempelwaarden

De drempelwaarden op basis van de SBR-trillingsrichtlijn kunnen verschillen per gebouw, afhankelijk van de constructiewijze en staat waarin het gebouw verkeert. Bij het bepalen van de van toepassing zijnde drempelwaarden voor een gebouw gaat de SBR-trillingsrichtlijn uit van de volgende driedeling:

SBR-gebouwcategorie 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 (bijvoorbeeld scheidingsconstructies), indien deze bestaan uit gewapend beton of hout;
- Draagconstructies van bouwwerken, geen gebouw zijnde, die bestaan uit metselwerk zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke.

SBR-gebouwcategorie 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 scheidingsconstructies die bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brossen steenachtige materialen.

SBR-gebouwcategorie 3

- Onderdelen van oude en monumentale gebouwen met grote cultuurhistorische waarde;

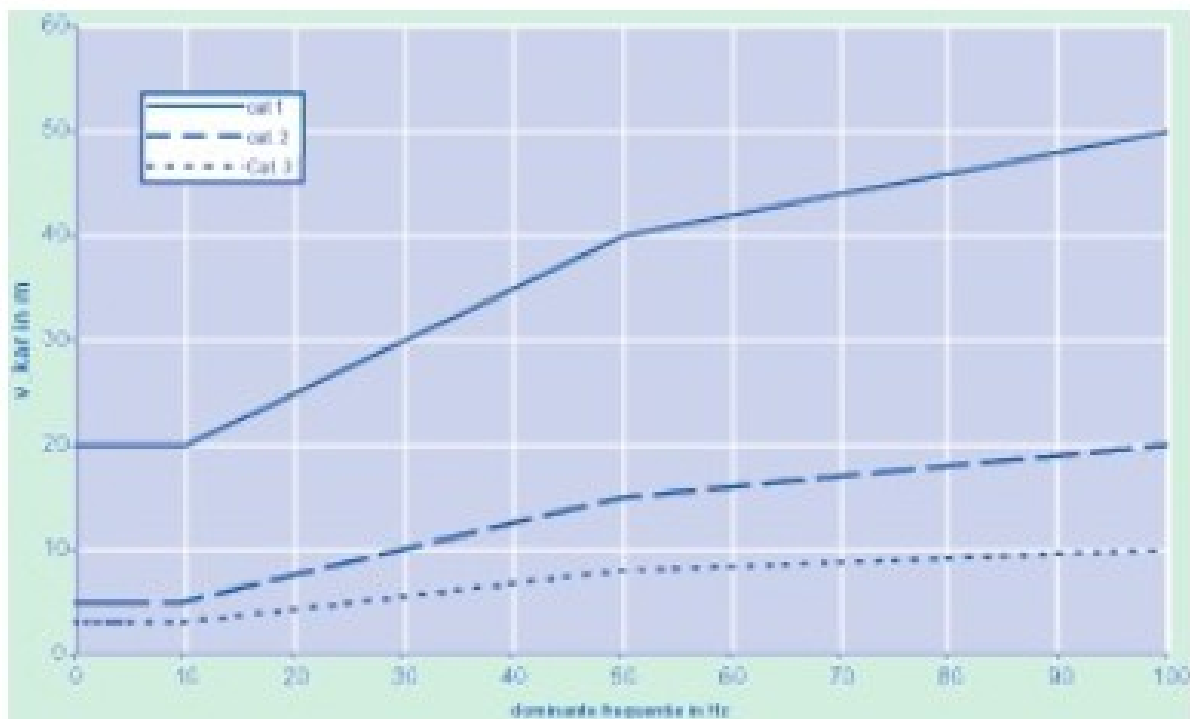
- In slechte staat verkerende gebouwen uit metselwerk of in slechte staat verkerende onderdelen van gebouwen.

Verder onderscheidt de SBR-trillingsrichtlijn drie typen trillingsbronnen:

1. Bronnen die incidenteel voorkomende kortdurende trillingen veroorzaken door een stootvormige excitatie³. Het aantal malen dat het trillingsverschijnsel voorkomt is zo gering dat vermoeiing van constructiematerialen niet kan optreden.
2. Bronnen die herhaalde kortdurende trillingen veroorzaken bij een stootvormige excitatie.
3. Bronnen die continu trillingen veroorzaken.

De aardbevingen in Groningen vallen onder type 1: trillingsbronnen die incidenteel voorkomende kortdurende (zie ook het accelerogram in par. 3.2.1) trillingen veroorzaken.²⁶

De drempelwaarde voor schade aan gebouwen conform de SBR-trillingsrichtlijn is als volgt afhankelijk van de dominante frequentie van de trilling:



Drempelwaarden volgens de SBR-trillingsrichtlijn voor directe schade. Op de x-as (horizontaal) de dominante frequentie in Hz; op de y-as (verticaal) de trillingsnelheid (V_{top}) in mm/s

In paragraaf 3.4.1 zagen we al dat TNO heeft vastgesteld dat de horizontale dominante frequenties van aardbevingstrillingen – de frequenties die er echt toe doen in termen van gebouwschade, zie ook de discussie over P en S-golven in paragraaf 1.3 – tussen 1 en 10 Hz liggen.²⁷ Uitgaande van de hoogste frequentie van 10 Hz binnen deze range kan aan de hand van figuur hierboven de SBR-drempelwaarden voor elk van de drie SBR-gebouwen categorieën worden afgeleid. De van toepassing zijnde drempelwaarde voor directe schade door aardbevingen in Groningen zien als volgt uit:

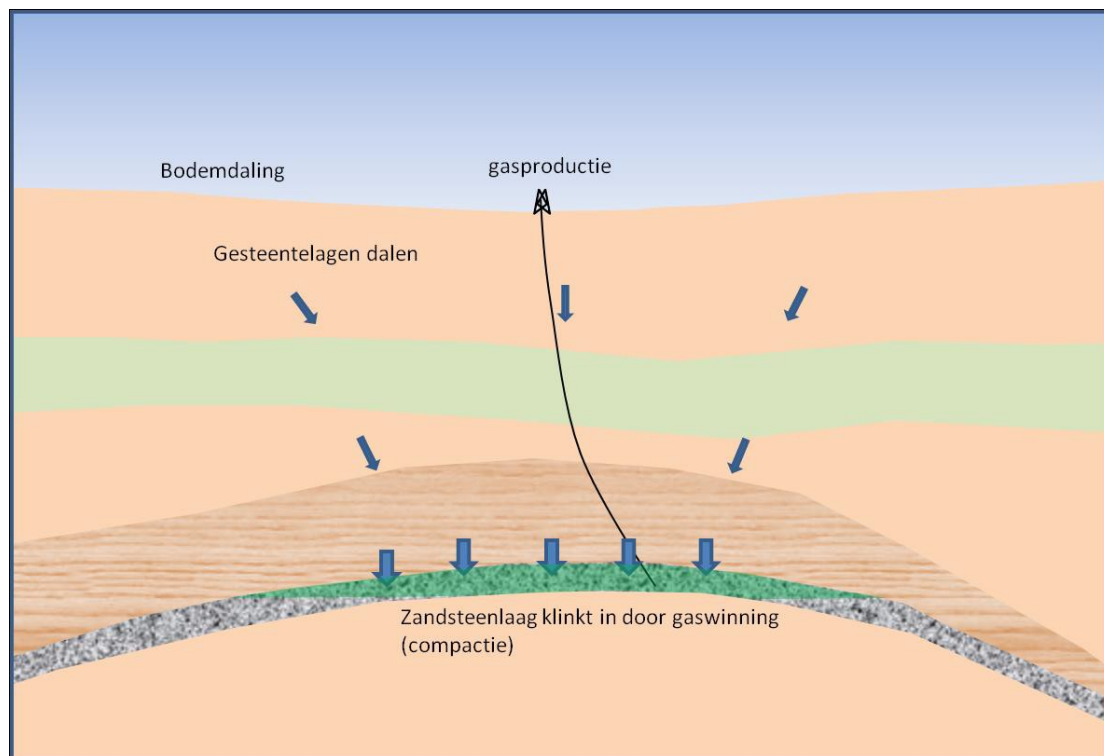
	V_{top}^*
SBR-gebouwen categorie 1	20 mm/s
SBR-gebouwen categorie 2	5 mm/s

³ Met “excitatie” wordt bedoeld op “het doorgeven van een trilling aan een ander object”. Zeg meer “aanstoten” of in trilling brengen.

Toepassing van de SBR-trillingsrichtlijn levert ook de drempelwaarden met het oog op zetting (indirecte schade). Deze zijn echter veel hoger (voor gebouwcategorie 2 en 3 wel drie tot tienmaal zo hoog) dan het frequentiegebied van aardbevingen (< ca. 10 Hz). En voor gebouwcategorie 1 is de drempelwaarde nog veel hoger. Deze drempelwaarden zijn daardoor in de praktijk niet relevant. Om die reden worden ze hier niet verder besproken.

3.5 Andere mijnbouwgerelateerde gebouwenschade (bodemdaling)

Door gaswinning daalt de bodem in een deel van de provincie Groningen. Deze bodemdaling gaat zeer langzaam en verloopt gelijkmatig over het oppervlak. De grootste bodemdaling vindt plaats in de omgeving van Loppersum. Sinds het begin van de gaswinning in 1963 is de bodem daar 32 centimeter gedaald. De meest recente verwachting is dat tot 2080 de bodem in Loppersum nog 15 centimeter verder zal dalen.



Schade aan een gebouw als gevolg van bodemdaling door gaswinning kan in theorie op twee manieren ontstaan:

Oorzaak 1: Scheefstand van een gebouw

Gebouwschade als gevolg van bodemdaling kan ontstaan als een gebouw scheef komt te staan als gevolg van ongelijkmatige zakking.

De scheefstand als gevolg van bodemdaling door gaswinning bedraagt momenteel minder dan 0,1 millimeter over een gevel van 10 meter.²⁸ Zelfs bij een scheefstand van 1 centimeter over een gevel van 10 meter is geen schade te verwachten omdat dit ruim binnen de daarvoor geldende schadecriteria blijft. Gezien de te verwachten maximale scheefstand als gevolg van bodemdaling kan dit laatste niet de verklaring zijn voor waargenomen schade aan gebouwen.

Oorzaak 2: Ongelijkmatige zakking door grondwaterstandsveranderingen

** De topwaarde van de trillingssnelheid V_{top} is de grootste trillingssnelheid (in absolute zin) op de begane grond in een stijf punt van de draagconstructie.

Bodemdaling door gaswinning heeft gevolgen voor de waterhuishouding. Zonder additionele maatregelen stijgt – door het dalen van de bodem – de waterstand in sloten, meren en kanalen ten opzichte van het maaiveld. Daardoor ontstaat *vernatting*. Om dit te tegen te gaan is een groot aantal maatregelen getroffen om de waterstand zoveel mogelijk mee te laten zakken met de bodemdaling.

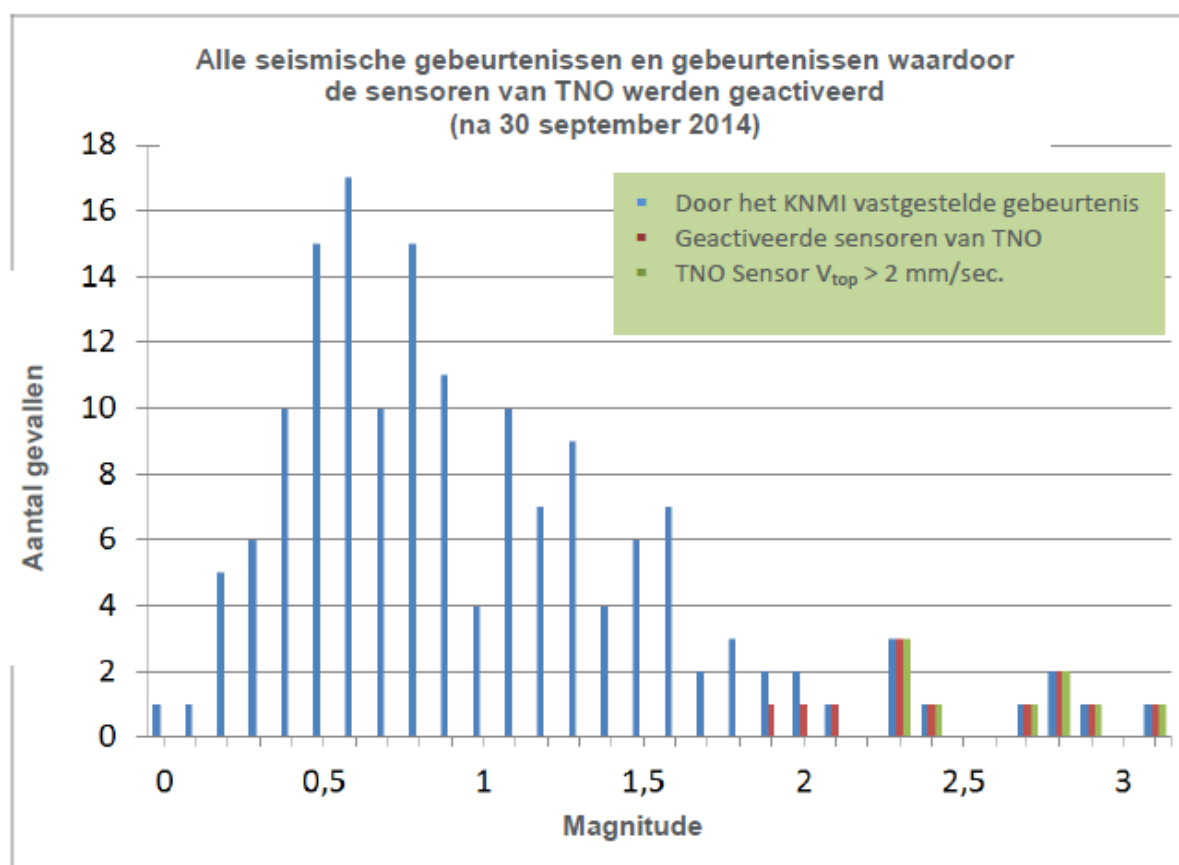
Onder supervisie van de Commissie Bodemdaling is door meerdere gerenommeerde bureaus en instituten onderzoek gedaan naar de effecten van gaswinning op bebouwing. Hierbij is specifiek gekeken naar de effecten op bebouwing van bodemdaling, waterpeilverhoging en waterpeilverlaging als gevolg van bodemdaling.²⁹ Uit tot op heden uitgevoerd onderzoek blijkt dat tot op heden *geen* gebouwenschade te verwachten is door bodemdaling door gaswinning of daarmee samenhangende maatregelen. Meer informatie is te vinden op de website van de Commissie Bodemdaling.³⁰

4 Effecten van de Groningse aardbevingen

4.1 Kleine aardbevingen veroorzaken geen schade

Het KNMI heeft sinds 1991 meer dan duizend 'seismische events' geregistreerd in het Groningen gasveld. Een groot deel daarvan betreft gebeurtenissen die aan het aardoppervlak niet of nauwelijks kunnen worden waargenomen, en die alleen met behulp van diepe geofoons zijn 'gehoord'. Zo worden aardbevingen met een kracht kleiner dan magnitude 2,0 doorgaans niet gevoeld door mensen, en veroorzaken dergelijke kleine aardbevingen geen versnellingen aan het grondoppervlak die schade aan gebouwen.³¹

Onderstaand staafdiagram illustreert dit. De figuur laat zien dat bij veel van de door het KNMI-netwerk geregistreerde aardbevingen (blauwe staven) geen TNO-gebouwensensoren zijn geactiveerd (rode en groene staven). Alleen voor de aardbevingen met een magnitude groter dan $M=2,3$ hebben de TNO-gebouwensensoren een $V_{top} > 2$ mm/s gemeten (groene staven). Hierboven, in paragraaf 3.4, zagen we dat de laagste drempelwaarde op basis van de SBR-trillingsrichtlijn 3 mm/s bedraagt (voor de zwakste SBR-gebouwen-categorie 3, oude gebouwen of in slechte staat verkerende gebouwen). De conclusie luidt derhalve dat op basis van de SBR-trillingsrichtlijn de mogelijkheid dat aardbevingen met een magnitude kleiner dan $M=2,3$ schade aan gebouwen hebben veroorzaakt of dit in de toekomst zullen doen als 'onwaarschijnlijk' moet worden beoordeeld.



De blauwe staven tonen het aantal door het KNMI-netwerk gedetecteerde seismische gebeurtenissen. Gebeurtenissen waardoor ook de TNO-gebouwensensoren werden geactiveerd zijn voorzien van een rode staaf. Gebeurtenissen die een TNO-gebouwensensor activeerden en een snelheid hadden van $V_{top} > 2$ mm/sec. zijn voorzien van een groene staaf.

Deze bevinding is volledig in lijn met de bevindingen van het *Hoofdrapport Seismic Hazard Analyse Geothermie WarmteStad Groningen*³², geschreven in opdracht van het WarmteStad geothermieproject ten noorden van de stad Groningen:

‘Associated thresholds at the epicenter are
Mw ≈ ML = 1.4 for perceptibility,
Mw ≈ ML = 2.5 for the lowest damage level (PGV=3 mm/s).’ (p15)

Sinds de aardbeving van Huizinge (augustus 2012) zijn er 35 aardbevingen geweest met $M > 2,0$, waarvan dertien met een magnitude $M = 2,5$ of hoger.

4.2 Kans op schade aan gebouwen door aardbevingen

Dankzij het KNMI-netwerk van sensoren is het mogelijk geworden om voor elke locatie in het Groningen gasveld de grondbewegingen op betrouwbare wijze te bepalen. Grondbewegingen worden echter niet 1-op-1 overgedragen op gebouwen. In vergelijking met trillingen in het vrije veld leiden de eigenschappen van een gebouw gewoonlijk tot een vermindering van de sterkte van verticale en horizontale trillingen gemeten op de fundering van het desbetreffende gebouw. Afhankelijk van de afmetingen van het gebouw, de massa van het gebouw en de stijfheid van de fundering ligt deze vermindering tussen een factor 1 en 5 voor frequenties tot circa 50 Hz.³³

De mate van overdracht (demping) wordt vaak beschreven door middel van een zogeheten ‘overdrachtsfunctie’. Deze overdracht is onderwerp van verdere studie. In overeenstemming met de huidige Nederlandse praktijk bij laagbouw wordt op dit moment voor frequenties lager dan 10 Hz (het frequentiebereik van aardbevingen in het Groningen gasveld) niet op enige reductie gerekend.³⁴

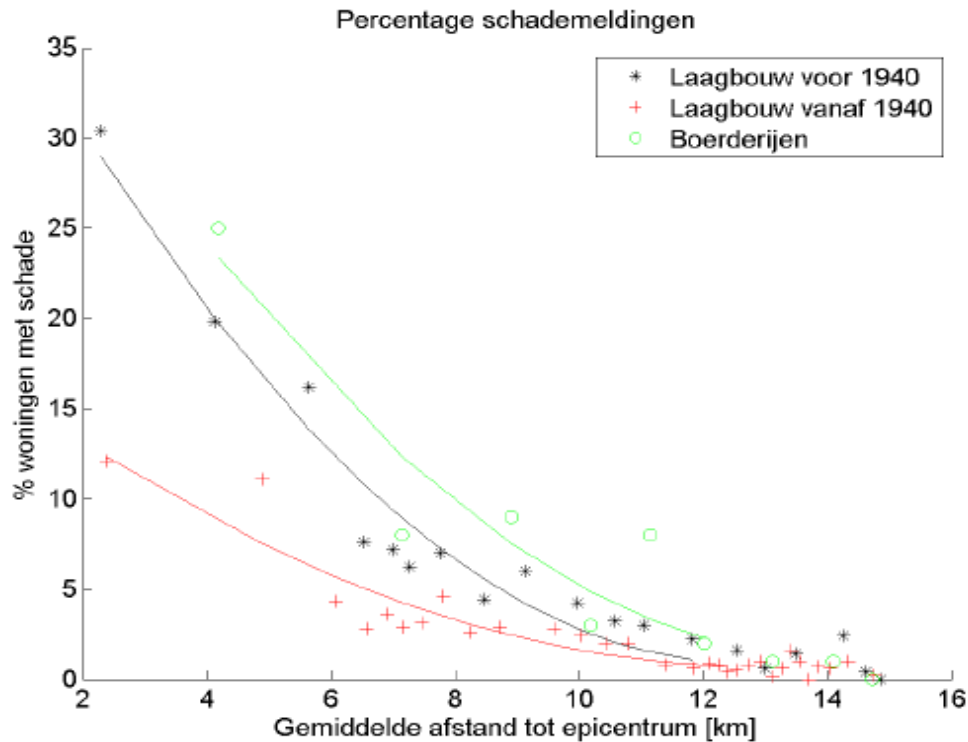
Kalibratiestudie (Noord-Nederland)

Om meer inzicht te krijgen heeft TNO voor zeven aardbevingen in Noord-Nederland de kans op schade aan gebouwen bepaald. Daarbij heeft TNO ook het geografische gebied in kaart gebracht waarbinnen nog schade aan gebouwen verwacht kan worden.³⁵ Deze drie gebouwentypen zijn:

1. Laagbouw voor 1940 (vooorlogse laagbouw)
2. Laagbouw na 1940 (naoorlogse laagbouw)
3. Boerderijen*

Aan de hand van het aantal schadetoekenningen (vastgesteld door middel van gebouweninspecties) heeft TNO voor elk van deze drie gebouwentypen de kans op gebouwschade bepaald als functie van de afstand tot het epicentrum. De onderstaande figuur bevat deze drie (kans)functies (één voor elk woningtype) voor de aardbeving bij Huizinge van 16 augustus 2012. Zo heeft van de vooroorlogse laagbouwhuizen op 4 kilometer afstand van het epicentrum ca. 20 procent schade. Dat percentage daalt snel naarmate de afstand tot het epicentrum toeneemt. Vanaf een afstand van 14 kilometer of meer bedraagt de kans op schade minder dan 1 procent.

** Voor de helderheid: het betreft hier een andere driedeling van gebouwen dan de SBR-gebouwen categorieën uit paragraaf 3.4. Beide indelingen staan geheel los van elkaar en mogen niet met elkaar worden verward.

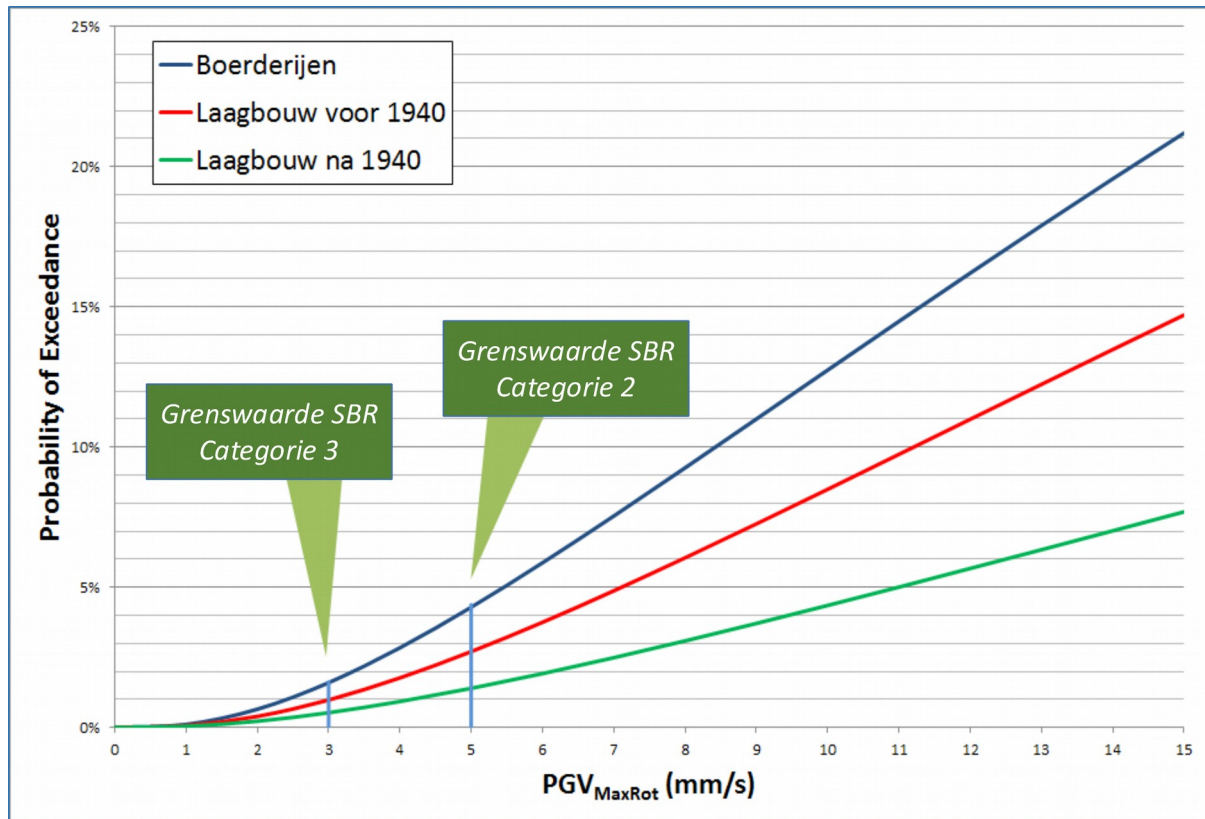


Kans op schade aan gebouwen bij een bepaalde afstand tot het epicentrum bij Huizinge – voor drie bouwtypen.

Hierna is door middel van de op het moment van het onderzoek bekende grond dampingrelaties (*attenuation*) de kans op gebouwschade bepaald als functie van de trillingssnelheid. Het bouwtype *boerderij* blijkt bij deze doorrekening het meest gevoelig voor schade door aardbevingen en *vooorlogse laagbouw* woningen blijken gevoeliger voor schade dan *naoorlogse laagbouw* woningen, wat plausibel is. Hoogbouw blijkt niet gevoelig voor trillingen door aardbevingen in de beschouwde cases. De eindconclusie van de TNO-kalibratiestudie luidt dat de gepresenteerde schadecurves voor aardbevingen consistent zijn met de drempelwaarden van SBR Deel A. Dat betekent onder andere dat met deze schadecurves verder kan worden gewerkt.

Fragiliteitsstudie (Groningen gasveld)

Aan de hand van de TNO-kalibratiestudie en meer recente inzichten met betrekking tot grondbewegingen in het Groningen gasveld is het mogelijk om voor elk van de drie gebouwentypen (boerderijen, voor- en naoorlogse laagbouw) de kans op schade als functie van de trillingsnelheid te bepalen. Deze 'breekbaarheidsfuncties' (*fragility functions*) zijn weergegeven in onderstaande grafiek.



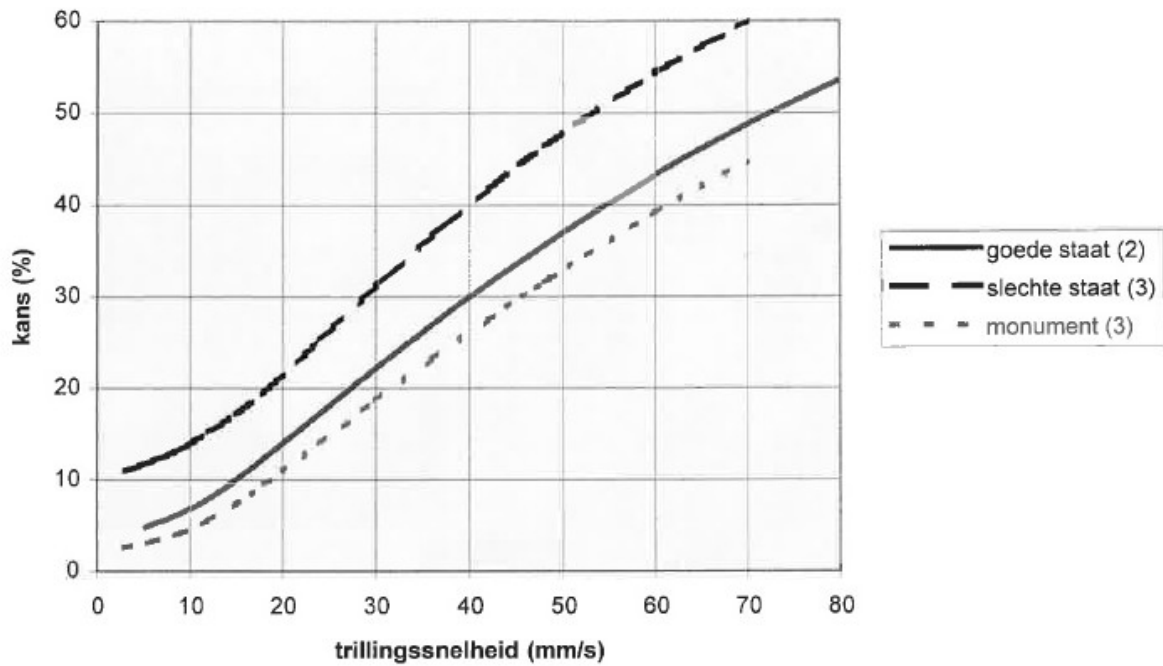
Fragility-functies: de kans op schade (y-as) als functie van de trillingsnelheid (x-as).

Deze breekbaarheidsfuncties kunnen nu gecombineerd worden met de drempelwaarden die horen bij de drie SBR-gebouwen categorieën die volgens de SBR-trillingsrichtlijn moeten worden aangehouden, uit paragraaf 3.4.2. Voor gebouwen categorie 2 is deze drempelwaarde gelijk aan 5 mm/s. De breekbaarheidsfuncties voor elk van de drie woningtypen laten zien dat dit zich vertaalt in een overschrijdingskans van 1.5% voor *naoorlogse laagbouw*, een overschrijdingskans van bijna 3% voor *vooorlogse laagbouw* en een overschrijdingskans van 4.5% voor *boerderijen*.

De drempelwaarde voor SBR-gebouwen categorie 3 bedraagt 3 mm/s. Dit vertaalt zich via de breekbaarheidsfuncties in een overschrijdingskans van 0.5% voor *naoorlogse laagbouw*, een overschrijdingskans van 1% voor *vooorlogse laagbouw* en een overschrijdingskans van 1.5% voor *boerderijen*.

Vergelijking met fragiliteitsfuncties voor andere trillingsbronnen

Ter vergelijking wordt hieronder ook de kans gegeven op het optreden van schade voor andere door mensen veroorzaakte trillingen, zoals verkeer en bouwwerkzaamheden. Deze relaties zijn in het verleden afgeleid door TNO in het kader van de ontwikkeling van de SBR Richtlijn A.³⁶ Daarbij is een onderscheid gemaakt naar gebouwen in goede staat, gebouwen in slechte staat en monumenten.



De kans op schade (y-as) als functie van trillingsnelheid (x-as) – andere trillingsbronnen dan aardbevingen

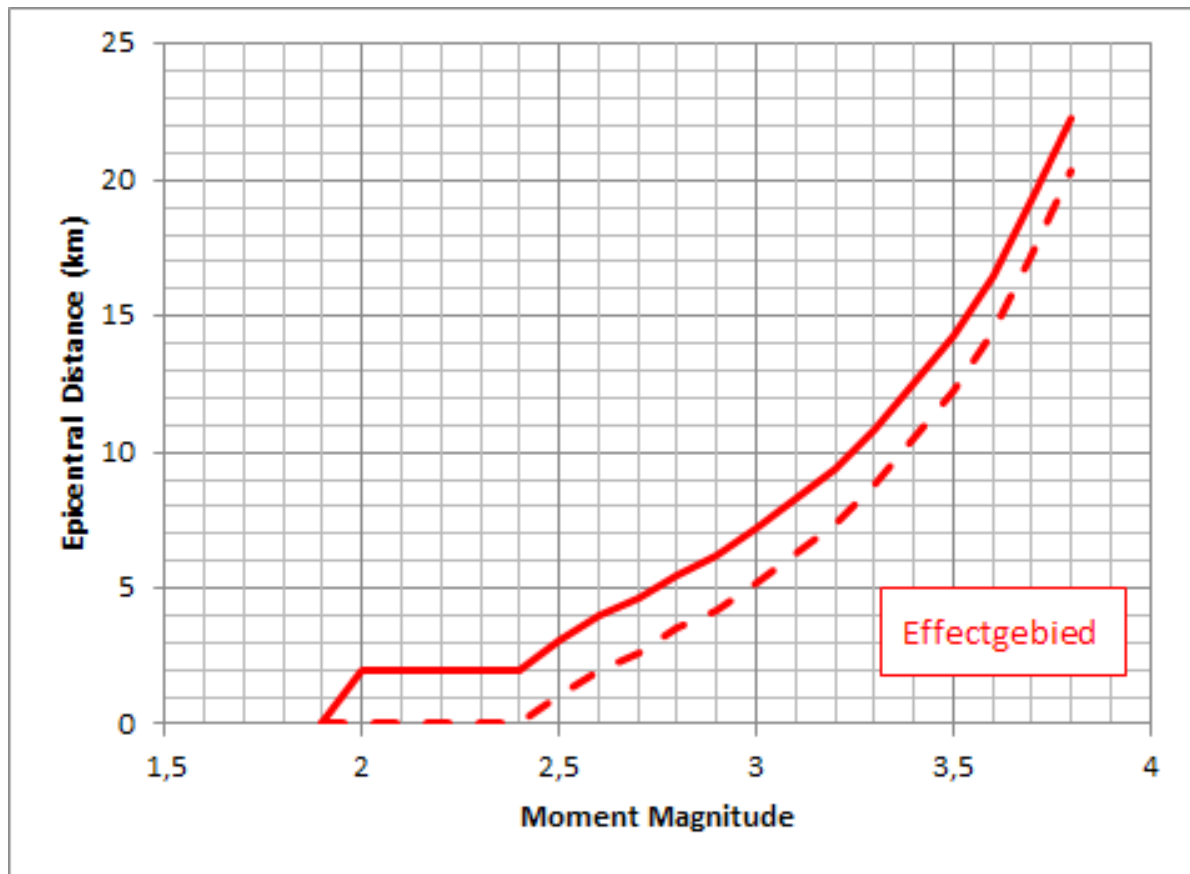
Uit de figuur kan worden afgeleid dat de kans op schade die hoort bij de grenswaarde van 3 mm/s uit SBR Richtlijn A tussen 5% en 12% bedraagt, afhankelijk van de staat van het gebouw (en ca. 2% voor monumenten). Deze kansen blijken daarmee groter dan die voor aardbevingen. .

4.3 Effectgebied

Op basis van het bovenstaande is het mogelijk om het gebied te bepalen waarbinnen schade verwacht mag worden, het zogenoemde 'effectgebied'. Dit is in onderstaande tabel uitgewerkt voor de aardbevingen in Huizinge (2012) en Hellum (2015).

	Huizinge (M 3,6)			Hellum (M 3,1)		
	Overschrijdingskans van 1%	SBR Categorie 2	SBR Categorie 3	Overschrijdingskans van 1%	SBR Categorie 2	SBR Categorie 3
Boerderijen	15,2 km	10,3 km	13,7 km	3,7 km	2,2 km	3,2 km
Laagbouw voor 1940	13,7 km			3,2 km		
Laagbouw na 1940	11,8 km			2,6 km		

Begin 2014 zijn effectgebieden bepaald met behulp van de toen beschikbare informatie en conservatieve aannamen. Op basis van de verwachte grondversnelling en de kans op het bereiken van schadeklasse 1 (DS1) voor metselwerk in gebouwen van voor 1920 (het zwakste onderzochte bouwtype) is voor elke magnitude bepaald vanaf welke afstand de kans op schade verwaarloosbaar klein is. De onderstaande grafiek toont de resultaten.³⁷

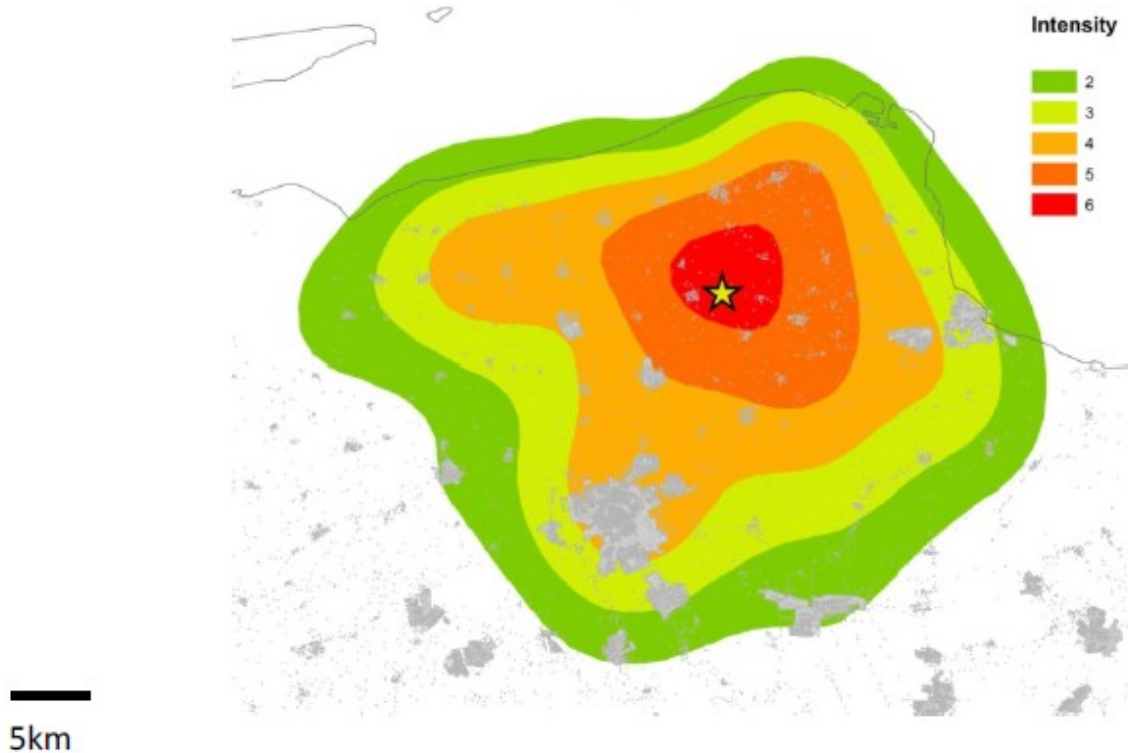


Effectgebied bepaald begin 2014. De onderbroken lijn geeft het beste technische oordeel weer. De dikke ononderbroken lijn geeft een extra marge weer voor het effectgebied.

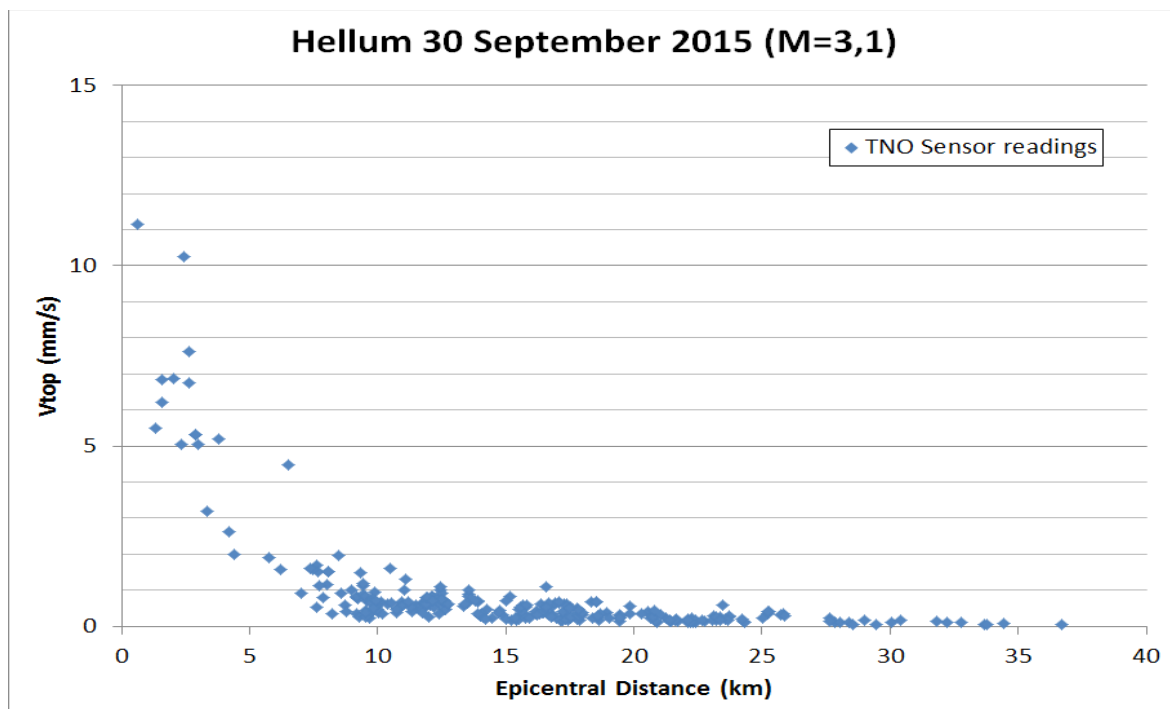
De aardbeving in Huizinge ($M = 3,6$) heeft aldus een effectgebied met een straal van 16,5 kilometer; de aardbeving in Hellum ($M = 3,1$) heeft een straal van 8 kilometer. Deze effectgebieden zijn inclusief de marge van 2 kilometer tussen de onderbroken en doorgetrokken rode lijn.

Bepaling effectgebieden door KNMI

Op basis van input van bewoners (via vragenlijsten) in combinatie met de metingen van de groundbeweging komt ook het KNMI op onafhankelijke wijze tot een vergelijkbare afbakening van het effectgebied van de Huizingebeving. Onderstaand plaatje bevat de resultaten van deze exercitie. Hierbij heeft het KNMI de eerste zes schadeklassen van EMS-98 (zie paragraaf 1.5) kunnen vaststellen.³⁸ Daarbij is het van belang om te weten dat in de intensiteitsgebieden 5 en 6 schade aan gebouwen zou kunnen optreden en in de overige intensiteitsgebieden niet.³⁹



Hieronder staat ter vergelijking voor de aardbeving in Hellum een plot van de via de TNO-gebouwensensoren gemeten trillingssnelheid (y-as) als functie van de afstand tot het epicentrum (x-as). De figuur maakt duidelijk dat inderdaad vanaf ongeveer 4 kilometer van het epicentrum de in gebouwen gemeten trillingssnelheid beneden de SBR-drempelwaarden ($V_{top} \leq 3$ mm/s voor categorie 3; $V_{top} \leq 5$ mm/s voor categorie 2) ligt.



De trillingssnelheid (y-as, V_{top} , in mm/s) als functie van de afstand tot het epicentrum, in kilometers (x-as). De meting op ongeveer 6 km van het epicentrum (met trillingssnelheid 4.5 mm/s) wijkt duidelijk af van de trend. Nader onderzoek wees uit dat deze meting niet conform de SBR-trillingsrichtlijn is gedaan doordat het betreffende meetpunt niet in een stijf punt van het gebouw zat. Daardoor is er ook gebouwrespons gemeten, wat zich vertaalt in een hogere gemeten trillingssnelheid.

4.4 Mate van schade

Niet alle schade aan gebouwen binnen een effectgebied is aardbevingsschade. In het algemeen wordt een onderscheid gemaakt naar meer dan dertig mogelijke oorzaken van gebouwschade.⁴⁰ De *kans* op schade zegt natuurlijk nog niets over de mate van schade.

Er zijn verschillende onderzoeken gedaan om te bepalen hoeveel fysieke schade door aardbevingen in het Groningen gasveld wordt veroorzaakt. Zo verrichte Deltares⁴¹ in opdracht van de provincie Groningen onderzoek naar aanleiding van de aardbeving in Westeremden (M=3,4) op 8 augustus 2006.* Deltares trekt onder meer de volgende conclusie:

'De maximaal verwachte intensiteit is VI-VII op de EMS-schaal. Voor metselwerkgebouwen betekent dit dat veel gebouwen lichte constructieve schade vertonen (o.a. scheuren in veel muren) en enkele matige constructieve schade (o.a. diepe scheuren in de meeste muren). Op basis van de ervaringen met de schaderapporten tot nu toe in Noord Nederland is dit een pessimistische benadering van de ernst van de schade door de aardbevingen.' (pagina iv)

TNO heeft deze verwachting getoetst na de Huizingebeving van 2012.⁴² TNO komt tot twee belangrijke conclusies:

1. Een aanzienlijk deel van de schademeldingen betreft 'niet-constructieve schade'. De maximale ernst van de schademeldingen betreft 'lichte constructieve schade'. Dit valt binnen de maximaal te verwachten schade als gevolg van aardbevingen in Groningen, zoals weergegeven in het rapport 'Gebouwschade Loppersum' van Deltares.
2. Er zijn geen schademeldingen waarbij sprake is van 'matige constructieve schade (o.a. diepe scheuren in de meeste muren)' die volledig is toe te schrijven aan de aardbeving. Dit betekent dat de maximale schade die is gemeld, minder is dan de maximaal te verwachten schade als gevolg van aardbevingen in het Groningen gasveld, zoals weergegeven in het rapport 'Gebouwschade Loppersum' van Deltares.

TNO heeft in 2015 vastgesteld welke schade aardbevingen hebben veroorzaakt in de vorm van scheuren. Deze scheuren zijn in kaart gebracht aan de hand van inspecties van de buitenkant van gebouwen. TNO heeft zich daarbij gericht op vijf recente aardbevingen:

30 september 2014:	Garmerwolde	M=2.8
5 november 2014:	Zandweer	M=2.9
30 december 2014:	Woudbloem	M=2.8
6 januari 2015:	Wirdum	M=2.7
30 september 2015:	Hellum	M=3.1

TNO heeft bij 223 panden met gebouwsensormetingen met V_{top} boven 1 mm/s de scheurlengte en -breedte nauwkeurig in kaart gebracht, en deze vervolgens vergeleken met een initiële schadeopname. Het doel was na te gaan welke trillingsniveau resulteert in een hogere EMS-98 schadeklasse.



Representatieve voorbeelden van opgetreden schades in het TNO-rapport.

* Het onderzoek werd begeleid door vertegenwoordigers van de TcBB, Commissie Bodemdaling Groningen, KNMI, het Waterschap Noorderzijlvest, en bewoners uit Loppersum en omgeving.

De conclusies van TNO luiden als volgt:⁴³

1. Hoewel TNO wel enkele nieuwe scheuren heeft waargenomen, is geen van de onderzochte huizen van schadeklasse DS1 of DS2 naar een hogere schadeklasse gegaan.
2. Het aantal bestaande scheuren met een toename in lengte en/of breedte bedraagt 1%. Deze zogenaamde B-schade (schade, reeds aanwezig voor, maar verergerd ten gevolge van een of meer aardbevingen) komt in de onderzochte huizen nauwelijks voor.
3. Bij slechts 2% van de gerepareerde scheuren is nieuwe scheurvorming zichtbaar. Het lijkt er daarmee op dat adequaat gerepareerde scheuren bestand zijn tegen verdere aardbevingen.

5 Reageren

Er vindt permanent onderzoek plaats naar uiteenlopende aspecten van gebouwschade als gevolg van trillingen, in het bijzonder aardbevingstrillingen. Dit document, en veel andere informatie, is terug te vinden op NAM.nl (Feiten en cijfers).

NAM zal nieuwe wetenschappelijke inzichten verwerken in dit informatiedocument. Houd de website van NAM en onze nieuwsbrieven en social media in de gaten voor updates.

NAM gaat graag het gesprek aan met bewoners en andere belangstellenden over de inhoud van dit informatiedocument. Mocht u vragen of suggesties hebben, aarzel dan niet om contact op te nemen met NAM.

Dat kan via

Telefoon: +31 (0)592 368222

of

E-mail: nam-communicatie@shell.com

6 Literatuurverwijzingen

- 1 NAM, "Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2016 (Chapter 9)".
- 2 H.G.J. Kamp - Minister van Economische Zaken, *Voorstel van wet bewijsvermoeden gaswinning Groningen (Kamerstukken 34390)*, 26 april 2016.
- 3 H.G.J. Kamp - Minister van Economische Zaken, "Definitief instemmingsbesluit gaswinning Groningen," 23 sep 2016.
- 4 United States Geological Survey, [Online]. Available: www.usgs.gov.
- 5 KNMI, [Online]. Available: www.knmi.nl.
- 6 NAM, Are Love- and Rayleigh seismic waves detectable in Groningen?, 2017
- 7 P. Shearer, Introduction to Seismology 2nd edition, 2009. Deltares, "120297000 - Gebouwschade Loppersum," 2012
- 8 Deltares, "120297000 - Gebouwschade Loppersum," 2012.
- 9 Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Peak Ground Velocity from Small-Magnitude earthquakes in the Groningen field using multiple definitions for the Horizontal Component of Motion, Julian Bommer, Peter Stafford and Michail Ntinalexis, November 2016
- 10 Rijksuniversiteit Groningen, Terp composition in respect to earthquake risk in Groningen, 2016.
- 11 N. J. Mansfield, Human Response to Vibration, 2005; California Department of Transportation, "Transportation and Construction Vibration Guidance Manual," 2013; European Seismological Commission, European Macroseismic Scale 1998.
- 12 KNMI, "The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen)," 2013.
- 13 KNMI, <https://www.knmi.nl/nederland-nu/seismologie/stations>
- 14 <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus>
- 15 KNMI, "The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen)," 2013.
- 16 TNO, "2016 R11323 - Monitoring Network Building Vibrations - Analysis Earthquakes in 2014 and 2015," 2016.
- 17 TNO, "97-CON-DYNR1698 - Kans op schade door Trillingen," 1997.
- 18 NAM, [Online]. Available: www.nam.nl.
- 19 NAM, "Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2016 (Chapter 9)".
- 20 TNO, "B-90-822 - Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen," 1993.
- 21 TNO, "B-90-822 - Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen," 1993.
- 22 SBR, "Meet- en beoordelingsrichtlijn: Trillingen - Deel A Schade aan gebouwen," 2010.
- 23 DIN 4150-3, "Structural vibration - Part 3: Effects of vibration on structures," 1999.
- 24 DIN 4150-3, "Structural vibration - Part 3: Effects of vibration on structures," 1999.
- 25 TNO, "2016 R11323 - Monitoring Network Building Vibrations - Analysis Earthquakes in 2014 and 2015," 2016.
- 26 KNMI, [Online]. Available: www.knmi.nl; TNO, "2016 R11323 - Monitoring Network Building Vibrations - Analysis Earthquakes in 2014 and 2015," 2016; Deltares, "120297000 - Gebouwschade Loppersum," 2012.
- 27 TNO, "2016 R11323 - Monitoring Network Building Vibrations - Analysis Earthquakes in 2014 and 2015," 2016.
- 28 Commissie bodemdaling, [Online]. Available: www.commissiebodemdaling.nl.
- 29 Werkgroep Bodemdaling Nedmag, "Literatuuronderzoek naar de effecten van zout- en gaswinning op bebouwing," 2012.
- 30 Commissie bodemdaling, [Online]. Available: www.commissiebodemdaling.nl.

- 31 KNMI, [Online]. Available: www.knmi.nl; N. J. Mansfield, Human Response to Vibration, 2005.
- 32 IF Technology en Q-con, "Hoofdrapport Seismic Hazard Analyse Geothermie WarmteStad Groningen," 2016.
- 33 VROM, "Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte Publikatiereeks verstoring nr. sep95".
- 34 VROM, "Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte Publikatiereeks verstoring nr. sep95".
- 35 TNO, "034-DTM-2009-04435 - Kalibratiestudie Schade door Aardbevingen," 2009; TNO, "2012 R10227 - Analyse van de gevolgen van de aardbeving te Huizinge d.d. 16 augustus 2012," 2013.
- 36 TNO, "B-90-822 - Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen," 1993.
- 37 J. Bommer en R. Pinho, "Exclusion Zone for Groningen Earthquake Damage Claims v3," 2014.
- 38 European Seismological Commission, *European Macroseismic Scale 1998*.
- 39 KNMI, "The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen)," 2013.
- 40 TNO, "060-DTM-2011-02980 - Methodiek voor onderzoek naar de oorzaak van gebouwschade - versie 2," 2011.
- 41 Deltares, "120297000 - Gebouwschade Loppersum," 2012.
- 42 TNO, "2012 R10227 - Analyse van de gevolgen van de aardbeving te Huizinge d.d. 16 augustus 2012," 2013.
- 43 TNO, "2016 R11323 - Monitoring Network Building Vibrations - Analysis Earthquakes in 2014 and 2015," 2016.