

Gebouwschade Loppersum

Drs. G. de Lange
ir. N.G.C. van Oostrom
Drs. S. Dortland
Ir. H. Borsje (TNO)
Ir. S.A.J. de Richemont (TNO)

1202097-000

Titel

Gebouwschade Loppersum

Opdrachtgever

Provincie Groningen
Stuurgroep Onderzoek
Gebouwschade

Project

1202097-000

Kenmerk

1202097-000-BGS-0003

Pagina's

84

Trefwoorden

Gaswinning, Groningen, aardbevingen, bodemdaling, gebouwschade

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de methodieken die momenteel in gebruik zijn om tot een voorspelling van de effecten van gaswinning op gebouwen te komen. Aanbevelingen ter verbetering van de voorspelling worden gegeven. In een separaat rapport wordt de methodiek van schadeopname voorgesteld, die tot doel heeft verschillende oorzaken van schade te onderscheiden. In dit rapport wordt ook ingegaan op andere oorzaken van gebouwschade dan de gaswinning.

Referenties

07-10.727

Projectnummer: 092.81229 (oud)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	feb. 2011	drs. G. de Lange		drs. B.F. Paap		dr. J.C. Gehrels	
		ir. N.G.C. van Oostrom					
		Drs. S. Dortland					
		Ir. H. Borsje (TNO)					
		Ir. S.A.J. de Richemont (TNO)					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond en doelstelling	1
1.2 Opzet onderzoek en rapportage	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Effecten van aardgaswinning in Noord Nederland	3
2.1 Historie	3
2.1.1 Algemeen	3
2.1.2 Aardbevingen	4
2.1.3 Bodemdaling	6
2.2 Toekomst	8
2.2.1 Maximale magnitude, intensiteit en kans op beven	8
2.2.2 Het bepalen of inschatten van de verwachte bodemdaling	11
2.2.3 Evaluatie	14
3 Gebouwschade	17
3.1 Ontstaan van gebouwschade	17
3.2 Beschrijving van gebouwschade	18
3.3 Gebouwschade door aardgaswinning	21
4 Effect van aardbevingen op gebouwen	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Trillingen door aardbevingen	24
4.2.1 Duur van de trillingen	25
4.2.2 Intensiteit van de trilling	25
4.2.3 Het effect van de lokale ondergrond	26
4.2.4 Resultaten hazard analyse	27
4.2.5 Voortgaand onderzoek en aanbevelingen	28
4.3 Schade door trillingen	29
4.3.1 Indirecte schade door zetting door trillingen	33
4.4 Evaluatie	33
5 Effect van bodemdaling op gebouwen	35
5.1 Inleiding	35
5.2 Zetting door aardgaswinning	37
5.2.1 Bodemdaling door drukverlaging in het gesteente waaruit gas gewonnen wordt	37
5.2.2 Bodemdaling door verlaging of verhoging van de grondwaterstand	37
5.3 Andere oorzaken van zettingen	37
5.4 Schade door zettingen	37
5.5 Evaluatie	39
6 Conclusies	41
7 Begrippenlijst	49
8 Literatuurlijst	53

Bijlage(n)

A EMS intensiteitschaal	A-1
B Schade door trillingen, regels en richtlijnen	B-1
B.1 Voorkomen van schade door trillingen, regels en richtlijnen	B-1
B.2 Nederlandse bouwregelgeving	B-1
B.3 De rol van bodemtrillingen bij de constructieve veiligheid	B-2
C Geïnduceerde aardbevingen gerelateerd aan het Groningen-veld	C-1
D Fysica trillingen	D-1

Samenvatting

Aanleiding

Naar aanleiding van de aardbeving op 8 augustus 2006 (Westeremden Groningen), met een kracht (*magnitude*) van 3,5 op de schaal van Richter, is bij burgers van Middelstum en omgeving ongerustheid ontstaan over de kracht van toekomstige aardbevingen en de schade die door deze aardbevingen veroorzaakt kan worden.

Gedeputeerde Staten van de Provincie Groningen heeft naar aanleiding van de door de burgerij gestelde vragen, in overleg met het College van B&W van de gemeente Loppersum, Nederlandse Aardolie Maatschappij en het Waterschap Noorderzijlvest twee onderzoeken opgestart.

Het eerste onderzoek behelst een evaluatie van de huidige stand van kennis met betrekking tot de kracht van toekomstige aardbevingen, de omvang van de bodemdaling en daaraan gerelateerde mogelijke gebouwschade. De resultaten van dit onderzoek vindt u in dit rapport. Gebouwschade wordt niet alleen veroorzaakt door aardbevingen. Er zijn meer dan 30 oorzaken bekend voor gebouwschade. In het tweede onderzoek wordt een methode uitgewerkt en getoetst om te bepalen waardoor schade aan een woning wordt veroorzaakt.

De onderzoeken zijn uitgevoerd door Deltares en TNO Bouw en Ondergrond. Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden is gebruik gemaakt van bestaande studies. Er is geen aanvullend onderzoek uitgevoerd. De onderzoeken zijn begeleid door een Stuurgroep, samengesteld uit leden van de (landelijke) Technische Commissie Bodembeweging, de Commissie Bodemdaling Groningen, KNMI en het Waterschap Noorderzijlvest. Een groep bestaande uit vertegenwoordigers van de inwoners van Loppersum en omgeving heeft als klankbordgroep gefunctioneerd. De NAM heeft de onderzoeken gefinancierd maar was niet bij de uitvoering betrokken.

Bodemdaling en aardbevingen

De aardbevingen in Noord-Nederland worden veroorzaakt door de gaswinning. Het aardgas zit op ongeveer 3 kilometer diepte in een poreuze zandsteenlaag. Als het gas wordt gewonnen wordt de zandsteen iets in elkaar gedrukt. Dit is een zeer geleidelijk en goed voorspelbaar proces dat aan het oppervlak leidt tot bodemdaling. Langs breukvlakken in de zandsteen kan de daling echter ook schoksgewijs plaatsvinden. Algemeen wordt aangenomen dat dit de oorzaak is van de aardbevingen. De breuken lopen niet door tot aan het oppervlak.

Maximale aardbeving

Op basis van internationaal geaccepteerde methodes is door het KNMI bepaald dat de maximale magnitude van een aardbeving in Noord-Nederland 3,9 is op de schaal van Richter. Bij het bepalen van de maximale magnitude is gebruik gemaakt van alle gegevens van aardbevingen in Nederland die zijn veroorzaakt door olie- en gaswinning, zoals verzameld en berekend door het KNMI. De krachtigste aardbevingen veroorzaakt door gaswinning in Nederland hadden een kracht van 3,5 op de schaal van Richter (Bergermeer, 9 september 2001, Westeremden, 8 augustus 2006).

In de jaarlijkse frequentie van de aardbevingen is een variatie te zien. In sommige regio's binnen het Groningen-veld is de laatste jaren een toename waargenomen. De verandering van de totale energie die is vrijgekomen bij de aardbevingen in de tijd lijkt tot nu toe echter constant.

Schade door aardbevingen aan gebouwen

De internationaal geaccepteerde methode voor het voorspellen van de gebouwschade door een aardbeving is de PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis). Hierbij wordt met behulp van de berekende kans op een aardbeving van een bepaalde magnitude en inzicht in het gebied waar aardbevingen kunnen optreden een voorspelling gegeven van het verwachte trillingsniveau. Het KNMI heeft voor het Groningen-veld contouren berekend van de piekwaarden. Wanneer de reactie van een gebouw(type) op trillingen bekend is kan hiermee voor verschillende magnitudes van aardbevingen een inschatting van de schade worden gedaan. Een ijkling van opgetreden trillingen in gebouwen heeft nog niet plaatsgevonden. Wel kan door kalibratie nu de kans op schade worden geschat. Aan de hand van de trillingsmetingen van de grond zijn de trillingsniveaus voor verschillende magnitudes berekend en vergeleken met de gemelde schade. Hieruit zijn de contouren van de gebieden berekend met een kans op schade van 1%, 5% en 10% voor verschillende typen gebouwen. Bij een aardbeving met een kracht van 3,5 op de schaal van Richter bestaat er op 10,5 km afstand van het epicentrum, 1% kans dat schade ontstaat aan het meest gevoelige gebouwtype (boerderijen). Bij een kracht van 3,9 op de schaal van Richter ligt de voorspelde buitengrens van de schade op meer dan 15 km.

Een manier om de gevolgen van aardbevingen in termen van schade te beschrijven is de in Europa gebruikte EMS intensiteitschaal. Er zijn empirische relaties gemaakt tussen magnitude en maximale intensiteit voor natuurlijke aardbevingen, maar ook voor geïnduceerde bevingen in Noord-Nederland [3]. Deze relatie heeft echter een grote onzekerheid, waarbij het uitstralingspatroon van de bron een rol speelt. Volgens de EMS schaal zou bij 10 tot 60% van de gebouwen in metselwerk matige schade (=lichte constructieve schade) ontstaan en bij 0 tot 20 % van de gemetselde gebouwen zware schade (=matige constructieve schade) ontstaan. Bij lichte constructieve schade moet worden gedacht aan scheuren in veel muren en vallend pleisterwerk en delen van schoorstenen. Bij matige constructieve schade moet worden gedacht aan grote en diepe scheuren in de meeste muren, wegglijden van dakpannen, het breken van schoorstenen op de daklijn en breuk van enkele niet-constructieve onderdelen.

Bij eerdere aardbevingen in Groningen is echter gebleken dat de EMS-schaal, door de breedte van de schadeklassen leidt tot een overschatting van de opgetreden schade. Bij de aardbevingen als gevolg van gaswinning in Groningen met een maximum kracht tot 3,5 op de schaal van Richter is tot nu toe lichte tot matige (=lichte constructieve) schade ontstaan. Geconcludeerd kan worden dat de EMS schaal beperkt toepasbaar is voor de situatie in Groningen maar dat er op dit moment geen met metingen getoetste methode is om de ernst van de schade door een aardbeving met een kracht van 3,9 op de schaal van Richter te voorspellen.

Een aardbeving kan verdichting of vervloeiing veroorzaken van zand in ondiepe losgepakte fijnzandige lagen. Dit verschijnsel is tot dusver niet waargenomen. Bij gebouwen die zijn gefundeerd op palen die tot in de draagkrachtige zandlaag steken zal dit niet tot zetting leiden, maar het mag niet uitgesloten worden als een lokale oorzaak van plotselinge zetting van ondiepe funderingen. De combinatie van voorwaarden waaronder dit kan optreden (fijn losgepakt zand, inhomogeniteit van ondergrond en funderingsdruk en een zeer sterke trilling) zal slechts sporadisch voorkomen.

Bodemdaling door gaswinning

Door de gaswinning zakt de bodem in een groot gedeelte van de provincie Groningen. Bij Loppersum bedraagt de bodemdaling momenteel ca. 0,26 m. Geprognosticeerd is dat de bodem aan het eind van de gaswinning (2070) maximaal 0,47 m is gedaald. De opgetreden

bodemdaling en de prognose wordt elke 5 jaar geactualiseerd en gepubliceerd. Doordat de bodem geleidelijk en in een groot gebied daalt, ontstaat geen directe schade aan gebouwen.

Rapportages, beschrijving van de meetmethodiek en voorspelling van bodemdaling als gevolg van aardgaswinning als ook de meetregisters van de hoogtemetingen kunnen geraadpleegd worden op het webportaal voor informatie over opsporing en winning van olie en gas in Nederland en het Nederlandse deel van het Continentaal plat: <http://www.nlog.nl/nl/home/NLOGPortal.html>.

Bodemdaling heeft wel gevolgen voor de waterhuishouding. Als de peilen niet worden aangepast zal de waterstand in de watergangen stijgen ten opzichte van maaiveld. Om schade door hogere waterstanden te voorkomen is een groot aantal maatregelen genomen zoals het bouwen van diverse gemalen en het aanpassen van bestaande gemalen. De genomen maatregelen stellen de waterschappen in staat de waterpeilen aan te passen aan de opgetreden bodemdaling. In een aantal grotere watersystemen is het niet mogelijk om de waterpeilen overal exact aan te passen aan de bodemdaling omdat binnen deze watersystemen de daling van de bodem niet overal even groot is. Hierdoor is op een aantal plaatsen sprake van een verhoging of verlaging van de waterpeilen. Op grond van bestaand onderzoek en opgedane ervaringen worden de maatregelen zodanig uitgevoerd dat geen schade aan gebouwen te verwachten is. Locale effecten kunnen mogelijk wel optreden. In Pekela is vastgesteld dat dit niet het geval is. Er loopt momenteel een nieuw onderzoek in de Tweede Schil om hierin nog meer inzicht te verkrijgen.

Omgaan met onzekerheden en aanbevelingen

Alle kennis bevat leemten en onzekerheden, dat geldt ook voor de effecten van aardgaswinning. De opstellers van dit rapport hebben geconstateerd dat alle betrokken instanties zorgvuldig met deze onzekerheden omgaan en hierop veilige marges toepassen. Hierdoor worden verrassingen, dat wil zeggen overschrijding van deze marges, zoveel mogelijk uitgesloten. Tevens is geconstateerd dat er op een aantal gebieden ruimte is voor verbetering van de kennis door verder onderzoek en voortschrijdend inzicht. Hiertoe zijn een aantal aanbevelingen gedaan.

Hieronder zijn de conclusies en aanbevelingen puntsgewijs samengevat.

Conclusies

Aardbevingen

- De inschatting van de maximaal mogelijke magnitude ($M=3,9$) is op de internationaal geaccepteerde wijze uitgevoerd. Daarbij is gebruik gemaakt van statistische analyse van de aardbevingen tot 2003.
- De verwachtingen zijn weergegeven in bruikbare kaarten van (kans op) pieksnelheid aan de oppervlakte. De zonering is een weergave van omhullenden, resulterend in een conservatieve marge.
- De verdeling van aardbevingen over het Groningen veld lijkt samen te vallen met de belangrijkste breuken aan de top van het gasveld op ca 3 km diepte en is ongelijk verdeeld over het gehele veld. In de tijd is tevens de frequentie van aardbevingen in het Groningen veld toegenomen. Het is onduidelijk of er een stationaire situatie is opgetreden. Een verklaring hiervoor ontbreekt nog, zodat een inschatting van het toekomstige verloop en de ruimtelijke verdeling van de aardbevingsfrequentie nog niet gegeven kan worden.

Schade door aardbevingen aan gebouwen

- Er heeft een ijking plaatsgevonden van de kans op schade bij aardbevingen met een kracht tussen $M=3$ en $M=3,5$. Hiermee zijn de buitengrenzen bepaald van de gebieden met een kans op schade groter dan 1%. Voor de extrapolatie naar andere magnitudes zijn de onzekerheden conservatief verdisconteerd.
- De maximaal verwachte intensiteit is VI-VII op de EMS-schaal. Voor metselwerk gebouwen 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. Dit is verklaarbaar, omdat de schaal is opgesteld voor alle gebouwtypen in Europa voor natuurlijke aardbevingen, waardoor de afzonderlijke schadeklassen een breed scala aan schadekenmerken bevatten, ook van zwakkere constructies dan in Nederland gebruikelijk zijn.
- Trillingen kunnen in ondiepe losgepakte fijnzandige lagen tot zettingen door verdichten of vervloeien van het zand leiden. Dit verschijnsel is niet waargenomen, maar mag niet uitgesloten worden als een lokale oorzaak van zetting van ondiepe funderingen. Bij paalfunderingen die in het pleistocene zand zijn gefundeerd is dit niet relevant.

Bodemdaling door gaswinning

- De bodemdaling die direct door de gaswinning wordt veroorzaakt wordt iedere vijf jaar door de NAM herzien. De sinds de start van de winning opgetreden en voorspelde bodemdaling wordt dan gepubliceerd. De NAM hanteert daarvoor de algemeen geaccepteerde geodetische methodieken. Bij de voorspelling wordt een onzekerheidsmarge bepaald van 15% tot 30%. De in 2003 en 2008 waargenomen gemiddelde afwijking van de prognose was kleiner dan 10%.
- De bodemdaling resulteert in een komvormige depressie met een geleidelijke helling. De door de komdaling veroorzaakte scheefstelling zal maximaal 1mm over een lengte van 25 m bedragen. Dit is enkele orden lager dan de constructieve grenswaarden en leidt niet tot schade aan gebouwen.
- Bodemdaling door gaswinning leidt bij ongewijzigde peilhoogte van het oppervlaktewater tot een relatieve peilstijging. Dit kan ongewenste gevolgen hebben voor het oppervlaktewatersysteem en bij zwakke funderingen tot zettingen. Er zijn maatregelen genomen opdat het waterschap de peilen aanpast om de relatieve peilverschillen te minimaliseren.

Bodemdaling door drainage (peilbeheer)

- Het handhaven van een ontwateringsdiepte door peilbeheer leidt tot het inklinken van de bodem en in het geval van veen tot oxidatie. Bij peilverlagingen kan lokaal hierdoor schade aan ondiep gefundeerde gebouwen en infrastructuur ontstaan. Wanneer het peil aangepast (verlaagd) wordt om de relatieve peilstijging door gasdaling te compenseren kan dit lokaal (initieel) leiden tot relatieve peilverlaging. In opdracht van de Commissie Bodemdaling worden de gevolgen met betrekking tot onder meer gebouwschade onderzocht. Dit wordt volgens de laatste inzichten uitgevoerd. Ook worden grenswaarden voor verlaging toegepast waardoor de kans op schade niet hoger kan worden dan 5%. Omdat zetting van gebouwen voornamelijk door lokale omstandigheden wordt bepaald is het niet mogelijk om over individuele gebouwen uitspraken te doen.

Aanbevelingen

Aardbevingen

- De laatste gepubliceerde inschatting van de maximaal mogelijke magnitude is gebaseerd op de analyse uit 2003. Aanbevolen wordt om, analoog aan de 5-jaarlijkse update van de bodemdalingsprognose, deze analyse ook te herhalen, gebruik makend van alle nieuwe waarnemingen en verbeterde geomechanische modellen. Hierbij dient ook aandacht te worden besteed aan de te verwachten frequentie van de aardbevingen en een eventueel na-ijleffect na het stoppen van de winning. Het is niet te verwachten dat de maximale magnitudeverwachting van $M=3,9$ wezenlijk zal veranderen.
- De voorspellingen van de ruimtelijke grenzen van verwachte trillingsniveaus kan worden verbeterd door op meer plaatsen versnellingsopnemers te plaatsen.
- Voortzetting van het reeds verrichte onderzoek door het KNMI wordt aanbevolen.

Schade door aardbevingen

- In het voorliggend rapport wordt geconcludeerd dat de EMS-schaal beperkt voldoet voor het voorspellen van het type schade door aardbevingen als gevolg van de gaswinning. 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. Dit is verklaarbaar, omdat de schaal is opgesteld voor alle gebouwtypen in Europa, waardoor de afzonderlijke schadeklassen een breed scala aan schadekenmerken bevatten, ook van zwakkere constructies dan in Nederland gebruikelijk zijn. Ook kunnen specifieke kenmerken van een geïnduceerde aardbeving een rol spelen. De PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) is een internationaal geaccepteerde methode om trillingsniveaus van de bodem te bepalen. Voor de vertaling naar de gevolgen voor gebouwen ontbreken momenteel trillingsmetingen aan gebouwen. Door kalibratie van het uit metingen afgeleide trillingsniveau van de grond van een beperkt aantal opgetreden aardbevingen kan nu voor aardbevingen met een kracht tussen 3 en 3,5 op de schaal van Richter voorspeld worden wat de kans op schade is op een gegeven afstand van het epicentrum. Aanbevolen wordt om het onderzoek naar de relatie tussen schade en de geregistreerde magnitude voort te zetten en de bij een gebouw optredende trilling te meten, zodat een betere voorspelling van de schade bij een magnitude van 3,9 kan worden gemaakt. Voortzetting van het reeds verrichte onderzoek door het KNMI en TNO wordt aanbevolen. Omdat het onderzoek afhankelijk is van het optreden van aardbevingen zullen analyses pas na verloop van tijd nieuwe inzichten opleveren.
- De norm NEN-EN 1998-1 (Eurocode 8) is gebaseerd op de relatie tussen trillingsniveaus in gebouwen en tektonische, natuurlijke aardbevingen. Hierdoor kunnen in het ontwerp van constructies onjuiste dynamische belastingen worden berekend. Het wordt aanbevolen om deze norm aan te vullen met de voor Nederland specifieke omstandigheden van de geïnduceerde aardbevingen. Aanbevolen wordt om dit onderzoek in CURNET verband uit te voeren.
- Verdichting of vervloeijing van losgepakte zandlagen mag als (gedeeltelijke) oorzaak van zettingsschade niet worden uitgesloten. Bij onderzoek naar de oorzaak van schade bij een gebouw dient dit meegenomen te worden.
- In de studie naar de gevolgen van aardgaswinning in de Waddenzee is berekend dat er een kleine kans bestaat dat bij aardbevingen met een kracht van $M=3,8$, aan het onderwatertalud van de zeedijken in losgepakte zandlagen een kleine instabiliteit kan ontstaan. Aanbevolen wordt om deze berekening te actualiseren voor een magnitude

3,9. Deze informatie dient bij Rijkswaterstaat en de waterschappen beschikbaar te zijn.

Bodemdaling door gaswinning (rapportage NAM)

- Het wordt aanbevolen de momenteel gehanteerde onzekerheidsmarges van 15% tot 30% in de voorspelling van de bodemdaling te handhaven.
- Het wordt aanbevolen om in toekomstige prognoses aandacht te besteden aan eventuele na-ijleffecten.

Het optreden van schade aan gebouwen wordt sterk bepaald door lokale omstandigheden, zoals de ondergrond, de kwaliteit van de fundering en de constructie en de grondwaterstand en de historie van belastingen op de constructie.

- In verband met de kwetsbaarheid van houten paalfunderingen wordt aanbevolen om in de gebieden waar relatieve peilverlagingen worden verwacht, gegevens van de bouwwerken op houten palen te verzamelen, om op die wijze inzicht te verkrijgen in de omvang van de problematiek.

Een aantal aanbevelingen, die in eerdere publicaties zijn gedaan en hier zijn herhaald, wordt momenteel al opgevolgd. Er zijn inmiddels op meerdere plaatsen versnellingsopnemers geplaatst. Er wordt ook detailonderzoek uitgevoerd naar schadegevallen en hun oorzaak, met gebruikmaking van de door TNO opgestelde schade opname-methodiek. Het laatste maakt deel uit van de onderhavige studie.

De vijfjaarlijkse publicatie van de bodemdalingsanalyse voor Groningen door de NAM draagt sterk bij aan het begrip in de samenleving van de oorzaken en gevolgen van de gaswinning. Uitbreiding van deze rapportage met de laatste inzichten in de oorzaken en gevolgen van aardbevingen in Groningen, in samenwerking met het KNMI, wordt daarom sterk aanbevolen.

Het tweede onderzoek

Het optreden van schade aan gebouwen wordt sterk bepaald door lokale omstandigheden, zoals de ondergrond, de kwaliteit van de fundering en de constructie, de staat van onderhoud, kwaliteit van aan- en verbouwingen, de grondwaterstand en de historie van belastingen op de constructie. In een apart opgesteld deelrapport van de onderhavige studie worden aanbevelingen gedaan om bij de schadeopname tot een onderbouwde beoordeling te komen van de oorzaak van een gemelde schade, waarbij de eerder genoemde aspecten worden meegenomen.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doelstelling

Naar aanleiding van de aardbeving op 8 augustus 2006 (Westeremden Groningen), met een *magnitude* van $M=3.5$ op de schaal van Richter, is bij burgers van Middelstum en omgeving ongerustheid ontstaan over de kracht van toekomstige aardbevingen en de schade die door deze aardbevingen veroorzaakt kan worden.

Gedeputeerde Staten van de Provincie Groningen heeft naar aanleiding van de vragen gesteld door de burgerij, in overleg met het College van B&W van de gemeente Loppersum, Nederlandse Aardolie Maatschappij en het Waterschap Noorderzijlvest een aantal onderzoeksvragen geformuleerd en deze aan Deltares en TNO Bouw en Ondergrond voorgelegd. Daarbij worden twee onderzoekslijnen onderscheiden:

De eerste onderzoekslijn heeft betrekking op de relatie tussen de aardgaswinning, de kracht van toekomstige aardbevingen en daaraan gerelateerde mogelijke gebouwschade. Er is in het verleden al onderzoek gedaan naar de relatie tussen aardgaswinning, aardbevingen en de kans op schade aan gebouwen. Toch blijven er bij burgers en bewoners vragen leven over de risico's gerelateerd aan de aardgaswinning. De vragen, zoals die door de Provincie zijn geformuleerd, zijn herkenbaar als vragen die in dit verband met enige regelmaat worden gesteld. In het onderhavige rapport zal ingegaan worden op deze vragen. Het doel van de eerste onderzoekslijn is op basis van inventarisatie en evaluatie van al verricht onderzoek antwoord te geven op de onderstaande vragen betreffende het risico op gebouwschade door aardbevingen, veroorzaakt door de gaswinning:

- Welke relevante onderzoeken zijn uitgevoerd naar het verband tussen de aardgaswinning, daaraan gerelateerde aardbevingen en gebouwschade?
- Is gebruik gemaakt is van de laatste stand van zaken van de techniek en wat zijn de resultaten van die onderzoeken.
- Kan op grond van de onderzoeken worden gesteld dat de maximaal te verwachten kracht van de aardbevingen, gerelateerd aan de aardgaswinning, 3.9 op de schaal van Richter zal bedragen? Wat moet worden verstaan onder de "maximaal te verwachten" kracht van aardbevingen?
- Wat zijn de mogelijke gevolgen in termen van gebouwschade? Kan op grond van het onderzoek een inschatting worden gemaakt van de aard en omvang van de schade aan gebouwen en zo ja, wat is de verwachte aard en omvang van de schade aan gebouwen? Wat zijn de ervaringen van bouw bureaus bij inspectie van de schade en is de schade in lijn met het beeld dat volgens de onderzoeksresultaten verwacht mag worden?

De tweede onderzoekslijn betreft het opzetten van een algemene methode voor de aanpak van onderzoek naar de oorzaken van gebouwschade, zonder vooronderstellingen van het schademechanisme vooraf. De achterliggende gedachte voor deze vraag is dat doorgaans bij de beoordeling van individuele schadegevallen alleen wordt nagegaan of er een verband bestaat met de aardgaswinning. Als wordt vastgesteld dat er geen verband bestaat (of de kans op een causaal verband heel klein is) wordt het onderzoek gestopt. Bewoners blijven echter zitten met de vraag naar de oorzaak van schade aan hun pand en de maatregelen die genomen kunnen worden om schade te verhelpen en verdere schade te voorkomen. De

doelstelling van deze onderzoekslijn is om te komen tot een algemene beoordelingsmethode die alle oorzaken meeneemt. Deze beoordelingsmethode wordt behandeld in TNO rapport 2009-D-R1322/B.

1.2 Opzet onderzoek en rapportage

Deze rapportage richt zich op de eerste onderzoekslijn; de relatie tussen aardgaswinning, de kracht van toekomstige aardbevingen en daaraan gerelateerde mogelijke gebouwschade. In het verleden zijn diverse onderzoeken uitgevoerd naar het verband tussen de aardgaswinning, aardbevingen en schade aan gebouwen. Deze rapportage beschrijft het verband tussen aardgaswinning, aardbevingen en schade en geeft daarnaast een inventarisatie en evaluatie van verricht onderzoek naar de relatie aardgaswinning en gebouwschade. In deze studie wordt niet alleen gekeken naar directe en indirecte schade ten gevolge van aardbevingen, maar ook naar (indirecte) schade ten gevolge van bijvoorbeeld peilaanpassingen ten gevolge van bodemdaling door aardgaswinning. Ook wordt ingegaan op de verwachting voor de toekomst. Welke maximale kracht van aardbevingen kunnen we in de toekomst verwachten en wat is de ernst van de schade die hierbij verwacht wordt. In de rapportage wordt beoordeeld of de voorspellingen uitgaan van recente, beschikbare en relevante gegevens en zijn bepaald volgens geaccepteerde “state-of-the-art” methoden, dat wil zeggen met de laatste stand van de techniek. Ook wordt aangegeven welke waarde er kan worden gehecht aan de nauwkeurigheid van de voorspelling.

1.3 Leeswijzer

De opzet van deze rapportage is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt inhoudelijk ingegaan op de effecten van aardgaswinning. Dit betreft zowel de effecten zoals die tot nu toe zijn opgetreden, in de vorm van aardbevingen en bodemdaling, als de effecten die in de toekomst verwacht kunnen worden. In hoofdstuk 3 wordt algemeen in gegaan op gebouwschade; wat is schade en hoe kan deze ontstaan. Er wordt aangegeven hoe aardgaswinning direct en indirect kan leiden tot schade aan gebouwen. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens ingegaan op de relatie tussen aardbevingen en schade. Hierbij wordt aandacht besteed aan de gevolgen van trillingen op gebouwen. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de gevolgen van zettingen, zowel ten gevolge van bodemdaling als van zetting van de ondergrond door trillingen. Ten slotte geeft hoofdstuk 6 de conclusies van het rapport. Aan het eind van hoofdstuk 6 is een opsomming gegeven van de aanbevelingen ter verbetering van de prognoses.

Ten behoeve van de leesbaarheid is na hoofdstuk 6 een omschrijving gegeven van de belangrijkste begrippen. Ten slotte is de literatuurlijst weergegeven.

In het rapport worden op meerdere plaatsen aanbevelingen gedaan en conclusies getrokken. Wanneer een aanbeveling of conclusie is overgenomen uit literatuur is dit aangegeven. Wanneer een aanbeveling of conclusie niet is voorzien van een literatuurverwijzing, dan komt deze aanbeveling van de auteurs van dit rapport

2 Effecten van aardgaswinning in Noord Nederland

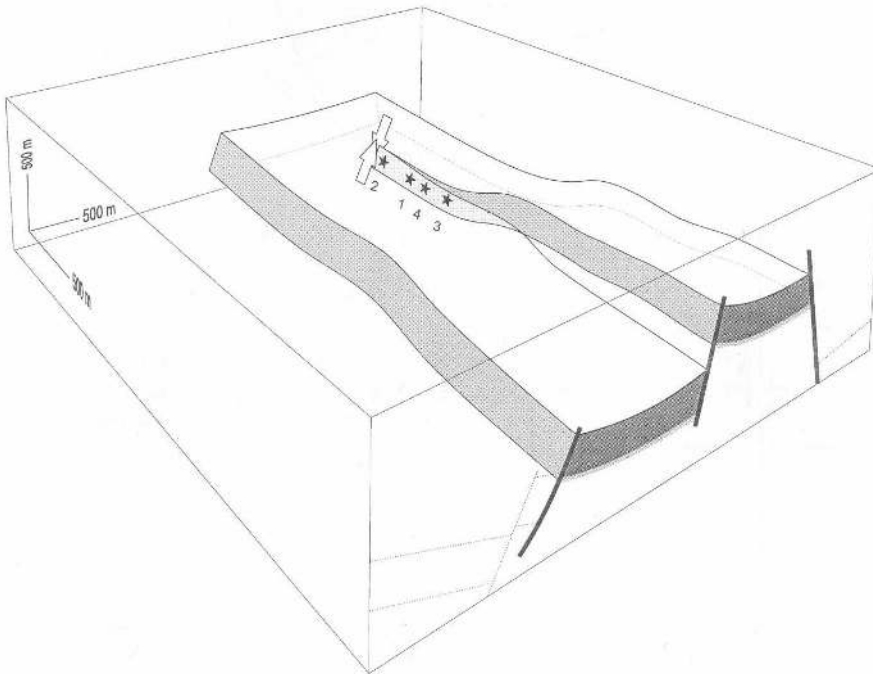
2.1 Historie

2.1.1 Algemeen

Na een succesvolle proefboring naar gas bij Slochteren op 29 mei 1959, werd op 22 juli 1959 door de NAM het eerste gas gewonnen uit het Groningen-veld. Het Groningen-veld is het grootste gasveld van Nederland en heeft een oppervlakte van ongeveer 900 km² en een totale oorspronkelijke winbare gasvoorraad van naar schatting 2700 miljard m³. Jaarlijks wordt er gemiddeld over de laatste 10 jaar 31 miljard m³ aardgas gewonnen, variërend van ca. 21 miljard m³ tot 43,5 miljard m³ [bron: NAM en jaarverslagen Staatstoezicht op de Mijnen].

Het reservoirgesteente in het Groningen-veld bestaat uit de Slochteren Zandsteen Formatie (Upper Rotliegend). Deze formatie vormt het belangrijkste reservoirgesteente in Nederland. Het gasveld varieert in diepte van ongeveer 3150 tot 2600 meter. Het veld wordt met name in het noordwesten doorsneden door een aantal grote breuken die ongeveer noordwest-zuidoost georiënteerd zijn. De zoutstructuren van de Zechstein Groep (geologische formatie) sluiten het reservoir van boven af.

Als gevolg van de aardgaswinningen zijn er in Noord Nederland regelmatig aardbevingen en is er sprake van bodemdaling. Mulders geeft een uitgebreide beschrijving van deze geomechanische processen [10]. De gaswinning veroorzaakt een daling van de druk in het reservoirgesteente, waardoor het compacteert. Aan weerszijden van de breuken, die het gasreservoir in compartimenten opdelen, ontstaan verschillen in druk en mate van compactie. Hierdoor ontstaan schuifspanningen langs de breuken. Bij breuken die door de interne stroefheid van het gesteente niet meebewegen kan op enig moment de spanning de weerstand van de breuk overschrijden, waardoor de breuk weer gaat bewegen. Als dit plotseling, schoksgewijs gebeurt, kan dit als een aardbeving worden waargenomen (Figuur 2.1). Uit de gegevens van alle producerende gasvelden in Nederland zijn relaties opgesteld tussen de eigenschappen van de ondergrond, de winningsmethode en de drukveranderingen [44]. Uit deze studie blijkt dat de gasvelden waar aardbevingen zijn waargenomen overeenkomsten vertonen met betrekking tot de gesteente typen.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het ontstaan van aardbevingen door het optreden van spanningen langs een breuk in een gasreservoir, veroorzaakt door verschillen in compactie aan weerskanten van de breuk.[6]

De aspecten aardbevingen en bodemdaling worden onderstaand nader geanalyseerd.

2.1.2 Aardbevingen

Aardbevingen kunnen gekarakteriseerd worden door twee schalen. De magnitude, bekend als de schaal van Richter, is een maat voor de sterkte van de bron van de trillingen. De intensiteit is een maat voor het effect van een aardbeving op een bepaalde locatie [14].

De magnitude wordt bepaald aan de hand van registraties van seismografen. Hierbij wordt gecorrigeerd voor de afstand tussen het seismisch station en de beving en voor de diepte van de beving. Uit het seismogram is af te leiden wat de afstand is van het station tot het epicentrum. De bepaling van de plaats van en magnitude in het hypocentrum gebeurt aan de hand van meerdere registraties op verschillende plaatsen [14].

De intensiteit van een aardbeving is een aanduiding voor wat op een bepaalde plaats wordt waargenomen van een aardbeving, dus wat de effecten zijn op bijvoorbeeld mensen en gebouwen. Deze hangt in de eerste plaats af van de magnitude van de beving, maar ook van de afstand tot het epicentrum, van de diepte van de beving en van de opbouw van de bodem. In Nederland heeft het KNMI na een aardbeving aan de hand van enquêtes, de intensiteit bepaald. Hiervoor wordt de Europese Macroseismische Schaal (EMS) gebruikt (zie Bijlage A). De intensiteit neemt af naarmate men verder van de bron verwijderd is, maar door bijvoorbeeld de variaties in de bodemopbouw kunnen de contouren van gelijke intensiteit een onregelmatige vorm hebben. Tegenwoordig wordt door het KNMI uit versnellingsmetingen in de bodem en daaruit afgeleide *response spectra* berekend, welke trillingsniveaus zijn opgetreden bij een aardbeving, afhankelijk van de locatie [6].

De eerste aardbeving van het Groningen gasveld werd waargenomen op 5 december 1991 en had een kracht van 2.4 op de schaal van Richter. Sinds 1991 zijn er gemiddeld 3 bevingen per jaar met een magnitude groter dan 2.0. De diepte van de bevingen wordt geschat op circa 3 kilometer, maar hier zit wel een onzekerheid aan vast [6]. Er zit ook een onzekerheid in de locatie van het epicentrum, maar die is kleiner. Ondanks deze onzekerheden is het duidelijk dat het overgrote deel van de aardbevingen plaatsvindt op reservoirniveau, in de buurt van de steile NW-ZO georiënteerde afschuivingsbreuken in het westen van het veld. De reactivatie van ondiepe breuken die zijn gerelateerd aan zoutstructuren is niet voor de hand liggend, gezien de locatie van de bevingen en omdat de spanningsveranderingen boven het reservoir daarvoor te klein zijn [10]. De aardbevingen zullen dus overwegend in het reservoir (blijven) plaatsvinden. Dit is ook afgeleid in de studie naar het Bergermeer veld bij Alkmaar [9]. Een dergelijke geomechanische studie is voor het Groningen-veld niet uitgevoerd.

In Bijlage C wordt een overzicht gegeven van de door het KNMI geregistreerde geïnduceerde aardbevingen gerelateerd aan het Groningen-veld [bron: KNMI]. Sinds de start van de gasproductie tot september 2009 zijn er circa 340 bevingen op een diepte tussen 2,5 en 3 kilometer geregistreerd. Vier hiervan hadden een magnitude (M) van 3.0 of hoger op de schaal van Richter:

• Zeerijp	8 mei 2009	M = 3.0
• Westeremden	30 oktober 2008	M = 3.2
• Westeremden	8 augustus 2006	M = 3.5
• Stedum	10 november 2003	M = 3.0
• Hoeksmeer	24 oktober 2003	M = 3.0

Hoewel er geen duidelijke trend gezien wordt in de toename van de totale hoeveelheid energie die vrijkomt door aardbevingen in Noord Nederland, zijn er wel variaties in de hoeveelheid aardbevingen per veld/regio. In een vergelijking van het aantal bevingen moet overigens wel worden bedacht dat daar zowel kleine als grotere aardbevingen bij betrokken zijn, vandaar dat de cumulatieve energie een betere maat is [6]. Sinds 1996 wordt er een netwerk van accelerometers door het KNMI opgebouwd. In de beginperiode (1996-2000) was dit met name rond Roswinkel, maar de laatste jaren is dit verder uitgebreid naar 14 stuks in Noord Nederland. De accelerometergegevens worden gebruikt om betere schattingen te krijgen van de maximale versnelling die optreedt in de buurt van het epicentrum, maar kunnen ook gebruikt worden voor de bepaling van de locatie, de diepte en het haardmechanisme van de beving. Het KNMI werkt aan een modellering van de accelerometerdata rond Westeremden. Volgens mondelinge informatie van het KNMI geven de eerste resultaten inderdaad betere schattingen van de diepte van de beving en het haardmechanisme.

Zetting door trillingen

Trillingen, en dus ook aardbevingstrillingen kunnen fijn- tot matig fijn-zandige losgepakte grond verdichten. In fijn zand en silt kan dit zelfs leiden tot vervloeien (liquefaction), dat tot grote zettingen kan leiden. Bij de aardbeving in 1992 in Roermond is dit bijvoorbeeld in Herkenbosch voorgekomen [42]. Voorwaarde is dat, naast de korrelgrootteverdeling van de lagen, ook een minimale sterkte en duur van de trilling moet optreden. Op het grondgebied van Groningen is hiernaar onderzoek uitgevoerd in de voorstudie voor de gaswinning in de Waddenzee [39]. De studie is beperkt tot het effect van vervloeïng op de zeeweringen. Daarbij is geconcludeerd dat er bij aardbevingen met een magnitude van 3,8 mogelijk instabiliteit ontstaat. Vervloeïng is tot op heden niet waargenomen.

2.1.3 Bodemdaling

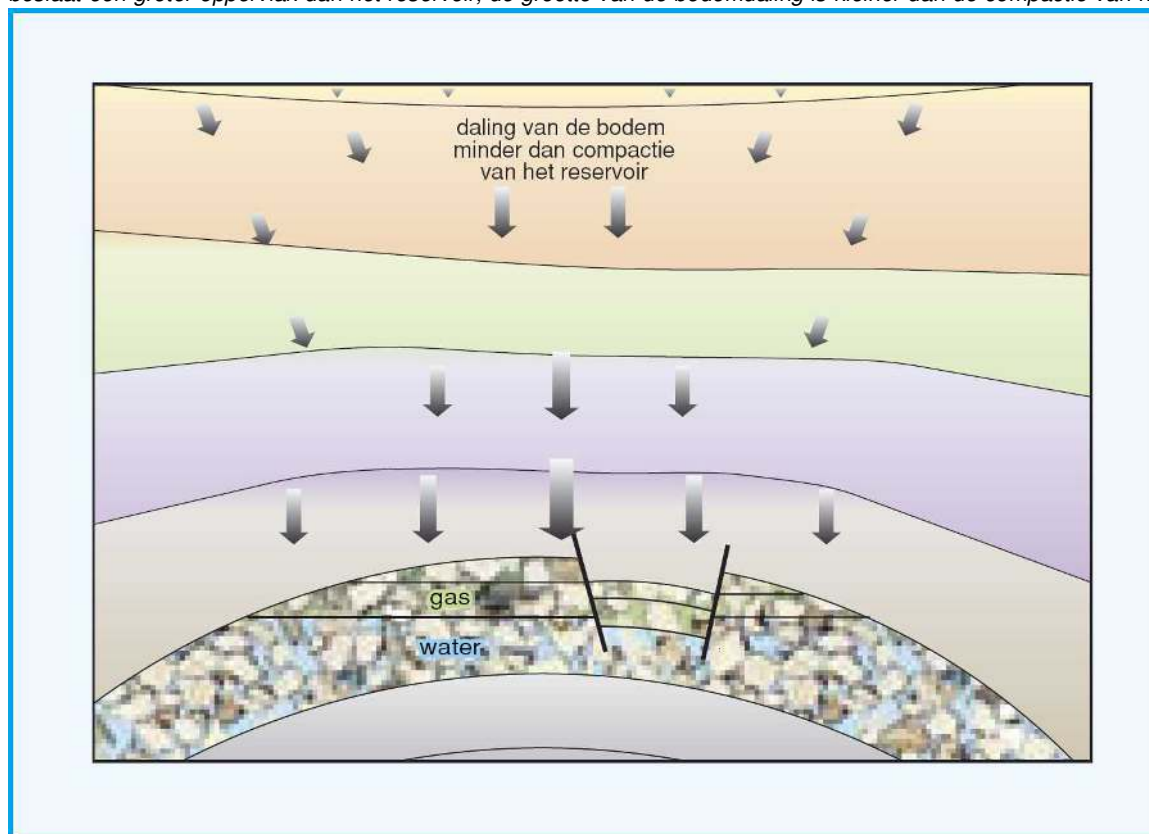
Er zijn in het kader van aardgaswinning twee relevante mechanismen die bodemdaling kunnen veroorzaken[24]. Er is hierbij sprake van directe en indirecte effecten.

1. Directe bodemdaling door drukverlaging in het gesteente waar de aardgas gewonnen wordt; diepe oorzaak.
2. Compactie (klink) en veenoxidatie door het (relatief) verlagen van de grondwaterstand; een ondiepe, indirecte oorzaak.

Bodemdaling door drukverlaging in het gesteente waaruit gas gewonnen wordt

De winning van aardgas leidt tot een verlaging van de druk in het gesteente, waardoor in deze laag compactie optreedt. Door het gewicht van de bovenliggende lagen zullen deze lagen zakken en zal dus ook het maaiveld zakken. Deze effecten spelen op regionale schaal boven het gehele gasreservoir.

Figuur 2.2 Ontstaan van de bodemdalingskom door compactie van het reservoir. De bodemdalingskom beslaat een groter oppervlak dan het reservoir, de grootte van de bodemdaling is kleiner dan de compactie van het



reservoir. Ontleend aan [12]

De NAM dient eens in de vijf jaar te rapporteren over de bodemdalingsverwachtingen, rekening houdend met resultaten van actuele metingen en specifiek onderzoek op dit gebied. De bodemdaling wordt sinds het begin van de exploitatie van het Groningen gasveld in 1964 regelmatig gemeten door middel van optische waterpassingen. Hierdoor konden de voorspellingen bij iedere prognose verbeterd worden. Evaluatie van de prognose uit 2000 laat zien dat de toen gedane voorspelling over bodemdaling door gaswinning correct is gebleken. Boven het centrum van het Groningen-gasveld is een maximale bodemdaling tussen 1964 en 2003 opgetreden van 24,5 cm (Figuur 3.1). In 2008 was dit opgelopen tot 30 cm. De verschillen tussen de voorspelde en in 2003 en 2008 gemeten bodemdaling zijn gemiddeld

kleiner dan 10% [12], 0. De afwijkingen van de voorspelde gelijkmatige dalingskom worden veroorzaakt door ondiepe factoren, die invloed hebben op de meetpunten en modelaannames over de diepe compactie. De meetpunten zijn doorgaans gefundeerd in stabiele Pleistocene ondergrond. De kwaliteit van de fundering van het meetpunt en lokale ondiepe ondergrondopbouw kunnen echter variëren. Onzekerheden in de gebruikte eigenschappen van de diepe ondergrond en het gebruikte rekenmodel voor de compactie dragen verder bij aan de marges. De voor de bodemdalingsprognose bepaalde onzekerheidsmarges uit deze oorzaken bedragen 15 tot 30%. De waargenomen afwijking van 10% valt hier binnen.



Figuur 2.3 Contourkaart van de bodemdaling door aardgaswinning opgetreden tussen 1964 en 2008. Daling weergegeven in cm

Bodemdaling door verlaging of verhoging van de grondwaterstand

Door een verlaging van de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld neemt de waterspanning in de poriën af en zullen samendrukbare lagen zoals klei en veen inklinken. Als veen droog komt te staan, zal dit “verbranden” doordat er zuurstof bij het organisch materiaal komt (veenoxidatie). Dit geldt ook voor de opgebrachte grond in de wierden, afhankelijk van het materiaal waaruit deze zijn opgebouwd. Beide processen treden normaliter al op, aangezien de grondwaterstand (enkele decimeters) beneden maaiveld gehouden wordt (drooglegging). In veel rapportages wordt deze vorm van bodemdaling getypeerd als “autonoom”, omdat het standaard optreedt bij het ontwateren van gronden. Het is echter wel een gevolg van de keuze om de grond te ontwateren tot een bepaalde diepte. Als de grondwaterstand onder de historisch laagste grondwaterstand zakt, zal er versterkte bodemdaling optreden, omdat er dan relatief veel klink veroorzaakt wordt. Het deel van de bodem dat nog niet eerder blootgesteld is geweest aan “droge” omstandigheden zal namelijk snel en relatief veel reageren door uittreding van grondwater.

Door de aardgaswinning zakt de hele bovenste laag van de bodem in een soort komvorm naar beneden (Figuur 2.2). Om te voorkomen dat de drooglegging vermindert, wordt een peilcorrectie doorgevoerd ter grootte van de bodemdaling. De bodemdaling aan de randen van de “kom” is echter niet zo groot als in het centrum. Daarom wordt er bij de vormgeving van de peilvakken rekening gehouden met de gemiddelde bodemdaling per peilvak. Peilvakken kunnen echter om praktische en beheerstechnische redenen niet te veel versnipperen en daardoor ontstaan er binnen de peilvakken plekken waar de peilcorrectie ten opzichte van de bodemdaling te groot of te klein is. Een te grote peilcorrectie leidt tot een toename in de ontwateringsdiepte, waardoor er versnelde bodemdaling als gevolg van klink of extra veenoxidatie kan ontstaan, afhankelijk van de bodem. Een te kleine peilcorrectie kan leiden tot een verminderde ontwateringsdiepte. Dit kan leiden tot minder draagkracht van de bodem, wat bij funderingen op staal kan leiden tot het zakken van de fundering [16,30]. Deze zakking is in de regel zo gering dat daardoor geen schade ontstaat (zie 5.4).

Samenvattend kan gezegd worden dat de waterhuishouding door het tegelijk voorkomen van ondiepe bodemdaling en bodemdaling door gaswinning complex is. De grondwaterstand in de polders is niet alleen afhankelijk van de drooglegging, hoewel dit wel een belangrijke factor is. Andere aspecten die van invloed zijn op de grondwaterstand zijn neerslag en verdamping, mogelijke grondwateronttrekkingen, bodemopbouw en de afstand tot ontwateringsmiddelen (sloten, lekke riolen, drainage). Deze laatste factoren zijn uiteraard alleen bekend op lokale schaal, na metingen ter plaatse. De boezempeilen zijn gekoppeld aan het benodigde niveau van het afwateringsstelsel en deze peilen zullen dus aangepast worden aan de bodemdaling. Omdat de gemiddelde bodemdaling in een gebied wordt gevolgd zal dit in sommige plaatsen leiden tot peilverlaging en in andere in peilverhoging. In verschillende gebieden zijn inmiddels peilbesluiten genomen om de bodemdaling door aardgaswinning te compenseren [24]. In 2008 is in de zogenaamde Tweede Schil een boezempeilverlaging van 14 cm gerealiseerd. De effecten hiervan worden momenteel onderzocht [41]. Met betrekking tot de schaal van deze verlagingen kan daarbij opgemerkt worden dat in grote delen van Groningen, om redenen, niet gerelateerd aan de gasdaling, het open waterpeil in de afgelopen 100 jaar meer dan 1 m is verlaagd, in een aantal gevallen na 1960. In die gebieden zal een relatief geringere verlaging nog weinig extra bodemdaling veroorzaken.

2.2 Toekomst

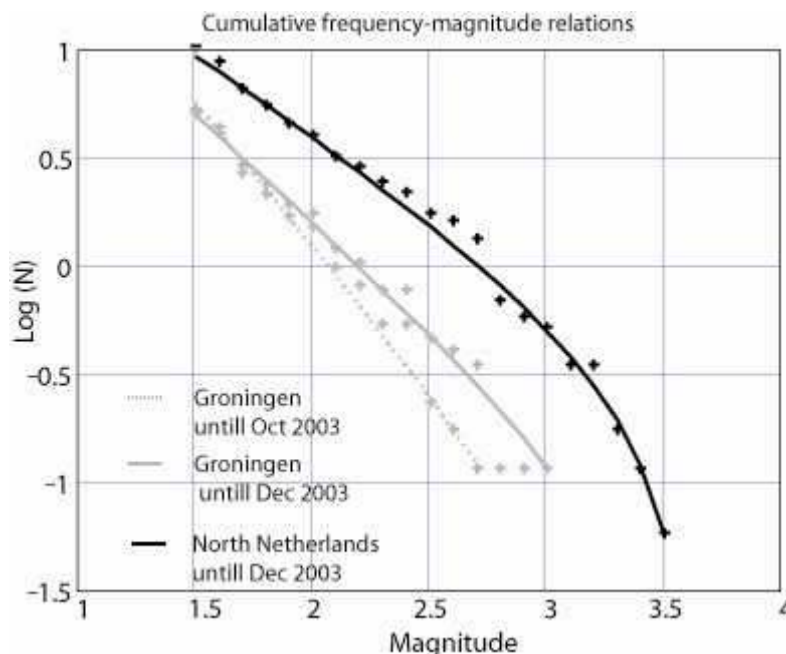
2.2.1 Maximale magnitude, intensiteit en kans op beven

De maximale *magnitude* ($M_{\max}$) is de *magnitude* die hoort bij de ‘maximale aardbeving’. Er zijn verschillende definities van het begrip maximale aardbeving [5]. In het algemeen wordt onder de maximale aardbeving verstaan de zwaarste aardbeving die zou kunnen plaatsvinden in een bepaald tijdsinterval en in een bepaalde regio. De kans dat een dergelijke beving daadwerkelijk optreedt is overigens zeer klein.

De maximale *magnitude* wordt bepaald door gebruik te maken van:

- Statistische methoden [3][4][6][7]. Bij een dergelijke methode wordt op basis van historische gegevens de verwachting voor de toekomst bepaald, rekening houdende met statistische onzekerheden.
- Fysische modelleringen [3][9][11]. Bij een dergelijke methode wordt een model gemaakt van de ondergrond en het gasreservoir en wordt gemodelleerd wat voor bewegingen er kunnen plaatsvinden langs breuken in het reservoir. Met een inschatting van het totale breukoppervlak en de stijfheid langs de breuk kan een schatting worden gemaakt van de bijbehorende kracht van de aardbeving. De aannames over de eigenschappen van de ondergrond bevatten grote onzekerheden. Deze modellering is daarom geen alternatief voor de statistische methode, maar ondersteunt de interpretatie van de waarnemingen.

Statistische methodes zijn toegepast voor *geïnduceerde seismiciteit* in Noord Nederland, waaronder het Groningen gasveld, maar bijvoorbeeld ook voor velden in Noord Holland (Alkmaar, Bergermeer). De meest recente rapportage van het KNMI [7] gaat uit van de dataset van geïnduceerde aardbevingen in de periode 1986 tot en met oktober 2003.



Figuur 2.4 Bepaling van de gemiddelde maximale magnitude uit de dataset van aardbevingen tussen 1986 en 2003 door KNMI [7]. Te zien is hoe de afleiding verandert door de dataset te updaten (Groningen) en hoe de afleiding met de hele dataset van Noord-Nederland zich verhoudt tot die van Groningen.

In die rapportage wordt een kansverdeling bepaald voor de maximale *magnitude*. Het gemiddelde is $M_{\max} = 3.6$ met een standaardafwijking van 0.3. De maximale *magnitude* is vervolgens pragmatisch benaderd door bij de gemiddelde maximale *magnitude* één keer de standaardafwijking op te tellen [4]. Dit resulteert in een maximale *magnitude* van 3.9. In de periode na oktober 2003 zijn er in Nederland geen geïnduceerde bevingen geweest met een *magnitude* groter dan de grootste *magnitude* (Alkmaar, $M = 3.5$) in de periode 1986-2003. Daarom verwacht het KNMI dat een herhaling van de statistische analyse op de dataset van 1986 tot heden geen significant andere resultaten zal geven (pers. comm. KNMI).

Omdat de statistische methode is gebaseerd op een relatief korte registratieperiode en omdat de maximale waarde is berekend op basis van een pragmatisch verrekende spreiding, zit er in de maximale *magnitude* van 3.9 nog enige onzekerheid. De gehanteerde spreiding dekt 84 % van de theoretische verdeling. Daarom wordt geadviseerd om elke vijf jaar een nieuwe analyse te maken, teneinde zoveel als mogelijk up-to-date te blijven. Het niet-optreden van een relatief grote magnitude wil namelijk niet per definitie zeggen dat de statistische analyse geen andere uitkomsten zal geven.

De zo bepaalde maximaal te verwachten kracht van aardbevingen kan onderbouwd worden door berekening aan de hand van reservoir parameters, zoals breukoppervlaktes, drukverschillen en slip (verplaatsing) langs de breuk. Door bovengrenzen te kiezen voor de verschillende parameters kan een schatting gemaakt worden van de maximaal te verwachten kracht. Een dergelijke fysische benadering is eerder toegepast voor het Bergermeer veld [9][11]. Voor het Groningen-veld is de maximale *magnitude* in 1995, op basis van dit vereenvoudigde model, vastgesteld op $M_{\max} = 3.5$ op de schaal van Richter [3], een magnitude die in 2006 al een keer is opgetreden. In deze waarde zit een onzekerheid, met name vanwege onzekerheden in het model en in de gebruikte parameters.

Het geomechanisch model geeft ook inzicht in de plaats waar de aardbevingen optreden en de richting van de beweging, wat factoren zijn die meegenomen worden in de analyse en voorspelling van de trilling aan het aardoppervlak.

Voor zowel de fysische als de statistische analyses geldt dat er aannames worden gedaan. Bij de statistische benadering worden aannames gedaan omtrent de frequentie-magnitude relatie en tijdsvolgorde en onafhankelijkheid van de individuele aardbevingen. Bij fysische modellen moet de balans gevonden worden tussen een simpele benadering, met weinig parameters en bijbehorende onzekerheden, of een gedetailleerde benadering, waarbij voor alle parameters onzekerheden meegenomen dienen te worden. Voor beide analyses geldt dat hier sprake is van voortschrijdend inzicht. Vanuit het oogpunt van statistische betrouwbaarheid is ervoor gekozen om de analyse niet op afzonderlijke velden toe te passen. Het aantal aardbevingen, de 'populatie', wordt dan dermate klein dat er geen statistisch betrouwbare uitspraken gedaan kunnen worden (pers. comm. KNMI). Door met enige regelmaat de analyse herhalen op de groter wordende dataset neemt de betrouwbaarheid van de voorspellingen daarom toe. Ook het inzicht in het geomechanisch model verbetert in de tijd.

Ten aanzien van de gevolgen van de aardbevingen geldt voor lichte ondiepe aardbevingen in Noord-Nederland, met een gemiddelde diepte van 2.3 km in de periode 1986-1997, een algemene relatie tussen de *magnitude* en de intensiteit [4]. Volgens deze relatie komt een beving van 3.8 of 3.9 op de schaal van Richter overeen met een intensiteit van VI-VII in het epicentrale gebied (zie Bijlage A), dat wil zeggen het gebied direct boven de beving waar de beving het heftigst gevoeld wordt. Een intensiteit van VII betekent volgens deze schaal dat er matige tot zware schade voorkomt. Het type schade is afhankelijk van de bouwwijze. Nederlandse woningen in metselwerk vallen in gebouwtipe B. Veel gebouwen van type B lijden schade van gradatie 2: lichte constructieve schade in de vorm van scheuren en vallend pleisterwerk. Enkele gebouwen lijden schade van gradatie 3: matige constructieve schade in de vorm van grote scheuren, wegglijden van dakpannen en breken van schoorstenen. De meeste moderne gebouwen met gewapend betonnen elementen lijden geen constructieve schade, enkele lijden schade van gradatie 2. Zie verder 3.2 en 4.3.

Ten aanzien van de intensiteit geldt echter dat de inschatting daarvan gerelateerd is aan de wijze waarop gebouwd wordt. Voor een objectieve inschatting van de gevolgen van aardbevingen is het daarom noodzakelijk om te weten wat er daadwerkelijk aan het aardoppervlak (en dus in de constructie) gebeurt. Om dit te kunnen bepalen is de *magnitude* alleen niet voldoende. Daarvoor is het noodzakelijk om de pieksnelheden, de piekversnellingen en de dominante frequenties van de trillingen die aan het oppervlak optreden te bepalen (wordt behandeld in hoofdstuk 4).

Zetting door trillingen

Trillingen kunnen zetting van losgepakte zandlagen veroorzaken. Losgepakte fijnkorrelige zanden kunnen zelfs gaan vervloeien door wateroverspanning. Er bestaat tot nu toe maar 1 rapport waarin dit fenomeen wordt beschouwd in relatie tot bevingen in Noord-Nederland [39]. Hierin wordt de kans op schade aan de primaire waterkeringen beschouwd. De conclusie uit het numerieke modelonderzoek in deze studie is dat bij een magnitude van 3,8 er een geringe kans is op schade aan het onderwatertalud bij aanwezigheid van de genoemde lagen in de ondergrond. Dit fenomeen is tot op heden niet waargenomen. Uit geologische studies [45] is bekend dat er losgepakte fijn-zandige lagen kunnen voorkomen in de Holocene bedekking van Groningen. Bij opgetreden zettingsschade kan zettingsvloeiing niet uitgesloten worden. Bij onderzoek aan een door zetting beschadigd pand zou de mogelijke aanwezigheid van lagen in de ondergrond die hiervoor gevoelig zijn daarom meegenomen moeten worden. Bij gebouwen op palen gefundeerd op stevige zandlagen speelt dit fenomeen geen rol. Omdat de studie naar de invloed op waterkeringen uitgegaan is van een maximale magnitude van 3,8 wordt aanbevolen de berekeningen te actualiseren naar de meest recente verwachte magnitude (3,9) en versnellingen.

2.2.2 Het bepalen of inschatten van de verwachte bodemdaling

De bodemdaling is het gevolg van compactieprocessen in de diepe bodemlagen waar het gas gewonnen wordt en het ontwateren van de bovenste bodemlagen door het waterbeheer. Hoewel beide processen niet als volledig losstaand beschouwd kunnen worden, wordt hier eerst uitgelegd hoe de schatting van bodemdaling door aardgaswinning en daarna door ontwatering tot stand is gekomen.

Bodemdaling door drukverlaging in het gesteente waaruit gas gewonnen wordt

Het bepalen van de bodemdaling door de aardgaswinning is gebaseerd op meetgegevens uit het verleden en een compactiemodel dat zoveel mogelijk de processen beschrijft. Dit model kan dan vervolgens gebruikt worden voor een toekomstvoorspelling. Het komen tot een goede voorspelling is dan ook een samenspel van het goed interpreteren van hoogtemetingen (die ook processen in de bovenste bodemlagen meten) en het afstemmen van het model aan de hand van de bodemdaling in het verleden. Eerst zal hier ingegaan worden op de metingen en vervolgens op de modellering.

In Groningen is een groot aantal meetpunten aangebracht om de bodemdaling te monitoren. Er zijn grofweg twee soorten meetpunten op basis waarvan de bodemdaling bepaald kan worden. Dit zijn de bovengrondse en ondergrondse meetpunten. Hoogtemetingen zijn geen absolute metingen: er worden veranderingen in de tijd gemeten ten opzichte van andere punten (die ook kunnen bewegen). Dit maakt interpretatie van de gegevens relatief ingewikkeld, maar is met de huidige statistische instrumenten wel goed mogelijk [23].

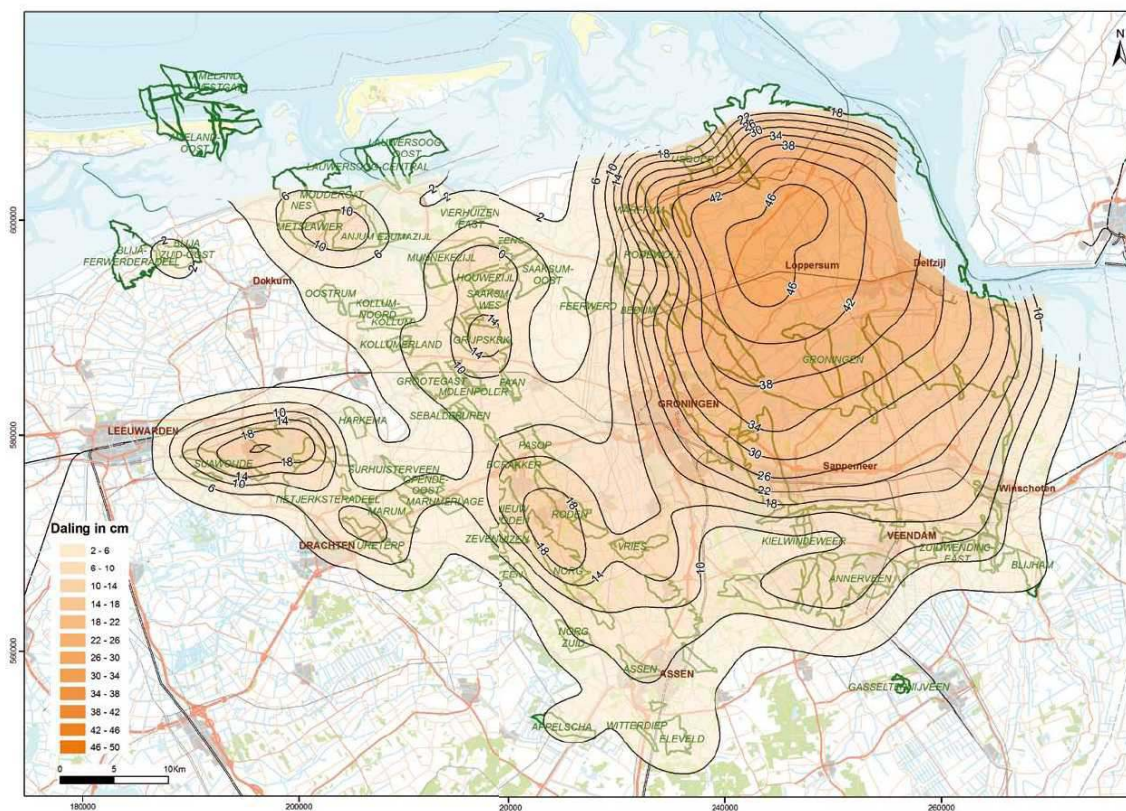
De bovengrondse meetpunten meten de bodemdaling aan objecten die zowel op palen in de stabiele pleistocene ondergrond als ondiep “op staal” gefundeerd zijn. Bij deze meetpunten

moet een correctie gemaakt worden voor het bewegen van die objecten ten opzichte van het maaiveld. Als deze correctie gemaakt kan worden, wordt met deze meetpunten de totale maaiveldaling gemeten: dus diep en ondiep.

De ondergrondse meetpunten (eerste orde peilmerken) zijn gefundeerd op een diepe stabiele ondergrondlaag die alleen verandert door diepe bodemdaling als gevolg van de aardgaswinning. Deze meetpunten zijn daarmee het meest geschikt om te gebruiken voor de kalibratie van het compactiemodel. Afwijkingen van de meetwaarde aan de bovenkant ten opzichte van de beweging van de diepe funderingslaag kunnen voorkomen ten gevolge van het verschijnsel “negatieve kleeft”. De bovenste lagen “kleven” namelijk aan de funderingspaal van de ondergrondse meetpunten, waardoor een compacterende bovenlaag een neerwaartse belasting op het peilmerk uitoefent. Deze afwijkingen zijn echter een orde kleiner dan de bodemdaling door de gaswinning [46].

De NAM maakt iedere vijf jaar een voorspelling van de maaiveldaling als gevolg van de ontwikkelingen in de diepe ondergrond. Hiervoor wordt een compactiemodel gebruikt dat gekalibreerd wordt met de metingen uit de waterpassingen. Uit de rapportage van 2005[12] blijkt dat de verwachte bodemdaling als direct gevolg van de aardgaswinning van 1964 tot 2050 maximaal 0,42 m zal bedragen in het centrum van het Groningen-gasveld, met een onzekerheidsmarge van 15%. Naar de randen van het veld en boven de recentst ontwikkelde gasvelden wordt een onzekerheidsmarge van 25%, respectievelijk 30% gehanteerd. Ter vergelijking: de in 2003 waargenomen bodemdaling week gemiddeld 10 % af van de in 2000 voorspelde daling.

In de rapportage van 2010 zijn de getallen bijgesteld op basis van de nieuwe waarnemingen [47]. Hierin is de voorspelling gemaakt voor 2070, het eind van productie. De verwachte bodemdaling in 2070 zal maximaal tussen 0,40 en 0,54 m bedragen in het centrum van het Groningen-gasveld, met een onzekerheidsmarge van 15% (Figuur 2.5). Naar de randen van het veld en boven de recentst ontwikkelde gasvelden wordt een onzekerheidsmarge van 25%, respectievelijk 30% gehanteerd. Ter vergelijking: de in 2008 waargenomen bodemdaling in het centrum van de schotel (30 cm) was 2 cm meer dan de in 2005 voorspelde daling.



Figuur 2.5 Prognose bodemdaling door gaswinning voor het jaar 2070. Daling weergegeven in cm

Het voorspellen van bodemdaling als gevolg van aardgaswinning is alleen goed mogelijk als er voldoende inzicht is in de ontwikkeling van de bodemdaling door aardgaswinning in het verleden. Dit inzicht is gebaseerd op modelvoorspellingen in het verleden, gecombineerd met monitoringsgegevens. De modellen zijn gebaseerd op geomechanische kennis die is verkregen uit de ervaringen in het verleden en uit andere gaswinningslocaties.

Het geomechanische model is nodig voor het maken van voorspellingen, maar de parameters die hierin gebruikt worden, moeten gekozen worden op basis van de bodemdaling in het verleden. De juiste interpretatie van de bodemdalingmetingen is hierbij cruciaal. In het recent verschenen rapport van de TCBB, "Van meting naar daling" [23] wordt door een aantal deskundigen als aanpak aanbevolen het doorlopen van drie stappen:

1. Toetsen van de hoogtemetingen op meet- en modelfouten volgens de gangbare geodetische methodiek.
2. Berekening van relatieve hoogteveranderingen in de peilmerken.
3. Vergelijking van de uitkomsten van het geomechanische model met de uit de hoogtemetingen afgeleide bodemdaling.

De prognose uit 2005, gepubliceerd door de NAM is gebaseerd op deze werkwijze. Veel aandacht gaat in dit rapport uit naar de inrichting en kwaliteit van het meetnet en de metingen in relatie tot de met het geomechanisch model voorspelde daling. Overigens zal de afgeleide huidige en toekomstige maximale bodemdaling in Groningen als gevolg van de gaswinning hierdoor niet wezenlijk veranderen omdat er voldoende goed gefundeerde meetpunten in het Groningen-veld zijn.

Bodemdaling door verlaging van de grondwaterstand

In 2.1.3 is het effect van de gasdaling beschreven op de waterhuishouding. De waterschappen hebben, uit hoofde van hun verantwoordelijkheid voor de waterhuishouding aanpassingen doorgevoerd om deze effecten te minimaliseren en zullen dit blijven doen. In opdracht van de Commissie Bodemdaling zijn methodieken opgesteld om de effecten van deze maatregelen te bepalen en hiervoor richtlijnen vast te stellen. In het in 1987 door de Commissie Bodemdaling uitgegeven overzicht van studieresultaten naar bodemdaling en aardgaswinning in Groningen, het zogenaamde “Groene Boek”, [24] wordt een methode aangereikt om een peilcorrectie te kunnen vertalen naar een risico voor de bebouwing. De risicobenadering loopt via een keten van o.a. oppervlaktewaterpeilverlaging – grondwaterstandverlaging – zetting – schade aan bebouwing.

Deze methode als zodanig is nog steeds de meest logische route om een risico-inschatting te maken. Daarentegen voldoen de daarin gedane vereenvoudigde relaties tussen de verschillende onderdelen in de keten niet meer aan de stand van de kennis en dataverwerking. Inmiddels zijn er analysetechnieken en ruimtelijke modellen beschikbaar, waarmee het goed mogelijk is om de risico's ruimtelijk te differentiëren [33].

In de gevallen waarin de slootpeilen niet op een bepaalde NAP-hoogte worden gehandhaafd zullen de slootpeilen vanzelf meezakken met de gasgerelateerde komdaling, omdat de gemalen meezakken. De opvoerhoogte naar de boezem wordt daardoor groter en het boezempeil stijgt daardoor relatief ten opzichte van het omliggende terrein. De beheersmaatregelen zullen zich daarom grotendeels beperken tot het geleidelijk volgen van de bodemdaling van watergangen, die op een NAP-peilhoogte worden gehouden.

De hierboven genoemde maatregelen zorgen ervoor dat de ingestelde peilen de bodemdaling door de gaswinning volgen. Hierdoor kunnen de zettingen binnen de toelaatbare normen blijven. Lokale schadegevallen kunnen echter niet uitgesloten worden als gevolg van lokale ongunstige ondergrond, zwakke fundering of staat van het gebouw en een relatieve verlaging van het waterpeil. In 2008 is de zogenaamde Tweede Schil van de Electraboezem een peilverlaging doorgevoerd van 14 cm. Als gevolg van de reeds opgetreden bodemdaling wordt het waterpeil ten opzichte van maaiveld (relatieve peilverandering) in het westen van de tweede schil maximaal met 12 cm verlaagd. In het oosten van de Tweede Schil treedt een relatieve peilverhoging op van maximaal 3 cm. Ook in het Pekelerhoofddiep is sprake van een relatieve peilverlaging.

In het “Groene Boek” [24] is de toelaatbare slootpeilverlaging bepaald voor de basis grondtypen veen, klei en zand waarbij de vergroting van de kans op schade niet groter wordt dan 5%, op respectievelijk 0,13 m, 0,20 m en 0,32 m. Voor een aantal panden langs het Pekelerhoofddiep is met een nieuwe geavanceerde methode de kans op schade door zettingen als gevolg van een relatieve peilverlaging berekend. Deze methode wordt nu ook toegepast op een 5-tal locaties in de Tweede Schil. .

2.2.3 Evaluatie

Aardbevingen

De inschatting van de maximaal mogelijke magnitude, frequentie en haarddiepte van aardbevingen wordt momenteel statistisch bepaald ondersteund met een fysisch model. Voor beide methoden geldt dat de stand van de techniek voortschrijdt. Geadviseerd wordt om een nieuwe analyse te publiceren, omdat de meest recente dateert van 2003. Vervolgens wordt geadviseerd om een dergelijke analyse elke vijf jaar te herhalen, ondersteund door het verbeterd inzicht in het fysisch model. Hiermee kan een beter beeld van de haarddiepte en de

verwachte hypocentra locaties worden verkregen, wat de voorspelling van de ruimtelijke invloed van de aardbevingen kan verbeteren. Ook kan zo meer inzicht worden verkregen in de geomechanische oorzaak van de aardbevingen en de relatie met de winningsstrategie en –snelheid. Op basis van de statistische analyse wordt niet verwacht dat de voorspelling van de maximale magnitude wezenlijk zal veranderen. Omdat de studie naar de invloed van aardbevingstrillingen op waterkeringen uitgegaan is van een maximale magnitude van 3,8 wordt aanbevolen de studie te actualiseren naar de meest recente verwachte magnitude (3,9) en versnellingen. Aanbevolen wordt om bij onderzoek aan panden met zettingsschade na te gaan of de ondergrond gevoelig is voor zetting en/of vervloeïing door aardbevingstrillingen.

Bodemdaling

De prognose van de bodemdaling door de gaswinning wordt iedere 5 jaar herzien. Het is de plicht van de operator, in dit geval de NAM om hiervoor de metingen te laten uitvoeren en de prognose uit te voeren. In het TCBB rapport “Van Meting naar Daling” [23] zijn aanbevelingen voor een optimale methodiek neergelegd. Er wordt tevens geconstateerd dat de NAM-aanpak hiermee in grote mate in overeenstemming is. Door het integreren van ondiepe oorzaken in de toetsing en voorspelling kunnen de voorspellingen nauwkeuriger worden. De grootte van de huidige en toekomstige maximale bodemdaling zal niet wezenlijk veranderen.

De in de voorspelling gehanteerde onzekerheidsmarges van 15 tot 30 % liggen ruim boven het waargenomen verschil tussen prognose en meting van 10%. Het handhaven van deze onzekerheidsmarges wordt onderschreven.

Uit de beschikbare rapportages met betrekking tot bodemdalingsprognoses en geassocieerde schade blijkt dat zorgvuldig met de onzekerheden in deze problematiek wordt omgegaan en hierop veilige marges worden toegepast. Aanpassingen aan het peilbeheer ten gevolge van de voorspelde bodemdaling worden hierdoor goed onderbouwd.

In het beleid van Rijkswaterstaat met betrekking tot de veiligheid van de zeeweringen worden alle aspecten van relatieve zeespiegelstijging betrokken. De bodemdaling door aardgaswinning wordt integraal verdisconteerd in de veiligheidsanalyse.

Rapportages, beschrijving van de meetmethodiek en voorspelling van bodemdaling als gevolg van aardgaswinning als ook de meetregisters van de hoogtemetingen kunnen geraadpleegd worden op het webportaal voor informatie over opsporing en winning van olie en gas in Nederland en het Nederlandse deel van het Continentaal plat: <http://www.nlog.nl/nl/home/NLOGPortal.html>.

3 Gebouwschade

3.1 Ontstaan van gebouwschade

Er is sprake van schade aan een gebouw, indien aan één of meer van onderstaande criteria wordt voldaan:

- 1) blijvende en onomkeerbare verandering van positie van onderdelen van een gebouw ten opzichte van elkaar (hierbij kan worden gedacht aan een verschil in zakking van verschillende onderdelen van een gebouw) of van het gebouw als geheel (bijvoorbeeld scheefstand);
- 2) blijvende en onomkeerbare verandering van de vorm van onderdelen van een gebouw (dit kan bijvoorbeeld leiden tot onthechting of scheuren in of tussen onderdelen van de bouwconstructie);
- 3) blijvend verlies van een functie van een onderdeel van een gebouw door wijziging van de eigenschappen van het onderdeel (hierbij kan worden gedacht aan verminderde weerstand tegen wind of water van buiten, verminderde warmte-isolatie, door corrosie verminderde constructieve veiligheid etc.).

Zowel bij het ontwerp, tijdens de uitvoering als in de gebruiksfase kunnen situaties ontstaan die resulteren in schade. In de ontwerpfase zal een constructeur van een gebouw dusdanig te werk gaan dat verwacht mag worden dat het ontworpen gebouw duurzaam schadevrij kan functioneren. Evenzo beoogt een bouwer het gebouw te bouwen zoals voorgeschreven. De uitgangspunten die de constructeur hanteert bij het berekenen van de benodigde sterkte komen echter niet altijd overeen met hetgeen door de bouwer wordt gerealiseerd. Enkele veel voorkomende afwijkingen zijn:

- Niet alle onderdelen van het gebouw zijn op de beoogde wijze uitgevoerd, waardoor bepaalde onderdelen een afwijkende sterkte hebben.
- De belastingen tijdens de bouwphase zijn hoger dan door de constructeur was voorzien.
- Zwelling en krimp van gebouwonderdelen door temperatuurs- en vochtinvloeden worden verhinderd en resulteren daardoor in onvoorziene spanningen in de constructie.

Voor veel bouwmaterialen geldt dat gedurende de gebruiksfase veroudering kan resulteren in aantasting van die materialen. Enkele voorbeelden zijn corrosie van metalen, vorstschade aan voegwerk in gevels en houtrot. Als gevolg van die aantasting neemt ofwel de sterkte van het materiaal af ofwel de netto doorsnede ervan.

Bij het ontwerp van gebouwen wordt rekening gehouden met belasting door het eigen gewicht van gebouwen, belasting door wind, personen, meubilair etc., maar niet met belasting door trillingen van buiten een gebouw. Hoewel er ten aanzien van de weerstand tegen dergelijke trillingen geen concrete eisen zijn gesteld, blijkt er in de praktijk wel een zeker incasseringsvermogen te zijn, omdat bouwconstructies ook andere soorten belastingen moet kunnen weerstaan. Een belangrijke vraag is dan ook in hoeverre gebouwen op basis van de bouwregelgeving verwacht mogen worden bestand te zijn tegen trillingen die een gebouw via de fundering belasten. Het is in dit verband van belang dat er buiten het publiekrechtelijke stelsel wel richtlijnen en normen beschikbaar zijn, die dit incasseringsvermogen kwantificeren en die aangeven of schade door trillingen kan optreden bij een zekere trillingsterkte.

De hiervoor genoemde invloeden leiden ertoe dat er altijd spanningen optreden in gebouwen, ook in onderdelen van gebouwen die niet zijn ontworpen voor het opnemen van belastingen.

Indien deze spanningen hoger worden dan de sterkte van die onderdelen, ontstaat schade, meestal in de vorm van scheurvorming.

Het is moeilijk om vooraf, op basis van berekeningen, exact te bepalen bij welke spanningstoename schade zal ontstaan. Dit omdat zowel de al aanwezige materiaalspanning als de materiaalsterkte per gebouw significant kan verschillen en niet nauwkeurig bekend zijn [15]. Ook is het lastig om deze relatie uit de praktijk af te leiden, niet alleen gezien voorgaande beperkingen (onbekendheid bijdrage initiële spanning) maar ook omdat in een onderdeel aanwezige materiaalspanningen vrijwel niet meetbaar zijn.

Deze omstandigheid brengt ook met zich mee dat als zich eenmaal schade voordoet, het niet een eenvoudig uit te maken zaak is waardoor deze schade is ontstaan. Als voorbeeld kan hier dienen een gevelbetimmering van een gebouw, waarvan de weerstand van de bevestigingsmiddelen licht is verzwakt door corrosie (inwerking van temperatuur en vocht in combinatie met een chemische reactie). Als vervolgens bij een zware storm de betimmering losraakt, wat is dan de oorzaak van de schade?

Uit deze beschrijving blijkt dat het aantal oorzaken van schade groot is en daarnaast dat het niet eenvoudig is, of fysiek zelfs onmogelijk is, om de oorzaak van schade eenduidig te achterhalen. Meer informatie betreffende regels en richtlijnen staat in Bijlage B.

3.2 Beschrijving van gebouwschade

Voor een karakterisering van schade aan gebouwen wordt in de praktijk niet alleen gebruik gemaakt van een beschrijving van de schadevorm, maar ook van een beschrijving van de gevolgen van de schade. Een veel toegepaste vorm van een beschrijving van de gevolgen van schade is een onderverdeling van de schade in constructieve schade en niet-constructieve schade.

Constructieve schade is schade welke gepaard gaat met een vermindering van de integriteit van een gebouw(deel) met betrekking tot zijn dragende functie, waardoor de constructieve veiligheid in het geding kan komen en daardoor de veiligheid van personen. Constructieve schade heeft dus een directe relatie met de constructieve veiligheid van een bouwwerk, zoals genoemd in het Bouwbesluit. Tot constructieve schade wordt onder meer gerekend verlies van sterkte door scheurvorming in dragend metselwerk, bezwijken door overschrijding van de sterkte van liggers of kolommen, instabiliteit of verlies van draagkracht van de fundering.

Niet-constructieve schade is schade welke gepaard gaat met een vermindering van de gebruikswaarde of verlies van functie, zonder dat daarbij de veiligheid van personen, die zich in of nabij het bouwwerk bevinden, in gevaar kan komen. Dit omvat onder meer schade aan bekledingen en afwerkingen van wanden, vloeren en plafonds, voor zover dit geen consequenties heeft voor de plaatsvastheid van deze bekledingen. Te denken valt in dit verband aan scheurvorming in pleisterwerk (niet doorgaand in het metselwerk), het loslaten van pleisterwerk, het losraken van voegafdichtingen.

Niet constructieve schade kan daarbij weer onderverdeeld worden in schade met consequenties voor de esthetica, de gebruikswaarde en de levensduur.

Schade heeft esthetische consequenties als schade duidelijk zichtbaar is en een verstoring geeft van het aanzicht van het betreffende onderdeel van het gebouw. Een voorbeeld hiervan is scheurvorming in een natuurstenen vloer in een woonkamer.

Schade heeft consequenties voor de gebruikswaarde wanneer de schade resulteert in een functieverlies van het betreffende onderdeel van het gebouw. Een voorbeeld hiervan is scheurvorming in een kelderwand, waardoor de kelder niet meer waterdicht is.

Schade heeft consequenties voor de levensduur wanneer de schade resulteert in versnelde aantasting van onderdelen van het gebouw. Een voorbeeld hiervan is scheurvorming in gevelbekleding, waardoor de achterliggende constructieonderdelen nat kunnen worden.

Voor een indicatie van de mate van schade zijn verschillende tabellen voorhanden:

- de ease of repair tabel;
- de EMS schaal.

De ease of repair tabel wordt internationaal gehanteerd [1] en wordt in Nederland vaak gebruikt bij zettingsschade. Deze tabel toont verschillende schadeklassen en een bijbehorend indicatief schadebeeld. De zogenaamde “ease of repair” tabel is weergegeven in onderstaande tabel. In de laatste kolom is aangegeven of de schadeklasse van invloed is op de esthetica, de gebruikswaarde, de levensduur dan wel de veiligheid.

Tabel 3.1 Ease of repair tabel met bijbehorend indicatief schadebeeld [1]

Schadeklasse	Omschrijving	Karakterisering schadebeeld	Beïnvloeding op:
0	Verwaarloosbaar	Haarscheurtjes kleiner dan circa 0,1 mm	Esthetica
1	Zeer licht	Kleine scheuren, meestal beperkt tot pleisterwerk, die eenvoudig kunnen worden weggewerkt. Enige scheurvorming in metselwerk. Scheurwijdten tot 1 mm.	Esthetica Gebruikswaarde
2	Licht	Geringe scheurvorming, kan eenvoudig hersteld worden. Scheuren kunnen aan de buitenzijde zichtbaar zijn en kunnen tot vochtdoorslag leiden. Deuren en ramen kunnen licht klemmen. Scheurwijdte tot 5 mm.	Esthetica Gebruikswaarde / levensduur
3	Matig	Scheuren zijn zodanig, dat metselwerk dient te worden hersteld. Deuren en ramen klemmen. Mogelijke schade aan nutsaansluitingen. Vochtdoorslag mogelijk. Scheurwijdten van 5 tot 15 mm.	Gebruikswaarde Gebruikswaarde / levensduur
4	Ernstig	Herstel vergt vervanging van muurdelen en andere constructieve elementen. Bruikbaarheid en toegankelijkheid ernstig aangetast. Voelbare scheefstand. Scheurwijdten van 15 tot 25 mm.	Veiligheid Gebruikswaarde / levensduur
5	Zeer ernstig	Volledige renovatie noodzakelijk. Instortingsgevaar. Scheurwijdten groter dan 25 mm.	Veiligheid

De Europese Macroseismische Schaal (EMS) wordt internationaal gebruikt voor de classificatie van de mate van schade door aardbevingen en definieert vijf gradaties van schade aan gebouwen welke is gekoppeld aan het type gebouw. Een samenvattend overzicht hiervan is weergegeven in tabel 2. Voor een uitgebreid overzicht wordt verwezen naar Bijlage A.

Tabel 3.2 EMS-schaal met bijbehorend indicatief schadebeeld

Gradatie	Omschrijving	Beïnvloeding op:
1	Verwaarloosbare tot lichte schade	Geen constructieve schade
2	Matige schade	Lichte constructieve schade, matige niet-constructieve schade
3	Aanzienlijke tot zware schade	Matige constructieve schade, zware niet-constructieve schade
4	Zeer zware schade	Zware constructieve schade, zeer zware niet-constructieve schade
5	Verwoesting	Zeer zware constructieve schade

Een beperking van de EMS schaal ten opzichte van de Ease of Repair tabel is het ontbreken van objectief vast te stellen feiten, zoals wijldes van scheuren. De EMS schaal geeft daardoor een subjectief oordeel van de ernst van de schade.

3.3 Gebouwschade door aardgaswinning

De aardgaswinning veroorzaakt in het gebied boven het Groningen-gasveld aardbevingen en in bodemdaling. Aardbevingen kunnen direct of indirect schade aan gebouwen veroorzaken, bodemdaling door aardgaswinning alleen indirect.

Aardbevingen veroorzaken trillingen in gebouwen. Trillingen kunnen schade veroorzaken doordat het gebouw of onderdelen daarvan zullen meebewegen met de trillingen, waardoor te hoge spanningen in de constructie kunnen ontstaan, wat schade kan veroorzaken. Trillingen kunnen indirect schade veroorzaken doordat de grond, in geval van losgepakte zanden, onder een gebouw kan worden verdicht. Door de hierdoor ontstane zettingen kunnen delen van een gebouw verzakken en "losscheuren". Het aspect trillingen wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 4.

Bodemdaling als gevolg van aardgaswinning treedt voornamelijk op als een gelijkmatige zetting van een relatief groot gebied. Deze gelijkmatige zettingen resulteren niet in gebouwschade.

Indirect kan deze bodemdaling toch resulteren in schade. Als gevolg van dergelijke bodemdaling kan het namelijk noodzakelijk worden om het waterpeil in bepaalde gebieden aan te passen ("peilbesluit"). Dergelijke aanpassingen kunnen zorgen voor een relatieve toe- of afname van de drooglegging, waardoor wel lokale verschilzettingen onder een gebouw kunnen optreden, met schade tot gevolg. Dit aspect wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 5.

Of gebouwschade (geheel) te wijten is aan de gevolgen van aardgaswinning is niet eenvoudig te achterhalen. Zoals in hoofdstuk 3.1 eerder is gesteld, is schade een gevolg van een overschrijding van de materiaalsterkte. Het is echter vrijwel niet mogelijk om na te gaan wat het spanningsniveau in een bepaalde constructie is en in hoeverre een aardbeving de spreekwoordelijke druppel is geweest of niet.

Ten behoeve van het beoordelen van schade ten gevolge van aardgaswinning wordt onderscheid gemaakt tussen het beoordelen van individuele gevallen en het in algemene zin beoordelen van de schade in een gebied. Voor individuele gevallen wordt aanbevolen de schade te beoordelen op basis van esthetica, de gebruikswaarde, de levensduur en de constructieve veiligheid van het gebouw. Het voordeel van deze benadering is dat hiermee tevens inzicht wordt verkregen in de noodzaak tot herstel. Voor het in algemene zin opnemen van bouwschade in een groter gebied is deze benadering echter zeer arbeidsintensief. In dat geval wordt aanbevolen gebruik te maken van de ease of repair tabel of de EMS schaal. Dit wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 4.

4 Effect van aardbevingen op gebouwen

4.1 Inleiding

Wanneer een gebouw belast wordt door trillingen ontstaan er spanningen in de bouwconstructie en ook in onderdelen van gebouwen die niet bedoeld zijn om belastingen te dragen. Zoals in hoofdstuk 2 is toegelicht kan dit resulteren in schade, onder andere in de vorm van scheuren of in de vorm van onthechting van bijvoorbeeld tegels.

Bij het ontwerpen van gebouwen dient, volgens de in Nederland geldende regelgeving (zie Bijlage B), rekening gehouden te worden met een aantal belastingvormen, zoals belasting door het eigen gewicht van gebouwen, belasting door wind, personen, meubilair etc., maar niet met belasting door trillingen van buiten een gebouw. Hoewel er ten aanzien van de weerstand tegen trillingen geen concrete eisen gesteld zijn, blijkt er in de praktijk veelal voldoende incasseringsvermogen te zijn om trillingen te kunnen opnemen. Dit volgt onder andere uit de algemene "robuustheidseis" dat een constructie zo gemaakt moet worden dat het bezwijken van een onderdeel ten gevolge van een bijzondere belasting geen voortgaande instorting tot gevolg heeft [35].

Op grond van de wettelijke regelingen is toetsing van bouwconstructies op het kunnen doorstaan van aardbevingsbelastingen niet vereist. NEN 6702 [35] specificiert, mede daarom, geen representatieve waarden van aardbevingsbelastingen op bouwconstructies. Indien bij toetsing van de bouwconstructie een aardbevingsbelasting wordt voorgeschreven wordt als leidraad aanbevolen de horizontale versnelling van de ondergrond voor gebieden waarin aardbevingen kunnen voorkomen te ontleen aan figuur 14 van NEN 6702. In deze figuur is Noord Nederland echter niet opgenomen als een aardbevingsgevoelig gebied.

Voor de bepaling van de aardbevingsbelastingen op constructies wordt verwezen naar de in ontwikkeling zijnde norm NEN-EN 1998-1 (Eurocode 8 [36]). Deze norm geeft echter op enkele punten geen uitsluitel voor de in Nederland specifieke omstandigheden, zoals de te hanteren piekgrondversnellingen, het type aardbeving en de grondcondities. Dit betekent dat op dit moment bij nieuwbouw (nog) niet rekening gehouden hoeft te worden met belastingen door aardbevingen.

Trillingen in gebouwen kunnen veroorzaakt worden door vele verschillende bronnen. De meest bekende bronnen van trillingen, met mogelijk schadelijke gevolgen voor gebouwen, zijn bouwwerkzaamheden en verkeer. Bij bouwwerkzaamheden zijn met name het heien van palen en het intrillen van damwanden bekende trillingsbronnen. Maar ook het verdichten van wegen (trilwalsen) en het lossen van materieel of materiaal kunnen trillingen in gebouwen veroorzaken. Bij verkeer is met name het rijden over oneffenheden in het wegdek (drempels, kuilen) of de rails (wissels) de oorzaak van trillingen. Andere meer incidentele trillingsbronnen zijn explosies, botsingen en aardbevingen.

Voor de trillingsbelasting op een gebouw zijn zowel de duur als de intensiteit van de trillingen van belang. De duur van de trillingen zegt iets over de mogelijkheid dat vermoeiing in een materiaal kan optreden. De duur van de trillingen is afhankelijk van de trillingsbron. Zo zullen de trillingen in een gebouw ten gevolge van een explosie veel korter duren dan de trillingen ten gevolge van het passeren van een trein. De volgende indeling van trillingsbronnen kan worden aangehouden [13]:

- Bronnen die incidenteel voorkomende kortdurende trillingen veroorzaken door een stootvormige excitatie. Het aantal malen dat het trillingsverschijnsel voorkomt is zo gering dat vermoeiing van constructiematerialen niet kan optreden. Voorbeelden zijn explosies, botsingen en aardbevingen.
- Bronnen die herhaalde kortdurende trillingen veroorzaken bij een stootvormige excitatie. Hieronder worden verstaan bronnen die zo vaak voorkomen dat vermoeiingseffecten in bouwmaterialen kunnen optreden. Voorbeelden zijn heiwerkzaamheden en weg- en railverkeer.
- Bronnen die continue trillingen veroorzaken. Hieronder worden verstaan alle bronnen die niet onder de voorgaande twee categorieën kunnen worden ingedeeld of bronnen waarbij resonanties en /of vermoeiingseffecten in de onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden. Voorbeelden zijn: machines met roterende onderdelen, vibratoren, verdichtingswerk door middel van trilwalsen, het inbrengen van fundatiepalen en damwanden met behulp van trilblokken.

De intensiteit van de trillingen wordt bepaald door de volgende eigenschappen van de trilling:

- de maximale uitwijking ten opzicht van de rusttoestand (amplitude), de maximale snelheid of de maximale versnelling;
- het aantal keren dat de trilling per seconde optreedt (de frequentie);
- de richting van de trillingen (horizontaal, verticaal, invalshoek ten opzichte van het gebouw, etc.).

In alle gevallen geldt dat de grootte van de trillingssnelheden/versnellingen/amplitudes die optreden in een gebouw afhankelijk is van de afstand van het gebouw tot de trillingsbron. In het algemeen geldt, hoe groter de afstand hoe groter de damping van de trilling. Uitzondering hierop is de mogelijkheid van het optreden van opslingering (versterking van de trilling) van bodemtrillingen, door eigenschappen van de ondiepe ondergrond. Meer hierover in paragraaf 4.2.3.

Opgemerkt wordt dat wanneer door een bepaald trillingsniveau schade is ontstaan en deze schade niet wordt gerepareerd, er bij een volgende trilling toch extra schade kan ontstaan. Dit kan komen doordat vergruisde delen in een scheur terecht komen, waardoor de scheur bij een volgende belasting verder uiteen gedrukt kan worden. Ook kan er sprake zijn van een verzwakking van de constructie, waardoor een volgende trilling resulteert in een grotere vervorming. Er kan dus sprake zijn van een cumulatief effect. Of dit ook daadwerkelijk plaatsvindt, is afhankelijk van de aard van de constructie van het gebouw, de aard van de ondergrond en de richting en de kracht van de opvolgende trillingen.

In de volgende paragrafen wordt eerst ingegaan op de voor schade belangrijke eigenschappen van trillingen door aardbevingen (paragraaf 4.2). Vervolgens wordt ingegaan op de bepaling en de beoordeling van het effect van trillingen op gebouwen (paragraaf 4.3).

4.2 Trillingen door aardbevingen

De in hoofdstuk 2 genoemde rapporten en onderzoeken geven aan dat de kans dat de maximaal mogelijke aardbeving ($M=3,9$) inderdaad optreedt, zeer klein is. De kans dat er schade aan gebouwen ontstaat in een bepaald gebied, bijvoorbeeld Loppersum, is echter kleiner. Er moet dan rekening gehouden worden met:

- 1) de kans dat de maximaal mogelijke beving optreedt;
- 2) EN de kans dat deze bij Loppersum in de buurt optreedt, waardoor de maximale pieksnelheden en piekversnellingen ook in die buurt optreden;

- 3) EN de lokale ondiepe geologie onder de gebouwen (de site response, meer hierover in paragraaf 4.2.3): zorgt de ondergrond voor demping of juist voor amplificatie (versterking) van de trillingen?
- 4) EN de staat van de gebouwen.

Het bovenstaande geldt ook voor de kans op schade door lichtere aardbevingen. Hoe deze factoren in de voorspelling van schade worden verdisconteerd wordt in de volgende paragrafen uitgewerkt.

De bij een aardbeving vrijkomende energie leidt tot trillingen in de aardkorst. Door een complex proces van breking, reflectie en transmissie komen de trillingen uiteindelijk aan het aardoppervlak, waar zij een kortstondige trilling veroorzaken [14]. Een kenmerk van de trillingen is dat hun energie (en dus de bewegingsamplitude) afneemt naarmate de afstand tot het hypocentrum toeneemt. Ook wijzigen de trillingsfrequenties die in de beweging optreden. Naarmate de afstand tot het hypocentrum groter is, worden de bewegingen gedomineerd door lagere frequenties, door de demping van hogere frequenties. Deze demping van de trillingssterkte en verandering van frequentie worden samengevat in de term *attenuation*. Eenmaal dicht bij het oppervlak beïnvloedt de reactie van de ondiepe lagen de frequentie-inhoud en de amplitude van het aardbevingssignaal. Deze invloed/reactie van de ondiepe ondergrond op het signaal wordt de *site response* genoemd. De mate waarin de reactie van de ondiepe ondergrond het signaal beïnvloedt kan per grondsoort sterk verschillen en is dus heel locatiespecifiek.

4.2.1 Duur van de trillingen

De door gaswinning geïnduceerde aardbevingen in Noord Nederland zijn, in vergelijking met natuurlijke aardbevingen, van korte duur (twee cycli) en hebben dominante frequenties van circa 10 Hz [14]. Bovendien treden de grootste versnellingen kortdurend op. Bij het vaststellen van de belasting door deze trillingen hoeft daarom geen rekening gehouden te worden met het aspect vermoeiing. Dit verklaart onder andere waarom de relatief krachtige bodemtrillingen in Noord Nederland relatief weinig schade veroorzaken ten opzichte van natuurlijke aardbevingen in bijvoorbeeld Griekenland en Turkije. De door gaswinning geïnduceerde aardbevingen in Noord Nederland zijn incidentele kortdurende trillingen.

4.2.2 Intensiteit van de trilling

Voor het voorspellen van de intensiteit van trillingen door aardbevingen in Noord Nederland wordt gebruik gemaakt van een Probabilistische Seismische Hazard Analyse (PSHA). Onzekerheden in de plaats waar bevingen optreden, diepte van de beving en onzekerheden in de *attenuation* en *site response* kunnen worden meegenomen in een dergelijke PSHA. *Seismische hazard* is de kans dat een bepaald niveau van groundbeweging ten gevolge van aardbevingen wordt overschreden binnen een specifieke tijd en een specifiek gebied [6]. Deze groundbeweging wordt uitgedrukt in piekgrondsnelheid of in piekgrondversnelling. De mate waarin deze piekgrondsnelheden en piekgrondversnellingen schade kunnen toebrengen aan een gebouw hangen af van de aard van de constructie en de staat waarin de constructie verkeert (zie paragraaf 4.3).

Een PSHA is de meest gebruikte aanpak voor de bepaling van de belasting waaraan gebouwen worden blootgesteld ten gevolge van aardbevingen. Waar deterministische hazard analyses veelal uitgaan van het effect van een bepaalde aardbeving op een onderzoeksgebied, baseert de PSHA zich op alle mogelijke aardbevingen die van invloed kunnen zijn op het onderzoeksgebied [22]. Het tekort aan aardbevingsdata heeft voornamelijk een negatieve invloed op de betrouwbaarheid van de analyse. Echter, voor een kwantitatieve analyse is de PSHA een van de beste mogelijke aanpakken die op dit moment voor handen

zijn. Voordeel van een PSHA is dat er geen uitspraak gedaan hoeft te worden over de plaats en de exacte diepte waar de aardbevingen optreden en dat ook de onzekerheden in de *attenuation* relatie, de damping in relatie tot de afstand tot de bron, en de *site response* kunnen worden meegenomen. Op dit moment geeft de Probabilistische Seismische Hazard Analyse van het KNMI [6][7], deels in samenwerking met TNO [19][20], de beste representatie van de seismische hazard van lichte ondiepe aardbevingen in Nederland. Er wordt blijvend onderzoek gedaan naar verbetering van (onderdelen van) de analyse. Meer hierover in paragraaf 4.2.5

De PSHA van het KNMI geeft als resultaat de kans dat een pieksnelheid (of piekversnelling) op een bepaalde locatie en binnen een bepaalde tijd wordt overschreden. In de PSHA wordt er rekening mee gehouden dat de pieksnelheden in de bodem niet resulteren in gelijke pieksnelheden in de constructie, maar in lagere pieksnelheden. Deze interactie tussen grond en gebouw, die mede afhankelijk is van de funderingswijze van een gebouw, wordt verrekend in de vorm van een dempingsfactor. Over het algemeen wordt een dempingsfactor van 5% aangehouden. Voor laagbouw in de Nederlandse situatie is een hogere damping in de orde van 50% realistischer [14]. Verder wordt alleen gekeken naar de horizontale component van de beweging, omdat deze component de grootste schade veroorzaakt en het best gecorreleerd kan worden met intensiteit en schade [6]. De resultaten van de PSHA voor Noord Nederland worden besproken in paragraaf 4.2.4.

4.2.3 Het effect van de lokale ondergrond

De lokale *site response* kan leiden tot een versterking (opslingering; amplificatie) van het signaal. Met name in gebieden waar dikkere afzettingen met slappe klei/veen en afzettingen met grote stijfheidscontrasten (veen op zand) in de ondiepe ondergrond voorkomen kan een opslingering van het signaal optreden. In deze gebieden is de kans op schade aan gebouwen dan ook groter. Het effect van de *site response* op de grondbeweging is in kaart gebracht door TNO [19][20].

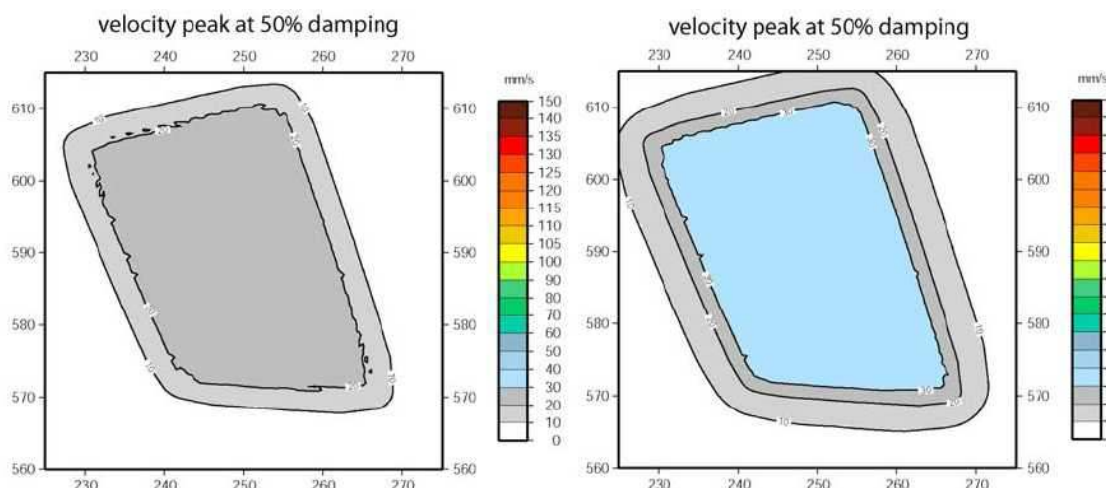
Uit de literatuurstudie naar de site response en de modellering daarvan op diverse locaties in het onderzoeksgebied blijkt dat deze op verschillende locaties sterk kan verschillen. De amplificatiefactoren geven een gemiddelde respons voor 'vergelijkbare' locaties. Door de respons van een groep locaties te middelen wordt voorbijgegaan aan het feit dat elke locatie een specifieke respons op de grondbeweging vertoont. Deze benadering kan zowel een onderschatting als een overschatting geven van de respons die in werkelijkheid optreedt [20]. De amplificatiefactoren dienen beschouwd te worden als een gemiddelde respons voor die specifieke ondergrondklasse. Op deze wijze is het, ondanks de sterke variatie in afzettingen in de ondiepe ondergrond, toch mogelijk de respons in het onderzoeksgebied in kaart te brengen. Het kaartbeeld van de site response geeft daarmee een regionaal overzicht van de ligging van gebieden die in meer of mindere mate gevoelig zijn voor opslingering van het aardbevingssignaal in de ondiepe ondergrond [20]. Het toegepaste dempingsmodel voor afstanden van 4 tot 15 kilometer afstand van een beving is echter voor verbeteringen vatbaar en kan beter onderbouwd worden wanneer meer metingen van bodemtrillingen beschikbaar komen [20].

De gebieden zijn op ondergrondklasse in kaart gebracht en de pieksnelheden uit de PSHA van het KNMI zijn gecorrigeerd voor het effect van de ondiepe ondergrond (*site response*) op het signaal. De resultaten worden besproken in paragraaf 4.2.4.

De *site response* is in Groningen nog niet gemeten. Validatie van de schattingen zijn dus nog niet beschikbaar. Het wordt aanbevolen om een validatiemeting in te richten voor dit doel.

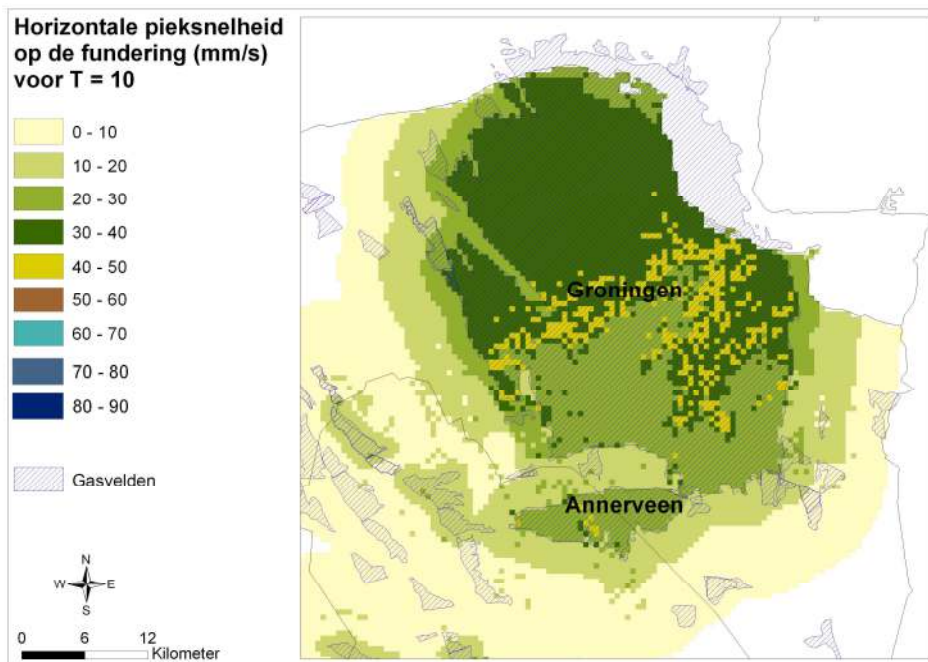
4.2.4 Resultaten hazard analyse

De resultaten van de PSHA voor Noord Nederland, zoals uitgevoerd door het KNMI, zijn vastgelegd in hazard zoneringskaarten. De zoneringskaarten geven gebieden aan waar, uitgaande van een 10% overschrijdingskans op jaar- of decade-basis ($T=10$ jaar, respectievelijk $T=100$ jaar), hogere of minder hoge pieksnelheden bereikt kunnen worden en geven daarmee inzicht in de locaties waar meer of minder schade zou kunnen optreden. De resultaten zijn weergegeven voor een schematische voorstelling van het Groningen-veld. In Figuur 4.1(links) is te zien dat er een kans is van 1x per 10 jaar ($T=10$ jaar) dat er een aardbeving plaatsvindt waarbij de horizontale pieksnelheden direct boven het Groningen gasveld tot 30 mm/s zullen bedragen, bij een dempingsfactor van 50%. Voor $T=100$ jaar (kans van 1x per 100 jaar, rechter plaatje in Figuur 4.1) is dit tot 40 mm/s. Bij de schatting is uitgegaan van een $M_{\max}$ van 3,5.

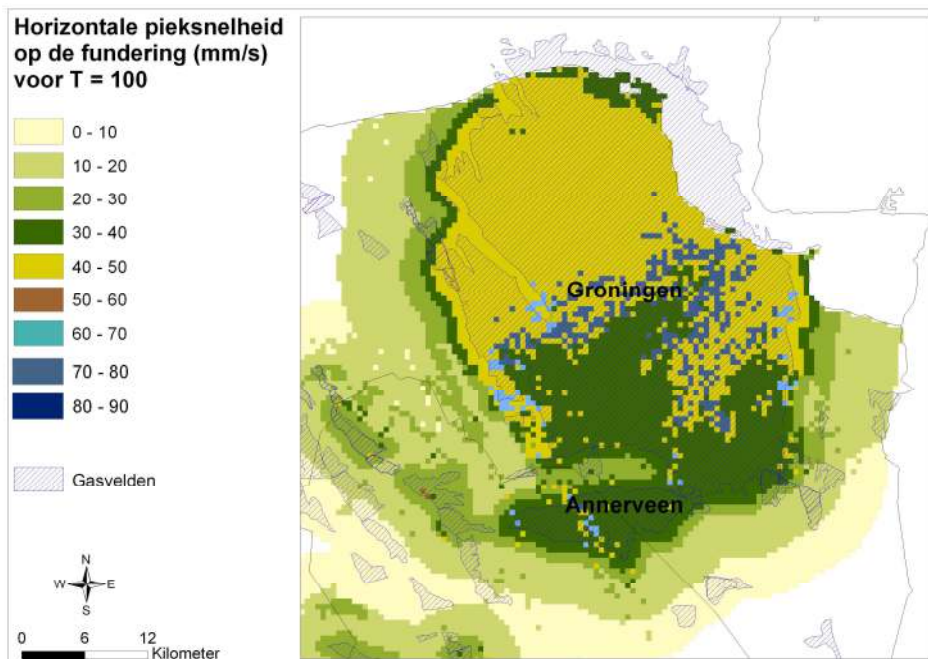


Figuur 4.1 Schematische voorstelling van de geschatte pieksnelheden boven en rondom het Groningen-veld. Links de horizontale piekversnelling voor $T=10$ jaar, rechts de horizontale piekversnelling voor $T=100$ jaar. Langs de assen staan de RD-coördinaten in kilometers (vergelijk Figuur 3.1)

TNO heeft op basis van onderzoek naar de lokale *site response* [19] de algemene hazard zoneringskaarten van de PSHA van het KNMI gecorrigeerd voor de *site response* [20]. De resultaten worden weergegeven in Figuur 4.2 ($T=10$ jaar) en 4.3 ($T=100$ jaar). De kaarten geven de hoogste snelheden (meer dan 40 mm/s voor $T=10$ jaar en meer dan 60 mm/s voor $T=100$ jaar) boven de gasvelden Groningen en Annerveen, op de locaties waar 'special study soils' of slappe grond aan het maaiveld wordt aangetroffen. Het noordelijk deel van het gebied boven het gasveld Groningen wordt gekenmerkt door een iets hogere seismische hazard (>30 mm/s voor $T=10$ jaar) dan het zuidelijke deel (>20 mm/s voor $T=10$ jaar). Dit kan verklaard worden uit het feit dat in het noordelijke deel slappe holocene afzettingen aan het maaiveld liggen, terwijl in het zuidelijke deel het vaste pleistocene oppervlak dicht onder het maaiveld wordt aangetroffen [20]. De gevolgen van deze horizontale pieksnelheden in termen van gebouwschade worden verder besproken in paragraaf 4.3.



Figuur 4.2 Geschatte horizontale pieksnelheden op de fundering boven het Groningen-veld, na correctie van de site response, voor de overschrijdingskans van 1 x per 10 jaar



Figuur 4.3 Geschatte horizontale pieksnelheden op de fundering boven het Groningen-veld, na correctie voor de site response, voor de overschrijdingskans van 1 x per 100 jaar

4.2.5 Voortgaand onderzoek en aanbevelingen

De rapportage van het KNMI over de PSHA van lichte ondiepe geïnduceerde aardbevingen in Nederland [6][7] geeft op dit moment de beste representatie van de seismische hazard voor dit type aardbevingen in Nederland. Het is nog een eerste-orde schatting van de hazard, met

een relatief grote onzekerheid. Daarom wordt er voortdurend onderzoek gedaan naar verbetering van (onderdelen van) de analyse en het verkleinen van onzekerheden. Een belangrijk onderdeel hierbij is het continu monitoren van aardbevingen en grondbewegingen. Het KNMI zet meetinstrumenten in voor de monitoring van deze aardbevingen en grondbewegingen. De metingen van grondsnelheden en versnellingen geven inzicht in de relatie tussen grondbewegingen en trillingsintensiteiten. De data worden onder andere ingezet om de *attenuation*-relatie te toetsen en aan te scherpen en daarmee waar mogelijk onzekerheden in de hazardanalyse te verkleinen. Onzekerheden die inherent zijn aan de aardbevingen zelf, zoals het effect van het uitstralingspatroon van de trillingen, zullen blijven bestaan. Momenteel wordt door het KNMI gewerkt aan een update van de PSHA. Deze zal bestaan uit een nieuwe schatting van de *attenuation*-relatie, een update van parameters en mogelijke toepassing van alternatieve methodes om de hazard te bepalen.

Het toepassen van een fysisch/geomechanisch aardbevingsmodel voor het Groningengasveld zou daarbij een verbeterde ruimtelijke verdeling van de *hazard*-contouren en het bepalen van de relatie met de productiegeschiedenis mogelijk maken. Validatiemetingen van de *site response* en snelheids- of versnellingsmetingen in gebouwen zouden hier een belangrijke bijdrage aan kunnen leveren. Dit wordt dan ook aanbevolen.

Aanbevolen wordt om de norm NEN-EN 1998-1 (Eurocode 8) aan te vullen met de voor Nederland specifieke omstandigheden van de geïnduceerde aardbevingen.

4.3 Schade door trillingen

Schade ten gevolge van trillingen heeft geen vastomlijnde kenmerken en onderscheidt zich uiterlijk niet specifiek van schade door andere oorzaken die spanningen in constructieonderdelen veroorzaken. Op welke plaats schade door trillingen zich openbaart, hangt af van de specifieke constructie [15].

Voor het beoordelen van de invloed van trillingen op een gebouwonderdeel, zouden in principe de spanningen die als gevolg van de trillingen in het betreffende gebouwonderdeel ontstaan bekend moeten zijn. Die spanningen zijn echter zeer moeilijk te meten [11]. Aangetoond is dat er een relatie bestaat tussen de optredende trillingsbewegingen en de spanningen in een materiaal [15]. Trillingsbewegingen zijn wel te meten. De invloed van trillingen op gebouwen wordt in de praktijk daarom aan de hand van de trillingsbewegingen bepaald.

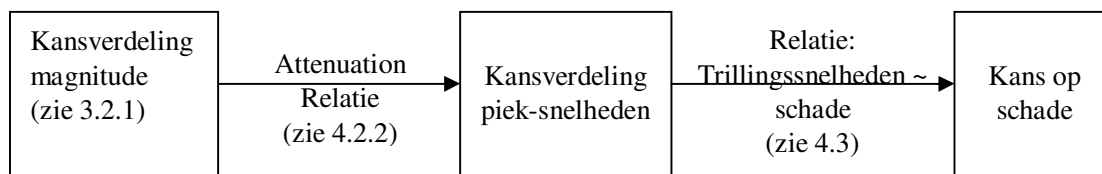
Trillingsbewegingen zijn uit te drukken in verplaatsingen, snelheden en versnellingen. Op grond van een vergelijking van praktijkervaringen en buitenlandse richtlijnen [25] zijn grenswaarden voor trillingssnelheden afgeleid. De methode voor het bepalen van deze grenswaarden voor trillingen in verschillende situaties is vastgelegd in SBR richtlijn A [13]. Deze SBR richtlijn is opgesteld om de toelaatbaarheid van trillingen te beoordelen ter voorkoming van mogelijke schade aan een bouwwerk. In de praktijk wordt deze richtlijn echter ook veel toegepast om een causaal verband tussen schade en trillingen achteraf te beoordelen.

In de SBR richtlijn is onderscheid gemaakt in drie categorieën gebouwen, omdat de grenswaarden mede afhankelijk zijn van de gevoeligheid van gebouwen voor trillingen. In oplopende volgorde van gevoeligheid zijn dat de volgende categorieën:

1. In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout;
2. In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit metselwerk;
3. In slechte staat verkerende gebouwen uit metselwerk of onderdelen daarvan.

De grenswaarden voor deze drie categorieën gebouwen zijn zo opgesteld dat als een trilling onder die grenswaarde blijft, dat dan met grote waarschijnlijkheid geen schade zal optreden. Een onderschrijding betekent echter niet dat het niet mogelijk is dat er schade is opgetreden door de trillingen. Met name de initiële spanningen die al in een constructie aanwezig zijn (zie hoofdstuk 2) kunnen ervoor zorgen dat ook bij een trilling onder de grenswaarde schade kan ontstaan.

In [17] is de relatie tussen kans op schade en trillingssnelheden voor metselwerk in goede staat, in slechte staat en monumenten bepaald (zie Figuur 4.4). Deze relatie is in [20] gebruikt om de uitkomsten van een PSHA te vertalen naar verwachte schade voor een gebied.

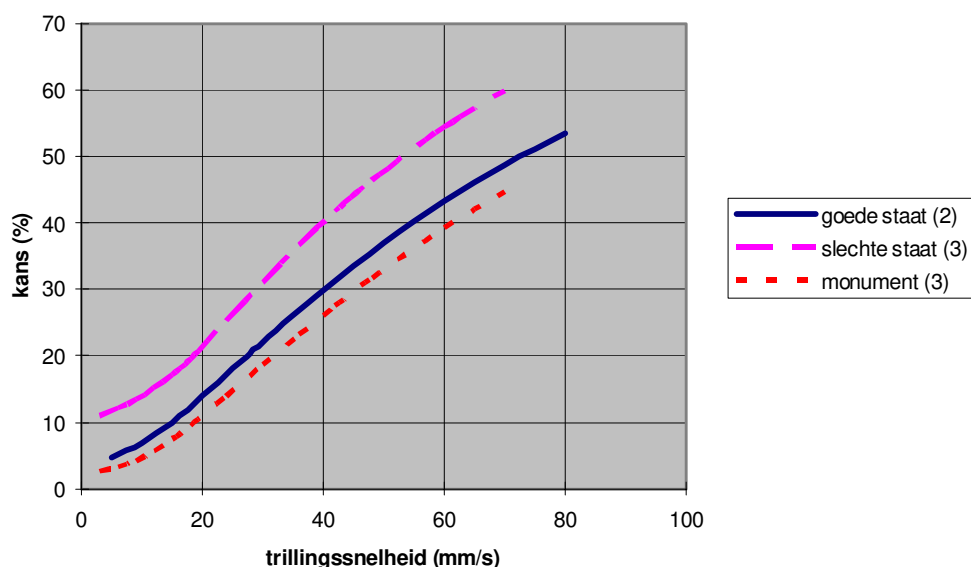


Uit een vergelijking [20] van de voorspelling van het verwachte aantal woningen met schade met het aantal schademeldingen blijkt dat de voorspelling, met name op de grotere afstanden, veel hoger ligt dan het werkelijke aantal schademeldingen. Als reden hiervoor wordt gewezen op enkele onzekerheden in de verschillende stappen van de modellering, nl. onzekerheden in de:

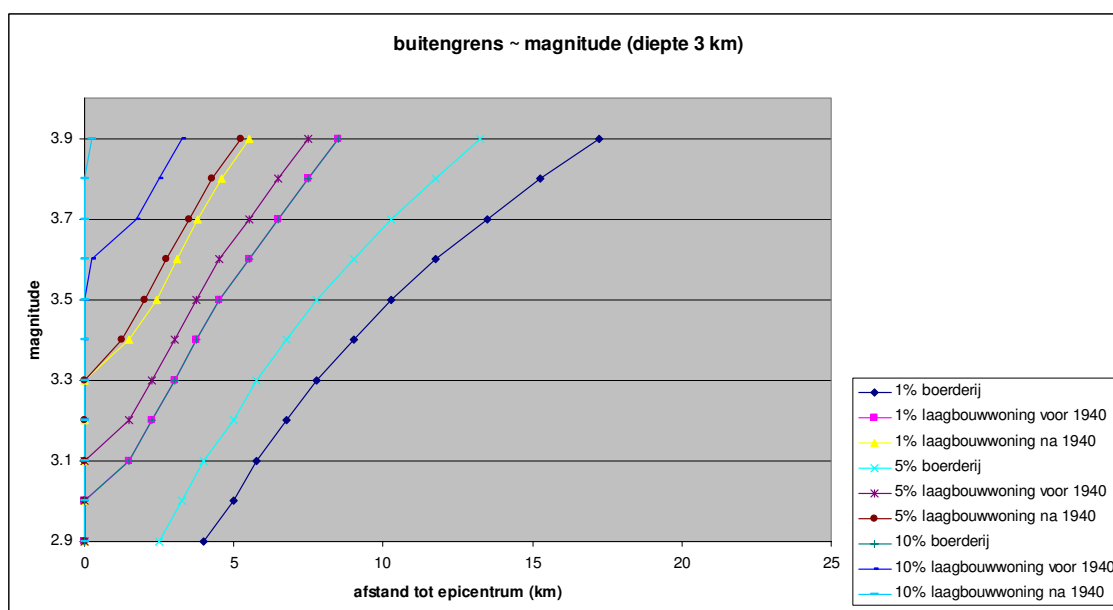
- attenuation functie;
- site response (als uitgangspunt is gehanteerd dat de site response een minder belangrijke rol speelt, aangezien de ondergrond van Roswinkel, de toetslocatie, hoofdzakelijk uit pleistocene zanden bestaat);
- response van de verschillende typen gebouwen op de grondbeweging;
- relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheid op de fundering;
- locatie en de aantallen woningen op een bepaalde afstand van het epicentrum en onzekerheden in;
- het werkelijk aantal woningen met schade; dit kan afwijken van het totaal aantal schademeldingen.

In TNO-rapport TNO-034-DTM-2009-04435 [[43] is een kalibratie uitgevoerd aan waarnemingen van een beperkt aantal bevingen bij producerende gasvelden in Nederland met magnitudes M tussen 3 en 3,5. Hierin waren versnellingsmetingen aan de oppervlakte en in boorgaten betrokken en alle schademeldingen van de betreffende aardbevingen. De aard van de schade is in deze studie niet beschouwd. Uit de studie blijkt dat de schadecurven (kans op schade gerelateerd aan snelheid) grote gelijkenis vertonen met de grenswaarden van SBR-richtlijn-A. Er is ook een indeling te maken in gevoeligheidsklassen. Het woningtype “boerderij” is het gevoeligst voor schade, gevolgd door laagbouw van voor 1940 en laagbouw van na 1940. Hoogbouw blijkt een zeer geringe kans op schade te hebben. Op basis van de analyses is bepaald dat de buitengrens voor schade voor een aardbeving met een magnitude

van $M=3,5$, hier gelijk gesteld aan de 1% overschrijdingskans, voor het meest gevoelige gebouwtype (boerderij) ligt op circa 10,5 km (Figuur 4.5). Een extrapolatie naar hogere of lagere magnitudes is wel gegeven, maar wordt door de opstellers minder betrouwbaar geacht. Door het beperkte aantal metingen zijn de voorspellingen conservatief.



Figuur 4.4 Kans op schade als functie van de piekwaarde voor de trillingsnelheid, op de fundering gemeten, voor categorie 2 en categorie 3: onderscheid makend in monumenten en in slechte staat verkerende gebouwen. Van monumentale gebouwen wordt aangenomen dat de staat van het metselwerk goed is. De treksterkte van metselwerk uitgevoerd voor het jaar 1900 is iets groter is dan de treksterkte van nu uitgevoerd metselwerk. Aangenomen wordt dat 'iets' sterker, 20 % sterker betekent. Dit zal betekenen dat de kans op schade aan monumentale gebouwen in goede staat iets kleiner zal zijn dan bij nieuwe gebouwen. Ontleend aan [17].

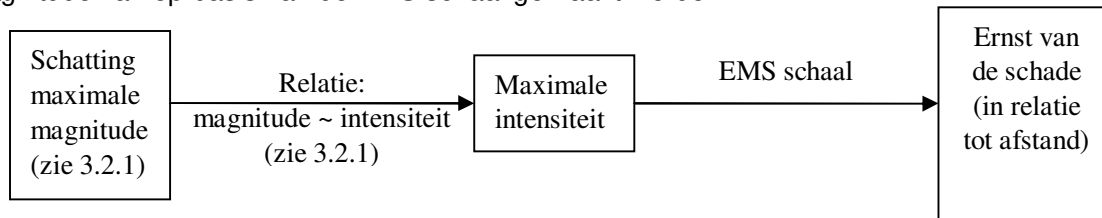


Figuur 4.5 Buitengrens voor verschillende overschrijdingskansen bij een gegeven magnitude, voor een haardiepte van 3km.

De conclusies en aanbevelingen uit [20] en [43] gelden nog steeds en worden onderschreven.

- De ijking kan verbeteren door meer metingen van optredende bodemtrillingen in de ondiepe ondergrond en aan de overdracht van deze trillingen naar panden.
- Omdat de studies state-of-the-art kennis gebruiken over het seismisch risico van ondiepe geïnduceerde bevingen is het van belang toekomstige nieuwe relevante kennis zo spoedig mogelijk in de analyse te betrekken. Hierbij is een voortgezette continue seismische meting en geologische en geomechanische modellering van het mechanisme van de aardbevingen van belang.
- Omdat, al naar gelang het type en de staat van de constructie, er verschillen in schadebeelden bestaan is een monitoring van de versnellingen die in panden kunnen optreden en het type schade die hierdoor ontstaat, van belang, in combinatie met bouwkundige modellen.

Een alternatieve, meer algemene, voorspelling van de ernst van de schade bij een bepaalde magnitude kan op basis van de EMS schaal gemaakt worden.



Zoals in [4] aangegeven vallen de aardbevingen in Noord Nederland maximaal in intensiteitsklasse VI tot VII. Volgens de EMS schaal betekent dit (zie Bijlage A):

- 10 tot 60% van de gebouwen in metselwerk of natuursteen en 0 tot 20% van de gebouwen in gewapend beton lijden matige schade (lichte constructieve schade).
- 0 tot 20% van de gebouwen in metselwerk of natuursteen lijden aanzienlijke tot zware schade (matige constructieve schade). De schade treedt met name op in de hoger gelegen delen van gebouwen. Aanzienlijke tot zware schade wordt gedefinieerd als grote en diepe scheuren in de meeste muren, wegglijden van dakpannen, het breken van schoorstenen op de daklijn en breuk van enkele niet-constructieve onderdelen.

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. Dit is verklaarbaar, omdat de schaal is opgesteld voor alle bouwtypen in Europa voor natuurlijke aardbevingen, waardoor de afzonderlijke schadeklassen een breed scala aan schadekenmerken bevatten, ook van zwakkere constructies dan in Nederland gebruikelijk zijn. Ook kunnen specifieke kenmerken van een geïnduceerde aardbeving een rol spelen (zie 4.2.1).

Bovenstaande geeft geen kwantitatieve en objectieve voorspelling van de ernst van de schade. Dit nadeel is inherent wanneer voor een voorspelling de EMS schaal wordt gehanteerd, omdat deze schaal een subjectief oordeel over de ernst van de schade betreft (zie paragraaf 2.2) en de relatie tussen magnitude en intensiteit een grote onzekerheid bevat. Objectieve relaties tussen ernst of aard van de schade en trillingssterkte zijn echter niet voor handen [20].

Een conclusie in [20] luidde: de huidige modellen en schaderelaties geven nog geen inzicht in de aard van de schade die kan optreden. Op dit moment geldt deze conclusie nog steeds.

De te verwachten ernst (constructieve schade of niet) van de schade ten gevolge van aardbevingen zou theoretische gezien per individueel gebouw ook rekenkundig bepaald kunnen worden, via een constructieve berekening. Praktisch gezien stuit dit echter op een aantal problemen, zoals het ontbreken van inzicht in de initiële spanningen in een gebouw, waardoor dergelijke berekeningen in de praktijk niet haalbaar zijn.

4.3.1 Indirecte schade door zetting door trillingen

Door trillingsverdichting van losgepakte zandige lagen kan ter plaatse van ondiepe funderingen een ongelijkmatige zetting optreden. Dit zal sterk afhangen van de aanwezigheid, dikte en diepte van de losgepakte zandige lagen in relatie tot de fundering. Zetting van de ondergrond door verdichting is een fenomeen waarvan niet bekend is of dit is opgetreden en dus ook niet in welke mate. Bij paalfunderingen zal dit in het algemeen niet het geval zijn, omdat de funderingslaag bij het toepassen van de NEN-norm voor op druk belaste palen hiervoor niet gevoelig is. Voor de overige gebouwen is het al dan niet optreden van schade afhankelijk van de homogeniteit van de ondergrond en van de verdeling van de gronddruk onder het gebouw. Indien sprake is van een homogene ondergrond, met een homogene drukverdeling vanuit het gebouw op de ondergrond, wordt verwacht dat de zakking van het gebouw gelijkmatig is, waardoor er geen schade zal ontstaan. Bij een inhomogene ondergrond en/of drukverdeling kunnen ongelijkmatige zakkingen over het gebouw resulteren in scheefstand en/of scheurvorming. Hoewel geen onderzoek beschikbaar is waarin dit aspect geïnterpreteerd is, kan niet worden uitgesloten dat in een deel van de gemelde schadegevallen een deel van de verschilzetting toe te schrijven is aan dit fenomeen. Wanneer bij een pand met zettingsschade de oorzaak van de zetting wordt onderzocht moet de mogelijkheid van deze oorzaak mee worden genomen. Wel is het zo dat de potentie om nog extra verschilzetting te genereren door verdichting steeds kleiner wordt naarmate er meer aardbevingen zijn geweest. De relatie tussen (verschil-) zetting en gebouwschade wordt verder beschreven in hoofdstuk 5.

4.4 Evaluatie

Voor het voorspellen van de gevolgen van trillingen door aardbevingen in Noord Nederland wordt gebruik gemaakt van een Probabilistische Seismische Hazard Analyse (PSHA). Een dergelijke PSHA is vooralsnog de beste methode om deze gevolgen in kaart te brengen, ondanks de relatief grote bandbreedte in de resultaten. Aanbevolen wordt om de lopende onderzoeken naar verbetering van deze analyse door te zetten, teneinde de bandbreedte in de resultaten te verkleinen.

Voor aardbevingen met magnitudes tussen $M=3$ en $M=3,5$ geven de schadecurven in [43] een bruikbare vaststelling van de straal waarbinnen kans op schade per woningtype bestaat. Voor extrapolatie naar hogere magnitudes ontbreken momenteel de analyses. Ook de relatie met de aard van de schade is nog niet gelegd.

De aanbevelingen uit [20] en [43] worden in dit kader onderschreven. Dit betekent:

- een verdergaande ijking van de gebruikte seismische, geomechanische en bouwkundige modellen met de waargenomen en gedocumenteerde intensiteit van de aardbevingen en type schade;
- de verbetering van de ijking door meer metingen van optredende bodemtrillingen in de ondiepe ondergrond en van de overdracht van deze trillingen naar gebouwen.

Voor een meer algemene inschatting van de gevolgen van aardbevingen voor een bepaald gebied kan een voorspelling worden gemaakt op basis van de EMS schaal. Deze

voorspelling is echter globaal omdat de schade subjectief is geformuleerd. De ernst is dus niet kwantificeerbaar (voorspelling scheurwijdtes).

Aanbevolen wordt om in de EMS schaal ook objectief vast te stellen schadekenmerken (scheurwijdtes) op te nemen. Bovendien lijkt de relatie tussen magnitude en schade tot een overschatting van de ernst van de schade te leiden bij toepassing van de gehele schadeklasse behorend bij intensiteit VI-VII. Omdat de intensiteit van een aardbeving subjectief wordt vastgesteld (op basis van enquêtes) is het van belang dat er objectieve relaties worden opgesteld tussen ernst van schade en trillingssnelheden. Omdat er verschillen in schadebeelden bestaan al naar gelang het type en de staat van de constructie, is monitoring van de versnellingen die in panden kunnen optreden en de schade die hierdoor ontstaat, van belang.

Studies naar het vervloeien van grond als gevolg van aardbevingen in Groningen zijn beperkt tot het effect op de zeeweringen. Hoewel dit verschijnsel nog niet waargenomen is kan niet worden uitgesloten dat het bij zettingsschade een rol speelt. Geadviseerd wordt om bij onderzoek naar de oorzaken van zettingsschade bij een bepaald pand de mogelijkheid van voorkomen van lagen die gevoelig zijn voor vervloeiing of verdichting in het onderzoek mee te nemen.

5 Effect van bodemdaling op gebouwen

5.1 Inleiding

Wanneer zettingen in de grond optreden zakt het maaiveld (aardoppervlak). Afhankelijk van de wijze van funderen ontstaat een interactie tussen gebouw en ondergrond en zal het gebouw geheel of gedeeltelijk meezakken. Als deze zakking ongelijkmatig is over het gebouw zullen hierdoor spanningen in de materialen ontstaan. Wanneer deze spanningen de materiaalsterkte overschrijden ontstaat schade (scheuren).

Bij het ontwerpen van de fundatie van gebouwen wordt rekening gehouden met de grondslag onder het gebouw. Gebouwen worden op een draagkrachtige laag gefundeerd. Dit betreft meestal een dikke zandlaag welke in Nederland op verschillende dieptes voorkomt. Indien deze laag zeer ondiep aanwezig is kan volstaan worden met een ondiepe fundering, ook wel een fundering op staal genoemd. Ligt deze zandlaag op grotere diepte dan zal gebruik worden gemaakt van een fundering op palen, waarbij de paalpunt tot in de zandlaag steekt, of waarbij gebruik wordt gemaakt van de weerstand van de grond over de paallengte (kleef).

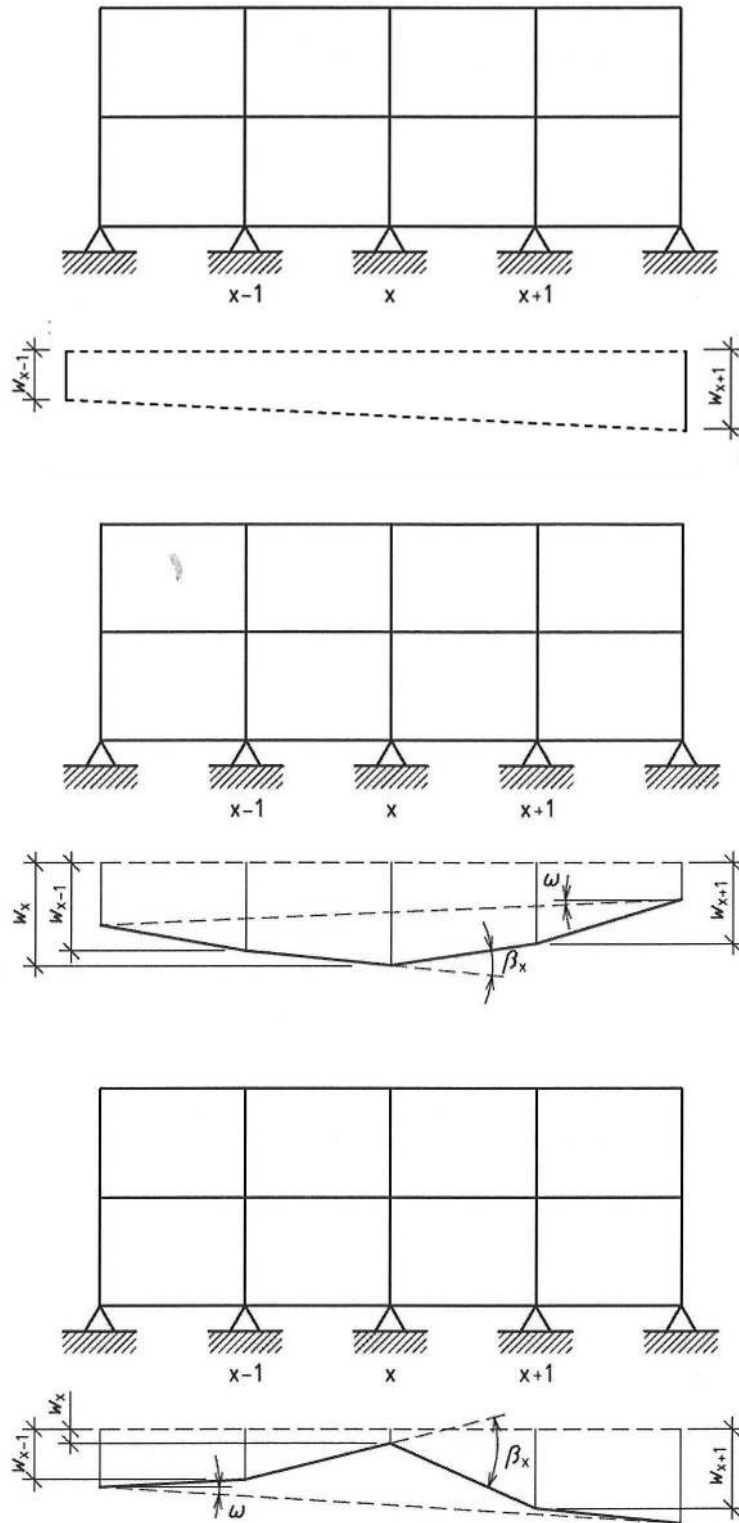
De wijze van funderen is in hoge mate bepalend voor de weerstand van gebouwen tegen zettingen in de ondergrond. Gebouwen die zijn gefundeerd op palen die tot in een draagkrachtige zandlaag steken zijn alleen gevoelig voor zettingen in de diepe ondergrond en niet voor zettingen in de ondiepe ondergrond, tenzij negatieve kleef de draagkracht van de paal overschrijdt. Gebouwen op palen die niet tot in de draagkrachtige zandlaag steken zijn zowel gevoelig voor zettingen in de diepe als voor zettingen in de ondiepe ondergrond. De uiteindelijke invloed op die palen is het resultaat van een interactieproces tussen paal en grond, die over de lengte van de paal kan variëren. Voor op staal gefundeerde gebouwen geldt dat deze alleen gevoelig zijn voor zettingen op funderingsniveau. Veel oudere panden zijn ondiep gefundeerd. Deze funderingen zijn relatief gevoeliger voor zetting van de onder de fundering liggende lagen. Bij een aantal gebouwen bestaat deze funderingslaag uit zettingsgevoelige, relatief slappe grond.

Zettingen in de ondergrond kunnen resulteren in verschillende vormen van zakkingen van een gebouw. Dit betreft het rechtstandig zakken van een gebouw, het scheef zakken van een gebouw en het ongelijkmatig zakken van een gebouw. Het rechtstandig zakken van een gebouw resulteert niet in schade aan het gebouw. Het scheef zakken van een gebouw resulteert niet in directe schade aan een gebouw, maar geeft wel een vermindering van de gebruikswaarde van het gebouw. Het ongelijkmatig zakken van een gebouw resulteert in gedeeltelijke scheefstand en in opgelegde vervormingen, die vervolgens kunnen resulteren in scheurvorming. Het ongelijkmatig zakken van een gebouw wordt in [26] gekarakteriseerd door de volgende grootheden (figuur 5.1):

- Relatieve rotatie (β_x in de onderste twee figuren: het verschil in hoogte w tussen twee naburige funderingselementen)
- Scheefstand (w in de onderste twee figuren: het hoogteverschil w over de gehele gevel)

Voor bestaande gebouwen kunnen deze grootheden bepaald worden aan de hand van lintvoegmetingen, bij voorkeur zo dicht mogelijk bij het maaiveld.

Het al dan niet optreden van schade in een gebouw als gevolg van ongelijkmatige zakkingen is uiteraard afhankelijk van de grootte van de ongelijkmatige zakkingen. Daarnaast is het ontstaan van schade ook afhankelijk van de opbouw van het gebouw, de toegepaste materialen en de snelheid waarmee de zakkingen optreden [27].



Figuur 5.1 Karakterisering scheefstand (bovenste figuur) en ongelijkmatige zakkingen (onderste twee figuren). Zie tekst voor uitleg [26]

5.2 Zetting door aardgaswinning

- 5.2.1 Bodemdaling door drukverlaging in het gesteente waaruit gas gewonnen wordt
De bodemdaling ten gevolge van de drukverlaging in het gesteente waaruit het gas wordt gewonnen is verspreid over een gebied dat groter is dan het gasveld zelf en ziet er uit als een grote gelijkmatige kom. De maximaal te verwachten komdaling van het Groningen-gasveld in het centrum in 2050 wordt nu op 0,42 m geschat [12]. De maximaal te verwachten helling die als gevolg hiervan kan optreden is 1 mm over een lengte van 25 m.
- 5.2.2 Bodemdaling door verlaging of verhoging van de grondwaterstand
Door bodemdaling als gevolg van aardgaswinning zijn waterhuishoudkundige maatregelen noodzakelijk. Deze waterhuishoudkundige maatregelen bestaan bijvoorbeeld uit peilverlagingen om de *drooglegging* gelijk te houden. Een peilverlaging kan zettingen veroorzaken doordat de korrelspanning toeneemt. De peilverlagingen worden stapsgewijs doorgevoerd. In 2008 is in dit kader een peilverlaging van 0,14 m in de zogenaamde Tweede Schil doorgevoerd. In het geval van peilverlaging treedt een zetting van de grond op en zakt het gebouw mee. Een studie naar de gevolgen van deze verlaging wordt momenteel uitgevoerd [pers comm. H. Groen, Waterschap Noorderzijlvest, 41]. Voordat de peilverlaging aan de bodemdaling is aangepast is er een hoger waterpeil aanwezig dan voorheen. Een (tijdelijk) hoger waterpeil kan ook zakkingen van de fundering veroorzaken, in geval de fundering een marginale veiligheid heeft, doordat de draagkracht van de grond wijzigt [16]. Door het nemen van de compenserende maatregel van de peilverlaging wordt dit fenomeen zo goed als uitgesloten.

Een ander nadelig gevolg van peilverlaging is het droogvallen van houten paalkoppen. Hierdoor kan het hout worden aangetast en kan de fundering bezwijken [32]. Of dit optreedt, hangt af van de lokale situatie en de grootte van de peilverlaging. In [32] is terecht aanbevolen om gegevens van de bouwwerken op houten palen te verzamelen, om op die wijze inzicht te verkrijgen in de omvang van de problematiek.

5.3 Andere oorzaken van zettingen

Behalve door winning van aardgas kan bodemdaling ook optreden door het winnen van zout, verdroging, door het oppompen van teveel grondwater of door het verlagen van polderpeilen om andere redenen van waterbeheer. Het mechanisme achter deze factoren is niet identiek en ook de schaal waarop dergelijke bodemdaling plaatsvindt is niet gelijk. Bodemdaling ten gevolge van aardgaswinning resulteert bijvoorbeeld in een regionale bodemdalingskom, terwijl bodemdaling door het oppompen van grondwater een meer lokale uitwerking heeft. Andere oorzaken van zettingen zijn bijvoorbeeld oxydatie van organisch materiaal, belasting van de grond door bebouwing in de omgeving. Het is meestal erg moeilijk om zonder nader onderzoek ter plaatse van een gebouw onderscheid te maken tussen de verschillende oorzaken van een geconstateerde bodemdaling, en dus ook moeilijk om eventuele schade toe te rekenen aan een bepaalde oorzaak [37].

5.4 Schade door zettingen

De komdaling als gevolg van de aardgaswinning treedt op over een relatief groot oppervlak, met een maximale helling van 1 mm over een lengte van 25 m. Op gebouwniveau resulteert dit in een vrijwel rechtstandige zakking, ongeacht de wijze van funderen van de gebouwen. Een dergelijke zakking resulteert niet in schade aan gebouwen.

Zoals aangegeven in paragraaf 5.2.3 resulteren zowel een peilverhoging als een peilverlaging in zettingen in de ondergrond. Voor gebouwen die zijn gefundeerd op palen die tot in de draagkrachtige zandlaag steken resulteert dit niet in zakkingen van het gebouw en dus ook niet in schade. Voor de overige gebouwen is het al dan niet optreden van schade afhankelijk van de homogeniteit van de ondergrond. Indien sprake is van een homogene, stevige ondergrond, is de zakking van het gebouw in het algemeen gelijkmatig, waardoor er geen schade zal ontstaan. Bij een inhomogene ondergrond of een ondergrond met een slappe, sterk samendrukbare laag kunnen ongelijkmatige zakkingen over het gebouw resulteren in scheefstand en/of scheurvorming.

Ten aanzien van de invloed van een peilverhoging op funderingen geven diverse studies aan dat een peilverhoging nagenoeg nooit de oorzaak zal zijn van schade [28], [29] en [30]. Die studies zijn relatief recent uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van de huidige stand van kennis.

Voor gebouwen op een inhomogene, en/of slappe ondergrond, die niet zijn gefundeerd op palen tot in de draagkrachtige zandlaag, is in 1987 een uitgebreide studie gedaan naar de kans op schade [24]. Ten behoeve van deze studie zijn berekeningen uitgevoerd met een eindige elementen methode. Op basis van deze studie is het volgende geconcludeerd:

- Voor rijtjes van zes woningen is de kans op schade, als gevolg van alleen het eigen gewicht, circa 30 %. Deze kans neemt met maximaal 10 % toe per 0,20 m grondwaterstandsaling.
- Bij boerderijen zijn met name de lange muren erg kwetsbaar voor ongelijkmatige zakkingen. De kans op scheurvorming, als gevolg van alleen het eigen gewicht, is daar al dusdanig groot, dat een vergroting van deze kans door een grondwaterstandsaling niet veel praktische betekenis heeft.

In een evaluatie van het onderzoek in 1987 [24], uitgevoerd in 2006, wordt aangegeven dat de methode van aanpak die in het rapport is gevolgd in grote lijnen juist is [33]. Voor diverse onderdelen zijn inmiddels echter wel duidelijke verbeteringen mogelijk. Het betreft dan zowel de verwerking van de hoeveelheid beschikbare gegevens als de rekenmethoden.

De resultaten van vervolgstudies in 2007 ([31] en [32]), waarbij gebruik is gemaakt van de huidige stand van kennis, geven aan dat bij een totale *relatieve peilverlaging* van 0,25 m, als gevolg van de maaiveldzettingen, in een klein aantal panden geringe tot matige schade kan ontstaan. Bij een totale *relatieve peilverlaging* van 0,15 m, zoals is doorgevoerd in 2008, is de kans op schade duidelijk minder. De resultaten zijn in lijn met de in [24] genoemde percentages. In 2008 is een studie uitgevoerd naar de gevoeligheid van het meest schadegevoelige type gebouwen in gebieden met een kleibodem [34]. Voor dit type gebouwen is geconcludeerd dat een *relatieve peilverlaging* van 0,05 m als toelaatbaar moet worden beschouwd.

De bovengenoemde percentages zijn gebaseerd op berekeningen. Vanwege onzekerheden in de gebruikte invoergegevens zullen de genoemde percentages altijd een bepaalde onzekerheid hebben. In [24] wordt aangegeven dat de grootste onzekerheden zitten in:

- De variatie van de grondgesteldheid over korte afstand.
- De treksterkte van het metselwerk.
- De wijze van funderen van de bebouwing.
- De laagste grondwaterstanden die in de loop van de tijd op een locatie zijn voorgekomen.

Het voorgaande betekent dat de genoemde percentages wel gebruikt kunnen worden voor een globale inschatting van de gevolgen van een grondwaterstandsaling, maar niet voor een inschatting van de gevolgen voor individuele gebouwen. Voor een inschatting van de

gevolgen voor individuele gebouwen kan wel een vergelijkbare rekenmethode toegepast worden, maar dan moeten voor de invoerparameters de lokale gegevens gebruikt worden. Voor de peilaanpassingen in de Tweede Schil wordt momenteel op 5 plaatsen nader onderzoek uitgevoerd.

5.5 Evaluatie

Gebouwschade door zetting is een lokaal verschijnsel. Het treedt pas op wanneer zettingsverschillen onder het gebouw tot een zodanige vervorming van het gebouw leiden dat de sterkte van het gebouw overschreden wordt. Aardgaswinning zal alleen indirect tot deze situatie leiden. De bodemdaling die door het verdichten van het reservoir aan de oppervlakte ontstaat is ter plaatse van een gebouw zo gelijkmatig dat de zettingsverschillen ver onder de toelaatbare grenzen blijven. Omdat de bodemdaling wel gevolgen heeft voor het waterbeheer moeten onder meer de oppervlaktewaterpeilen verlaagd worden. Dit kan lokaal wel tot situaties leiden waarbij de zettingsverschillen de toelaatbare grenzen overschrijden. Uit de beschikbare rapporten blijkt dat in het beheersgebied van het Waterschap Noorderzijlvest de vastgestelde maatregelen voor het waterbeheer worden getoetst met betrekking tot de zetting. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de meest recente ondergrond- en hydrologiemodellen. Deze studies geven geen uitsluitsel over de effecten op individuele gebouwen. Daarvoor moeten de lokale eigenschappen van gebouw, fundering en ondergrond bekend zijn. Op plaatsen waar de in de studies voorspelde zettingsverschillen de toelaatbare grenzen niet overschrijden kan er door een lokale afwijking van de eigenschappen toch een dergelijke situatie optreden. In verband met de kwetsbaarheid van houten paalfunderingen wordt aanbevolen om gegevens van de bouwwerken op houten palen te verzamelen, om op die wijze inzicht te verkrijgen in de omvang van de problematiek. Opgemerkt wordt dat peilveranderingen ook om andere redenen dan bodemdaling door aardgaswinning kunnen worden genomen.

6 Conclusies

Gebouwschade door aardgaswinning

Aardgaswinning kan resulteren in meerdere, directe en indirecte, effecten die invloed hebben op de gebouwde omgeving. Deze effecten zijn:

- Aardbevingen. Deze resulteren in trillingen in de gebouwen.
- Vervloeien en verdichten van de ondiepe ondergrond door trillingen. Dit kan in lokale zettingen van de ondergrond onder de gebouwen resulteren.
- Komdaling. Dit resulteert in een algehele gelijkmatige zetting van de ondergrond in het winningsgebied.
- Peilstijging en peilverlaging. Met name de *relatieve peilverlaging* kan in lokale zettingen van de ondergrond onder de gebouwen resulteren.

De effecten van de aardgaswinning kunnen resulteren in gebouwschade. In het algemeen geldt echter dat het niet eenvoudig is te achterhalen of een optredende gebouwschade (geheel) te wijten is aan de gevolgen van aardgaswinning. Veelal is sprake van meerdere schademechanismen, die gezamenlijk met de gevolgen van aardgaswinning, hebben geresulteerd in de uiteindelijke gebouwschade. In hoeverre de aardgaswinning de spreekwoordelijke druppel is geweest of zelfstandig de schade heeft kunnen veroorzaken is vrijwel niet eenduidig vast te stellen.

Aardbevingen

Aardbevingen resulteren in trillingen die vanuit de aardbevingshaard, via de bodem, worden doorgegeven naar de gebouwen. Het trillingsniveau dat daardoor in de gebouwen ontstaat is afhankelijk van de kenmerkende eigenschappen van de aardbevingen, van de mate waarin de trillingen door de bodem worden doorgevoerd naar de gebouwen en van de mate waarin de trillingen via de fundering worden doorgegeven aan de gebouwen.

De inschatting van de maximaal mogelijke magnitude, frequentie en haarddiepte van de aardbevingen wordt momenteel statistisch bepaald ondersteund door een fysisch model. Voor beide methoden geldt dat het mogelijk is om met de huidige stand van de techniek de inschatting van met name de maximale magnitude nog te verfijnen. Ten aanzien van de statistische methode wordt geadviseerd om een nieuwe analyse te maken, omdat de meest recente dateert van 2003. Vervolgens wordt geadviseerd om analoog aan de bodemdalingsprognose een dergelijke analyse elke vijf jaar te herhalen, waarbij de laatste inzichten kunnen worden meegenomen. De tot op heden opgetreden aardbevingen zullen volgens het KNMI momenteel niet leiden tot een bijstelling van de verwachte maximale magnitude van $M=3,9$. Deze conclusie wordt, gezien de in de analyse gehanteerde marges, onderschreven. Een nadere onderbouwing van de analyse met behulp van een update van het fysisch model van het Groningen-gasveld, is aan te raden. Hiermee kan een betere inschatting worden gemaakt welke breuken bij de aardbevingen een rol spelen, wat de voorspelling van de ruimtelijke invloed van de aardbevingen kan verbeteren. Verwacht wordt dat voortgezet onderzoek ook zal leiden tot meer inzicht in de geomechanische oorzaak van de aardbevingen en de relatie met de winningsstrategie en –snelheid. Daarbij zal ook aandacht moeten worden gegeven aan de frequentie van optreden van aardbevingen en mogelijke na-ijleffecten na het stoppen van de winning.

De voorgestelde updates zullen, wanneer deze gekoppeld worden aan trillingsmetingen aan gebouwen, leiden tot een vermindering van de onzekerheden in de bepaling van de kans op schade aan gebouwen. Voor het voorspellen van de gevolgen van trillingen door aardbevingen in Noord Nederland wordt gebruik gemaakt van een Probabilistische Seismische Hazard Analyse (PSHA). Een dergelijke PSHA is vooralsnog de beste methode om deze gevolgen in kaart te brengen in combinatie met de berekening van de *response spectra*, ondanks de relatief grote bandbreedte in de resultaten. Aanbevolen wordt om de lopende onderzoeken naar verbetering van deze analyse door te zetten, teneinde de bandbreedte in de resultaten te verkleinen.

Het voorgaande betekent dat er nog een relatief grote onzekerheid zit in de voorspelling van het aantal schadegevallen dat zal optreden wanneer in de toekomst een aardbeving met een bepaalde magnitude optreedt. Dit blijkt ook wanneer de uitkomsten van een dergelijke voorspelling gevalideerd worden aan de hand van de schademeldingen [20], [43]. De aanbevelingen uit [20] en [43] worden in dit kader onderschreven. Dit betekent onder andere een ijking van de gebruikte seismische, geomechanische en bouwkundige modellen met de waargenomen en gedocumenteerde intensiteit van de aardbevingen en schade. Deze ijking kan verbeteren door meer metingen van optredende bodemtrillingen in de ondiepe ondergrond en aan de overdracht van deze trillingen naar gebouwen.

Voor aardbevingen met magnitudes tussen $M=3$ en $M=3,5$ kan een betrouwbare schatting worden gegeven van het aantal schadegevallen dat zal optreden per woningtype in relatie tot de afstand van het epicentrum van de aardbeving [43]. Voor extrapolatie naar hogere magnitudes ontbreken momenteel de analyses. Ook de relatie met de aard van de schade is nog niet gelegd.

De aanbevelingen uit [20] en [43] worden in dit kader onderschreven. Dit betekent:

- een verdergaande ijking van de gebruikte seismische, geomechanische en bouwkundige modellen met de waargenomen en gedocumenteerde intensiteit van de aardbevingen en type schade;
- de verbetering van de ijking door meer metingen van optredende bodemtrillingen in de ondiepe ondergrond en van de overdracht van deze trillingen naar gebouwen.

Voor een meer algemene inschatting van de gevolgen van aardbevingen voor een bepaald gebied kan een voorspelling worden gemaakt op basis van de EMS schaal. Deze voorspelling is echter globaal omdat de schade subjectief is geformuleerd. De ernst is dus niet kwantificeerbaar (voorspelling scheurwijdtes). De aardbevingen in Noord Nederland vallen maximaal in intensiteitsklasse VI tot VII. Volgens de EMS schaal betekent dit (zie Bijlage A):

- 10 tot 60% van de gebouwen in metselwerk of natuursteen en 0 tot 20% van de gebouwen in gewapend beton lijden matige schade (lichte constructieve schade).
- 0 tot 20% van de gebouwen in metselwerk of natuursteen lijden aanzienlijke tot zware schade (matige constructieve schade). De schade treedt met name op in de hoger gelegen delen van gebouwen. Aanzienlijke tot zware schade wordt gedefinieerd als grote en diepe scheuren in de meeste muren, wegglijden van dakpannen, het breken van schoorstenen op de daklijn en breuk van enkele niet-constructieve onderdelen.

Op basis van de ervaringen met de schaderapporten tot nu toe in Noord Nederland is dit een pessimistische weergave van de ernst van de schade door de aardbevingen. Dit is verklaarbaar, omdat de schaal is opgesteld voor alle bouwtypen in Europa, waardoor de afzonderlijke schadeklassen een breed scala aan schadekenmerken bevatten, ook van zwakkere constructies dan in Nederland gebruikelijk zijn.

Aanbevolen wordt om in de EMS schaal ook objectief vast te stellen schadekenmerken (scheurwijdtes) op te nemen. Omdat de intensiteit van een aardbeving subjectief wordt vastgesteld (op basis van enquêtes) is het ook van belang dat er objectieve relaties worden opgesteld tussen ernst van schade en trillingssnelheden. Omdat er verschillen in schadebeelden bestaan al naar gelang het type en de staat van de constructie, is monitoring van de versnellingen die in panden kunnen optreden en de schade die hierdoor ontstaat, van belang.

Verder wordt aanbevolen om de norm NEN-EN 1998-1 (Eurocode 8) aan te vullen met de voor Nederland specifieke omstandigheden van de geïnduceerde aardbevingen.

Vervloeien en verdichten van de ondiepe ondergrond

Trillingen als gevolg van de aardbevingen kunnen leiden tot lokale zettingen of vervloeiing van losgepakte fijnkorrelige zanden. Dit fenomeen is tot op heden niet waargenomen, maar het kan niet uitgesloten worden dat schade aan ondiep gefundeerde gebouwen (deels) aan dit verschijnsel is toe te schrijven. Aanbevolen wordt bij onderzoek naar de oorzaak van zettingsschade van een bepaald pand de gevoeligheid van de ondergrond voor vervloeien en/of verdichten na te gaan.

Omdat de studie naar de invloed van aardbevingstrillingen op waterkeringen uitgegaan is van een maximale magnitude van 3,8 wordt aanbevolen de studie te actualiseren naar een maximale magnitude van 3,9.

Komdaling

De prognose van de komdaling door de gaswinning wordt iedere 5 jaar herzien. Het is de plicht van de operator, in dit geval de NAM om hiervoor de metingen te laten uitvoeren en de prognose uit te voeren. In het TCBB rapport "Van meting naar daling" [23] worden aanbevelingen gedaan voor een regularisatie van de hiervoor benodigde methodiek. Voor de berekening en prognose van de bodemdaling boven het Groningen-gasveld volgt de NAM grotendeels al deze methodiek.

De in de voorspelling gehanteerde onzekerheidsmarges van 15 tot 30 % liggen ruim boven het waargenomen verschil tussen prognose en meting van 10%. Het handhaven van deze onzekerheidsmarges wordt onderschreven.

Uit de beschikbare rapportages met betrekking tot bodemdalingsprognoses en geassocieerde schade blijkt dat zorgvuldig met de onzekerheden in deze problematiek wordt omgegaan en hierop veilige marges worden toegepast. Aanpassingen aan het peilbeheer ten gevolge van de voorspelde bodemdaling worden hierdoor goed onderbouwd.

De komdaling als gevolg van de aardgaswinning treedt op over een relatief groot oppervlak, met een maximale helling van 1 mm over een lengte van 25 m. Op gebouwniveau resulteert dit in een vrijwel rechtstandige zakking, ongeacht de wijze van funderen van de gebouwen. Een dergelijk zakkingsverschil resulteert niet in schade aan gebouwen.

Rapportages, beschrijving van de meetmethodiek en voorspelling van bodemdaling als gevolg van aardgaswinning als ook de meetregisters van de hoogtemetingen kunnen geraadpleegd worden op het webportaal voor informatie over opsporing en winning van olie en gas in Nederland en het Nederlandse deel van het Continentaal plat: <http://www.nlog.nl/nl/home/NLOGPortal.html>.

Peilverlaging en peilverhoging

Door de komdaling vermindert de drooglegging. Dit resulteert daarmee in een relatieve peilstijging, die op een gegeven moment gecorrigeerd wordt door middel van een peilverlaging. Een dergelijke peilverlaging herstelt de oorspronkelijke drooglegging. Lokaal kan de peilverlaging op het moment van in werking treden groter zijn dan de opgetreden bodemdaling. De kans op het optreden hiervan bij de door het waterschap voorgestelde maatregelen wordt in opdracht van de Commissie Bodemdaling onderzocht.

Gebouwschade door zettingen treedt pas op wanneer zettingsverschillen onder het gebouw tot een zodanige vervorming van het gebouw leiden dat de sterkte van het gebouw overschreden wordt. Lokaal kunnen deze zettingsverschillen dusdanig groot worden dat de toelaatbare grenzen daadwerkelijk worden overschreden. Uit de beschikbare rapporten blijkt dat in het beheersgebied van het Waterschap Noorderzijlvest de vastgestelde maatregelen voor het waterbeheer worden getoetst met betrekking tot de zetting. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de meest recente ondergrond- en hydrologiemodellen. Deze studies geven geen uitsluitsel over de effecten op individuele gebouwen. Daarvoor moeten de lokale eigenschappen van gebouw, fundering en ondergrond bekend zijn. Op plaatsen waar de in de studies voorspelde zettingsverschillen de toelaatbare grenzen niet overschrijden kan er door een lokale afwijking van de eigenschappen toch een dergelijke situatie optreden. In verband met de kwetsbaarheid van houten paalfunderingen wordt aanbevolen om gegevens van de bouwwerken op houten palen te verzamelen, om op die wijze inzicht te verkrijgen in de omvang van de problematiek. Opgemerkt wordt dat peilveranderingen ook om andere redenen dan bodemdaling door aardgaswinning kunnen worden genomen.

Alle kennis bevat leemten en onzekerheden, dat geldt ook voor de effecten van aardgaswinning. De opstellers van dit rapport hebben geconstateerd dat alle betrokken instanties zorgvuldig met deze onzekerheden omgaan en hierop veilige marges toepassen, waardoor verrassingen, dat wil zeggen overschrijding van deze marges, zoveel mogelijk uitgesloten worden en te nemen maatregelen de nadelige effecten van de aardgaswinning zo veel als mogelijk beperken. Tevens is geconstateerd dat er ruimte is voor verbetering van de kennis door verder onderzoek en voortschrijdend inzicht. Hiertoe zijn een aantal aanbevelingen gedaan.

Hieronder zijn de conclusies en aanbevelingen puntsgewijs samengevat.

Conclusies

Aardbevingen

- De inschatting van de maximaal mogelijke magnitude ($M=3,9$) is op de internationaal geaccepteerde wijze uitgevoerd. Daarbij is gebruik gemaakt van statistische analyse van de aardbevingen tot 2003.
- De verwachtingen zijn weergegeven in bruikbare kaarten van (kans op) pieksnelheid aan de oppervlakte. De zonering is een weergave van omhullenden, resulterend in een conservatieve marge.
- De verdeling van aardbevingen over het Groningen veld lijkt samen te vallen met de belangrijkste breuken aan de top van het gasveld op ca 3 km diepte en is ongelijk verdeeld over het gehele veld. In de tijd is tevens de frequentie van aardbevingen in het Groningen veld toegenomen. Het is onduidelijk of er een stationaire situatie is opgetreden. Een verklaring hiervoor ontbreekt nog, zodat een inschatting van het toekomstige verloop en de ruimtelijke verdeling van de aardbevingsfrequentie nog niet gegeven kan worden.

Schade door aardbevingen aan gebouwen

- Er heeft een ijking plaatsgevonden van de kans op schade bij aardbevingen met een kracht tussen $M=3$ en $M=3,5$. Hiermee zijn de buitengrenzen bepaald van de gebieden met een kans op schade groter dan 1%. Voor de extrapolatie naar andere magnitudes zijn de onzekerheden conservatief verdisconteerd.
- De maximaal verwachte intensiteit is VI-VII op de EMS-schaal. Voor metselwerk gebouwen 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. Dit is verklaarbaar, omdat de schaal is opgesteld voor alle gebouwtypen in Europa voor natuurlijke aardbevingen, waardoor de afzonderlijke schadeklassen een breed scala aan schadekenmerken bevatten, ook van zwakkere constructies dan in Nederland gebruikelijk zijn.
- Trillingen kunnen in ondiepe losgepakte fijnzandige lagen tot zettingen door verdichten of vervloeien van het zand leiden. Dit verschijnsel is niet waargenomen, maar mag niet uitgesloten worden als een lokale oorzaak van zetting van ondiepe funderingen. Bij paalfunderingen die in het pleistocene zand zijn gefundeerd is dit niet relevant.

Bodemdaling door gaswinning

- De bodemdaling die direct door de gaswinning wordt veroorzaakt wordt iedere vijf jaar door de NAM herzien. De sinds de start van de winning opgetreden en voorspelde bodemdaling wordt dan gepubliceerd. De NAM hanteert daarvoor de algemeen geaccepteerde geodetische methodieken. Bij de voorspelling wordt een onzekerheidsmarge bepaald van 15% tot 30%. De in 2003 en 2008 waargenomen gemiddelde afwijking van de prognose was kleiner dan 10%.
- De bodemdaling resulteert in een komvormige depressie met een geleidelijke helling. De door de komdaling veroorzaakte scheefstelling zal maximaal 1mm over een lengte van 25 m bedragen. Dit is enkele orden lager dan de constructieve grenswaarden en leidt niet tot schade aan gebouwen.
- Bodemdaling door gaswinning leidt bij ongewijzigde peilhoogte van het oppervlaktewater tot een relatieve peilstijging. Dit kan ongewenste gevolgen hebben voor het oppervlaktewatersysteem en bij zwakke funderingen tot zettingen. Er zijn maatregelen genomen opdat het waterschap de peilen aanpast om de relatieve peilverschillen te minimaliseren.

Bodemdaling door drainage (peilbeheer)

- Het handhaven van een ontwateringsdiepte door peilbeheer leidt tot het inklinken van de bodem en in het geval van veen tot oxidatie. Bij peilverlagingen kan lokaal hierdoor schade aan ondiep gefundeerde gebouwen en infrastructuur ontstaan. Wanneer het peil aangepast (verlaagd) wordt om de relatieve peilstijging door gasdaling te compenseren kan dit lokaal (initieel) leiden tot relatieve peilverlaging. In opdracht van de Commissie Bodemdaling worden de gevolgen met betrekking tot onder meer gebouwschade onderzocht. Dit wordt volgens de laatste inzichten uitgevoerd. Ook worden grenswaarden voor verlaging toegepast waardoor de kans op schade niet hoger kan worden dan 5%. Omdat zetting van gebouwen voornamelijk door lokale omstandigheden wordt bepaald is het niet mogelijk om over individuele gebouwen uitspraken te doen.

Aanbevelingen

Aardbevingen

- De laatste gepubliceerde inschatting van de maximaal mogelijke magnitude is gebaseerd op de analyse uit 2003. Aanbevolen wordt om, analoog aan de 5-jaarlijkse update van de bodemdalingsprognose, deze analyse ook te herhalen, gebruik makend van alle nieuwe waarnemingen en verbeterde geomechanische modellen. Hierbij dient ook aandacht te worden besteed aan de te verwachten frequentie van de aardbevingen en een eventueel na-ijleffect na het stoppen van de winning. Het is niet te verwachten dat de maximale magnitudeverwachting van $M=3,9$ wezenlijk zal veranderen.
- De voorspellingen van de ruimtelijke grenzen van verwachte trillingsniveaus kan worden verbeterd door op meer plaatsen versnellingsopnemers te plaatsen.
- Voortzetting van het reeds verrichte onderzoek door het KNMI wordt aanbevolen.

Schade door aardbevingen

- In het voorliggend rapport wordt geconcludeerd dat de EMS-schaal beperkt voldoet voor het voorspellen van het type schade door aardbevingen als gevolg van de gaswinning. 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. Dit is verklaarbaar, omdat de schaal is opgesteld voor alle gebouwtypen in Europa, waardoor de afzonderlijke schadeklassen een breed scala aan schadekenmerken bevatten, ook van zwakkere constructies dan in Nederland gebruikelijk zijn. Ook kunnen specifieke kenmerken van een geïnduceerde aardbeving een rol spelen. De PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) is een internationaal geaccepteerde methode om trillingsniveaus van de bodem te bepalen. Voor de vertaling naar de gevolgen voor gebouwen ontbreken momenteel trillingsmetingen aan gebouwen. Door kalibratie van het uit metingen afgeleide trillingsniveau van de grond van een beperkt aantal opgetreden aardbevingen kan nu voor aardbevingen met een kracht tussen 3 en 3,5 op de schaal van Richter voorspeld worden wat de kans op schade is op een gegeven afstand van het epicentrum. Aanbevolen wordt om het onderzoek naar de relatie tussen schade en de geregistreerde magnitude voort te zetten en de bij een gebouw optredende trilling te meten, zodat een betere voorspelling van de schade bij een magnitude van 3,9 kan worden gemaakt. Voortzetting van het reeds verrichte onderzoek door het KNMI en TNO wordt aanbevolen. Omdat het onderzoek afhankelijk is van het optreden van aardbevingen zullen analyses pas na verloop van tijd nieuwe inzichten opleveren.
- De norm NEN-EN 1998-1 (Eurocode 8) is gebaseerd op de relatie tussen trillingsniveaus in gebouwen en tektonische, natuurlijke aardbevingen. Hierdoor kunnen in het ontwerp van constructies onjuiste dynamische belastingen worden berekend. Het wordt aanbevolen om deze norm aan te vullen met de voor Nederland specifieke omstandigheden van de geïnduceerde aardbevingen. Aanbevolen wordt om dit onderzoek in CURNET verband uit te voeren.
- Verdichting of vervloeiing van losgepakte zandlagen mag als (gedeeltelijke) oorzaak van zettingsschade niet worden uitgesloten. Bij onderzoek naar de oorzaak van schade bij een gebouw dient dit meegenomen te worden.
- In de studie naar de gevolgen van aardgaswinning in de Waddenzee is berekend dat er een kleine kans bestaat dat bij aardbevingen met een kracht van $M=3,8$, aan het onderwatertalud van de zeedijken in losgepakte zandlagen een kleine instabiliteit kan ontstaan. Aanbevolen wordt om deze berekening te actualiseren voor een magnitude

3.9. Deze informatie dient bij Rijkswaterstaat en de waterschappen beschikbaar te zijn.

Bodemdaling door gaswinning (rapportage NAM)

- Het wordt aanbevolen de momenteel gehanteerde onzekerheidsmarges van 15% tot 30% in de voorspelling van de bodemdaling te handhaven.
- Het wordt aanbevolen om in toekomstige prognoses aandacht te besteden aan eventuele na-ijleffecten.

Het optreden van schade aan gebouwen wordt sterk bepaald door lokale omstandigheden, zoals de ondergrond, de kwaliteit van de fundering en de constructie en de grondwaterstand en de historie van belastingen op de constructie.

- In verband met de kwetsbaarheid van houten paalfunderingen wordt aanbevolen om in de gebieden waar relatieve peilverlagingen worden verwacht, gegevens van de bouwwerken op houten palen te verzamelen, om op die wijze inzicht te verkrijgen in de omvang van de problematiek.

In een apart opgesteld deelrapport van de onderhavige studie worden aanbevelingen gedaan om bij de schadeopname tot een onderbouwde beoordeling te komen van de oorzaak van een gemelde schade, waarbij de eerder genoemde aspecten worden meegenomen.

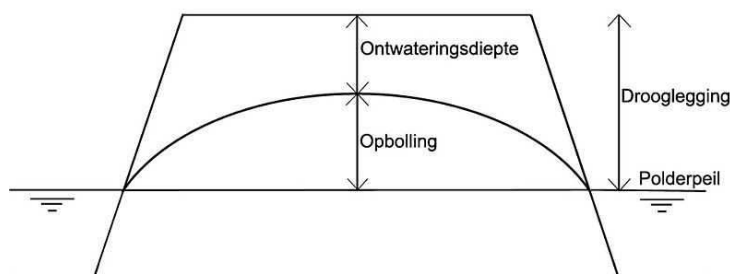
Een aantal aanbevelingen, die in eerdere publicaties zijn gedaan en hier zijn herhaald, wordt momenteel al opgevolgd. Er zijn inmiddels op meerdere plaatsen versnellingsopnemers geplaatst. Er wordt ook detailonderzoek uitgevoerd naar schadegevallen en hun oorzaak, met gebruikmaking van de door TNO opgestelde schadeopname-methodiek. Het laatste maakt deel uit van de onderhavige studie.

De vijfjaarlijkse publicatie van de bodemdalingsanalyse voor Groningen door de NAM draagt sterk bij aan het begrip in de samenleving van de oorzaken en gevolgen van de gaswinning. Uitbreiding van deze rapportage met de laatste inzichten in de oorzaken en gevolgen van aardbevingen in Groningen, wordt daarom sterk aanbevolen.

7 Begrippenlijst

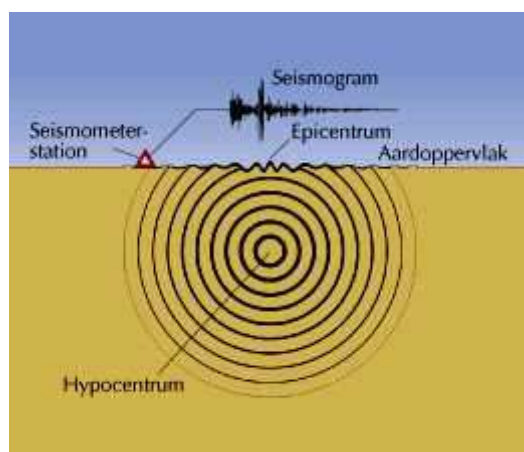
Attenuation Damping van het aardbevingssignaal; de mate waarin de trilling gedempt wordt en van frequentie-inhoud verandert als gevolg van voortplanting vanaf de bron tot dicht onder het aardoppervlak.

Drooglegging De *drooglegging* is het hoogteverschil tussen het peil (wateroppervlak) in een waterloop (sloot, kanaal, etc.) en het maaiveld (aardoppervlak) in het aanliggende gebied (zie Figuur 7.1).



Figuur 7.1 Begrippen drooglegging en ontwateringsdiepte

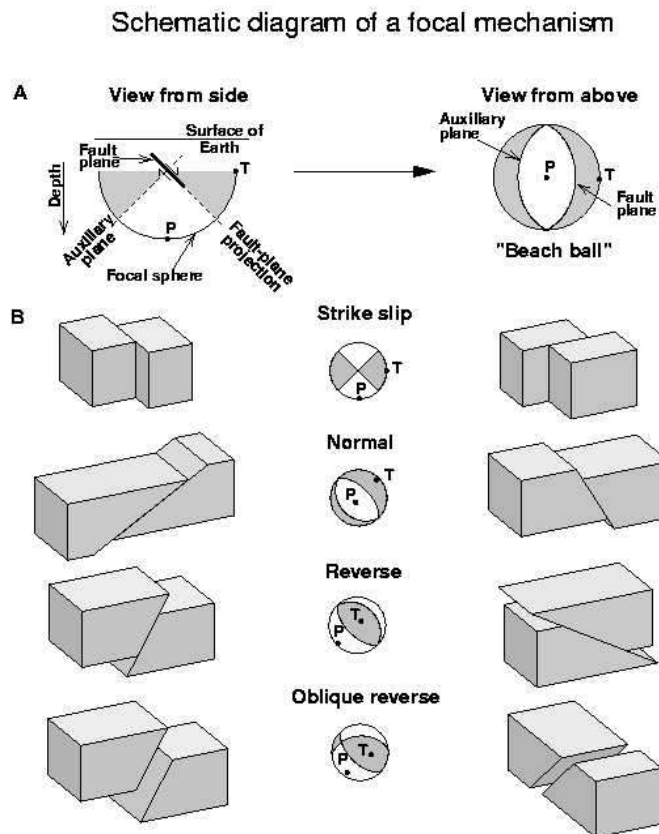
Epicentrum De projectie van de aardbevingshaard op het aardoppervlak. Aangezien het *epicentrum* het punt op het aardoppervlak is dat het dichtst bij de haard is, is dit ook het punt waar de aardbevingsgolven het sterkst zijn. Hypo (Grieks) = onder, epi (Grieks) = op. Zie Figuur 7.2 Bron: KNMI].



Figuur 7.2 Begrippen hypocentrum, epicentrum [Bron: KNMI]

Geïnduceerde seismiciteit Aardbevingen die worden opgewekt of getriggerd door menselijke activiteiten zoals nucleaire proeven, mijnbouw, gaswinning.

Haardmechanisme Een beschrijving van het mechanisme van de aardbeving; de richting waarin de verplaatsing plaatsvindt en de oriëntatie van de breuk waarlangs de verplaatsing plaatsvindt (zie Figuur 7.3).



Figuur 7.3 Schematisch overzicht van haardmechanismen [Bron: USGS, 1996]

Hypocentrum Het *hypocentrum* van een aardbeving is het gebied onder de grond waar de beving ontstaat. Ook wel haard genoemd. Hypo (Grieks) = onder, epi (Grieks) = op. Zie Figuur 7.2 [Bron: KNMI].

Intensiteit De *intensiteit* van een aardbeving is een aanduiding voor wat er op een bepaalde plaats wordt waargenomen van een aardbeving, dus wat de effecten zijn op bijvoorbeeld mensen, voorwerpen, gebouwen en het landschap. Deze hangt in de eerste plaats af van de *magnitude* van een beving, maar ook van de afstand tot het *epicentrum* en de diepte van de beving. De *intensiteit* van een beving wordt naderhand door waarnemingen (enquêtes) vastgesteld door het KNMI. Een van de eerste intensiteitsschalen is de Mercalli-schaal uit 1902. De schaal van Mercalli is een indeling in beschrijvende vorm van de gevolgen die aan het aardoppervlak zijn opgetreden en is verdeeld in 12 klassen. De schaal die tegenwoordig gebruikt wordt is de Europese Macroseismische Schaal uit 1992 (Bijlage A). Deze schaal maakt, in tegenstelling tot de Mercalli-schaal, onderscheid in de kwaliteit van gebouwen.

Magnitude *Magnitude* is de maat waarmee de sterkte van een aardbeving wordt weer gegeven. Omdat aardbevingen grote variaties in sterkte hebben, zijn de magnitudeschalen logaritmisch. Er zijn verschillende magnitudeschalen. De bekendste is de magnitude van Richter. [Bron: KNMI].

- Relatieve peilverlaging** *Relatieve peilverlaging* is de toename van drooglegging of peilverlaging minus de bodemdaling. Voorbeeld: als de bodemdaling 20 cm is en de peilverlaging ook 20 cm is de resulterende relatieve peilverlaging 0.
- Response spectrum** De relatie tussen de beweging (verplaatsing, snelheid of versnelling) van het grondoppervlak of een gebouw en de frequentie van een opgelegde trilling. Hieruit kan bijvoorbeeld afgelezen worden hoe groot de beweging van een gebouw wordt bij een aardbeving met een bepaalde kracht en trillingsfrequentie.
- Seismische hazard** Seismische hazard is de kans dat een bepaald niveau van groundbeweging ten gevolge van aardbevingen wordt overschreden binnen een specifieke tijd en een specifiek gebied.
- Site response** Eenmaal dicht bij het aardoppervlak beïnvloedt de reactie van de ondiepe lagen in sterke mate de frequentie-inhoud en de amplitude van het aardbevingssignaal. Deze invloed/reactie van de ondiepe ondergrond op het signaal wordt het site effect/de site response genoemd. Het kan leiden tot demping of tot opslinging, ook wel amplificatie genoemd.

8 Literatuurlijst

- [1] BRE ease of repair tabel: R Driscoll, 1995, BRE Digest 251: Assessment of Damage in Low Rise Buildings with Particular Reference to Progressive Foundation Movement, IHS Rapidoc
- [2] Campbell, K.W., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismol. Res. Lett.*, 68, 154-179.
- [3] Crook, Th. de, Dost, B. en Haak, H.W., 1995: Analyse van het seismische risico in Noord-Nederland, KNMI publicatie TR-168.
- [4] Crook, Th. de, Haak, H.W. & Dost, B. 1998. Seismisch risico in Noord Nederland. KNMI publicatie TR-205.
- [5] dePolo, C.M., and Slemmons, D.B., 1990. Estimation of earthquake size for seismic hazards, in Krinitzsky, E.L., and Slemmons, D.B., *Neotectonics in earthquake evaluation: Boulder, Colorado*, Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, v. 8, p. 1-28.
- [6] Eck, T. van, Goutbeek, F.H., Haak, H.W. & Dost B., 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes. KNMI publicatie WR-2004-01.
- [7] Eck, T. van, Goutbeek, F.H., Haak, H.W. & Dost B., 2006. Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in the Netherlands. *Engineering Geology*, 2006, vol. 87, p. 105-121.
- [8] L500 Toetsingsrichtlijn voor het ontwerp van boortunnels voor weg- en railinfrastructuur
- [9] Logan, J.M., Higgs, N.G. & Rudnicki, J.W., 1997. Seismicity risk assessment of a possible gas storage project in the Bergermeer field, Bergen concession. Logan.
- [10] Mulders, F.M.M., 2003. Modelling of Stress Development and Fault Slip in and around a Producing Gas Reservoir. Thesis.
- [11] Muntendam-Bos, A.G., Wassing, B.B.T., Geel, C.R., Louh, M., van Thienen-Visser, K., 2008. Bergermeer Seismicity Study. TNO rapport 2008-U-R1071/B.
- [12] NAM, 2005. Bodemdaling door Aardgaswinning. NAM-rapport EP200512202238
- [13] SBR richtlijn A, Trillingen, Schade aan gebouwen, meet- en beoordelingsrichtlijn
- [14] Staalduinen P.C. van & Geurts, C.P.W., 1998. De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte ondiepe aardbevingen in Nederland: Inventarisatie. TNO-rapport 97-CON-R1523-1.
- [15] Van Staalduinen, P.C., Smits, M.Th.J.H. 1991, revisie januari 1993. Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen. TNO rapport B-90-822.

- [16] Verruijt, A., 1999. De invloed van bodemdaling op het draagvermogen van funderingen op staal. TUDelft.
- [17] Waarts, P.H., Kans op schade aan bouwwerken door trillingen TNO rapport 97-CON-R1698, december 1997.
- [18] Wald, D.J., V. Quitoriano, T.H. Heaton and H. Kanamori, 1999. Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15, 557–564.
- [19] Wassing, B.B.T., Maljers, D., Westerhoff, R.S., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., 2003. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 1. TNO-rapport NITG 03-185-C.
- [20] Wassing, B.B.T., Maljers, D., Westerhoff, R.S., Bosch, J.H.A., Weerts, H.J.T., Koopman, A., Dullemond, A., Roos, W., 2004. Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen. Rapportage fase 2. TNO-rapport NITG 03-186-C.
- [21] Wu, Yih-Min, Ta-Liang Teng, Tzay-Chyn Shin and Nai-Chi Hsiao, 2003. Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Intensity in Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 386-396.
- [22] Bommer, J.J., 2002. Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy. *J. Earthquake Engineering*, 6, 43-73.
- [23] Technische Commissie Bodembeweging, Van meting naar daling, november 2009
- [24] Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, maart 1987. Studieresultaten betreffende ongelijkmatige zakkingen in verband met aardgaswinning in de provincie Groningen.
- [25] DIN 4150 deel 3
- [26] NEN 6740: 2006, Geotechniek – TGB 1990 – Basiseisen en belastingen
- [27] Boom, Th.J., oktober 1982. Een literatuurstudie betreffende de zettingen van gebouwen en ermee samenhangende schade. TNO-IBBC rapport BI-82-53
- [28] Bijnagte, J.L., Van Tol, A.F., januari 2005. Gebouwschade tgv. peilverhoging / Geocheck rap. 2000-005/B GW Rotterdam + woning Onderdendam. GeoDelft rapport CO-414940-009v02.
- [29] Bijnagte, J.L., Van Tol, A.F., Elprama, R., april 2006. Het effect van grondwaterstijging op funderingen op staal. Geotechniek.
- [30] Bijnagte, J.L., september 2005. Kleine literatuurstudie effecten peilstijging. GeoDelft rapport CO-414941-0006.
- [31] Havinga, H.R., Sman, H.Th., Salemans, J.W.M., januari 2007. Mogelijke gevolgen van peilverlagingen voor bebouwing / Inventarisatiefase. GeoDelft rapport 425520-0008v02.

- [32] Havinga, H.R., Sman, H.Th., mei 2007. Mogelijke gevolgen van peilverlagingen voor bebouwing / tweede fase. GeoDelft rapport 425520-0018v01
 - [33] Bijnagte, J.L., Luger, H.J., april 2006. Beoordeling "Groene boek" en overige literatuur. GeoDelft rapport CO-414941.0010v01.
 - [34] Bijnagte, J.L., Luger, H.J., Boeije, R., december 2008. Toelaatbaarheid 50mm relatieve peilverlaging. Deltares rapport 414943v01
 - [35] NEN 6702: 2007, Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Belastingen en vervormingen.
 - [36] NEN-EN 1998-1 Eurocode 8: Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies – Deel 1: Algemene regels, seismische belastingen en regels voor gebouwen
 - [37] TNO: 2003, Oorzaak schade aan gebouwen nabij Grou - NITG 03-062-B
 - [38] Eysink, W.D., Fokkink, R.J., Wang, Z.B., Onassis, J., Kruse, G.A.M., 1998: Integrale bodemdalingstudie Waddenzee - Geomorfologie en infrastructuur
 - [39] Kruse, G.A.M., november 1998. Evaluatie van liquefactie door kleine ondiepe aardbevingen in Noord-Nederland. Grondmechanica Delft rapport CO-383750
 - [40] Snepvangers J. en W. Berendrecht 2007, Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer, TNO-rapport 2007-U-R0972/A
 - [41] Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, 2008. Jaarverslag Nr. 24, periode januari 2008 t/m december 2008
 - [42] Nieuwenhuis, J.D., 1994. Liquefaction and the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands, Geologie en Mijnbouw, vol. 73, 357-364
 - [43] Roos, W. Waarts, P.H., Wassing, B.B.T., 2009. Kalibratiestudie schade door aardbevingen. TNO-rapport TNO-034-DTM-2009-04435.
 - [44] Van Eijs, R.M.H.E., F.M.M. Mulders, M. Nepveu, C.J. Kenter and B.C. Scheffers, 2006, Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in The Netherlands, Engineering Geology, Vol. 84, pp. 99-111
 - [45] Vos, P.C., Van Kesteren, W.P., 2000, The long-term evolution of intertidal mudflats in the northern Netherlands during the Holocene; natural and anthropogenic processes Continental Shelf Research Vol. 20, pp. 1687-1710
 - [46] Brand, G.B.M., 2001, Oorzaken van de bewegingen van de merken van het NAP, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat
- NAM, 2010. Bodemdaling door Aardgaswinning. NAM-rapport EP201006302236.

A EMS intensiteitschaal

Gebouwen worden in de EMS schaal in zes types ingedeeld, gebaseerd op de kwetsbaarheid voor schade. Deze indeling is als volgt:

- Type A: Gebouwen gemaakt van los gestapelde stenen, landbouwconstructies, klei;
- Type B: Gebouwen in metselwerk, gebouwen uit natuursteen;
- Type C: Gebouwen in gewapend beton, degelijk gebouwde houten huizen;
- Type D: Gebouwen die speciaal op aardbevingen zijn ontworpen, met een minimaal graad van Aardbevingsbestendig Ontwerp (ABO);
- Type E: Gebouwen die speciaal op aardbevingen zijn ontworpen, met een gemiddelde graad van Aardbevingsbestendig Ontwerp (ABO);
- Type F: Gebouwen die speciaal op aardbevingen zijn ontworpen, met een maximale graad van Aardbevingsbestendig Ontwerp (ABO).

De EMS schaal definieert 5 gradaties van schade aan gebouwen welke is gekoppeld aan het type gebouw. De gradaties zijn te beschrijven als:

Gradatie 1: Verwaarloosbare tot lichte schade (geen constructieve schade)

Klasse 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.

Klasse D-F:

kleine scheurtjes in pleisterwerk op regels en in scheidingswanden.

Gradatie 2: Matige schade (lichte constructieve schade, matige niet-constructieve schade)

Klasse A-C:

scheuren in veel muren; vallen van grotere stukken pleisterwerk; delen van schoorstenen komen omlaag.

Klasse D-F:

haarscheurtjes in penanten, kolommen en balken; metselwerk valt uit voegen van wanden; scheuren in scheidingsmuren; vallen van stukken brosse afdekklagen en pleisterwerk.

Gradatie 3: Aanzienlijke tot zware schade (matige constructieve schade, zware niet-constructieve schade)

Klasse 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.

Klasse D-F:

scheuren in penanten en losraken van stukken beton, scheuren in balken.

Gradatie 4: Zeer zware schade (zware constructieve schade, zeer zware niet-constructieve schade)

Klasse A-C:

ernstige breuken in muren; gedeeltelijk bezwijken van constructieve onderdelen.

Klasse D-F:

ernstige schade door ontwrichting van het bouwskelet met verwoesting van beton waarbij wapeningsstaal zichtbaar kan worden; gedeeltelijke instorting; penanten en kolommen komen scheef te staan.

Gradatie 5: Verwoesting (zeer zware constructieve schade)

Klasse A-F:

algehele of vrijwel totale ineenstorting.

Voor metselwerk gebouwen zijn de schadegradaties weergegeven in onderstaande figuur.



Gradatie 1: Verwaarloosbaar tot lichte schade (geen constructieve schade)

- Haarscheurtjes in een enkele muur;
- Neervallen van slechts kleine stukjes pleisterwerk;
- In een enkel geval vallen van loszittende stenen.



Gradatie 2: Matige schade (lichte constructieve schade)

- Scheuren in veel muren;
- Vallen van grotere stukken pleisterwerk;
- Vallen van delen van schoorstenen.



Gradatie 3: Aanzienlijke tot zware schade (matige constructieve schade)

- In de meeste muren grote en diepe scheuren;
- Dakpannen glijden weg;
- Schoorstenen breken op de daklijn;
- Breuk van enkele niet-constructieve onderdelen.



Gradatie 4: Zeer zware schade (zware constructieve schade)

- Ernstige breuken in muren;
- Gedeeltelijk bezwijken van constructieve onderdelen van daken en vloeren.

Gradatie 5: Verwoesting (zeer zware constructieve schade)



- Algehele of vrijwel totale ineenstorting.

Figuur A.1 Schadegradaties in EMS schaal voor metselwerk gebouwen (Grünthal, 1998)

Verder wordt een terminologie gedefinieerd met betrekking tot het aantal schades in een populatie gebouwen (zie onderstaande figuur):

- *Enkele* is kleiner dan 20 %;
- *Veel* is tussen 10 en 60 %;
- *Meeste* betekent tussen 50 en 100 %.

Enkele	===	-----								
Veel		-----	===	===	===	-----				
Meeste						-----	===	===	===	===
%	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100

Figuur A.2 Terminologie met betrekking tot de kwantificering van de hoeveelheid schade in populatie volgens de EMS intensiteitsschaal

Verder wordt in de beschrijving van de schaal onderscheid gemaakt in:

- het effect op personen en de omgeving;
- het effect op objecten en de natuur, met name de bodemstructuur en waterbewegingen;
- het effect op allerlei soorten bouwconstructies.

Voor deze studie is met name het effect op bouwconstructies (c) van belang.

Een Nederlandstalige beschrijving van de EMS-schaal is gegeven in de kaders op de volgende pagina's.

Type bouwconstructie		Kwetsbaarheids-klasse					
		A	B	C	D	E	F
M	diverse natuursteen						
	gedroogde klei/leem						
	eenvoudige steen						
	massieve steen						
	baksteen/betonblokken						
	baksteen met gewapend beton vloeren						
	gewapende steen						
B	zonder aardbevingsbestendig ontwerp (ABO)						
	minimaal ABO niveau						
	matig ABO niveau						
	hoog ABO niveau						
H	houten constructies						

M: Metselwerk constructies

B: Gewapend betonnen constructies

H: Houten constructies

	meest adequate classificatie
	mogelijke spreiding
	eventuele spreiding, slechts in uitzonderingsgevallen

Figuur A 3 Indeling van gebouwen naar kwetsbaarheid voor aardbevingen volgens de EMS schaal

EMS-intensiteitsschaal	
I	Niet gevoeld
	- a Niet gevoeld, zelfs onder meest gunstige omstandigheden. - b Geen effect. - c Geen schade.
II	Nauwelijks gevoeld
	- a De beving wordt slechts binnenshuis gevoeld door een enkeling (minder dan 1%) in rusttoestand of in een bijzonder ontvankelijke situatie. - b Geen effect. - c Geen schade.
III	Zwak
	- a De aardbeving wordt binnenshuis gevoeld door enkelen. Mensen in rusttoestand voelen een schommeling of lichte trilling. - b Opgehangen voorwerpen slingeren licht heen en weer. - c Geen schade.
IV	Algemeen waargenomen
	- a De aardbeving wordt binnenshuis door velen gevoeld en buitenshuis slechts door enkelen. Enkelen worden wakker. De sterkte van de trillingen is matig; niemand schrikt. Een licht trillen of zwaaien van het gebouw, kamer, bed of stoel enz. is waarneembaar. - b Rammelen van serviesgoed, glaswerk, ramen en deuren. Hangende voorwerpen slingeren. In een enkel geval begint licht huisraad zichtbaar te schudden en hoort men het houtwerk kraken. - c Geen schade.
V	Sterk
	- a De aardbeving wordt binnenshuis door de meeste mensen gevoeld, buitenshuis door weinigen. Enkele mensen schrikken en rennen naar buiten. Veel slapende mensen worden wakker. Een sterk trillen of schudden van het hele gebouw, kamer of meubilair wordt waargenomen. - b Hangende voorwerpen slingeren aanzienlijk. Servies en glaswerk rinkelt. Kleine, topzware en/of wankel voorwerpen kunnen verschuiven of omvallen. Deuren en ramen zwaaien open en dicht. In enkele gevallen breken vensterruiten. Schommelingen in vloeistoffen waarbij volle vloeistofreservoirs kunnen overlopen. Dieren in huis kunnen onrustig worden. - c Schade met gradatie 1 aan enkele gebouwen.

EMS-schaal: vervolg

VI Lichte schade veroorzakend

- a Door de meeste mensen binnenshuis gevoeld, door velen buitenshuis. Enkele personen verliezen hun evenwicht. Veel mensen zijn geschrokken en rennen naar buiten.
- b Kleine stabiele voorwerpen kunnen omvallen en meubilair kan gaan schuiven. In enkele gevallen kan serviesgoed en glaswerk breken. Het vee kan schrikachtig worden (ook buiten).
- c Veel gebouwen ondergaan schade met gradatie 1; enkele lijden schade met gradatie 2.

VII Schade veroorzakend

- a De meeste mensen zijn geschrokken en proberen naar buiten te rennen. Velen hebben moeite om zich staande te houden, met name op hoger gelegen verdiepingen.
- b Meubilair verschuift en topzwaar meubilair kan omvallen. Voorwerpen vallen in grote aantallen van schappen. Water spoelt over uit vaten, tanks en zwembaden.
- c Veel gebouwen van klasse B en enkele van klasse C lijden schade met gradatie 2. Veel gebouwen van klasse A en enkele van klasse B schade met gradatie 3; enkele gebouwen van klasse A lijden schade met gradatie 4. De schade treedt met name op in de hoger gelegen delen van gebouwen.

VIII Zware schade veroorzakend

- a Veel mensen hebben moeite om op de been te blijven, ook buitenshuis.
- b Meubilair kan omver geworpen worden. Voorwerpen zoals tv's, typemachines enz. vallen op de grond. Hier en daar kunnen grafstenen worden verschoven, gedraaid of omver geworpen. In erg slappe bodem kunnen golvingen worden waargenomen.
- c Veel gebouwen van klasse C lijden schade met gradatie 2. Veel gebouwen van klasse B en enkele van klasse C lijden schade met gradatie 3. Veel gebouwen van klasse A en enkele van klasse B lijden schade met gradatie 4; enkele gebouwen van klasse A lijden schade met gradatie 5.
Enkele gebouwen in klasse D lijden schade met gradatie 2.

IX Vernielend

- a Algehele paniek. Mensen kunnen zelfs met kracht tegen de grond geworpen worden.
- b Veel standbeelden en gedenkzuilen vallen om of worden gedraaid. Golvingen zijn zichtbaar in slappe bodem.
- c Veel gebouwen van klasse C lijden gradatie 3 schade. Veel gebouwen van klasse B en enkele van klasse C lijden schade met gradatie 4. Veel gebouwen van klasse A en enkele van klasse B lijden gradatie 5 schade.
Veel gebouwen van klasse D lijden schade met gradatie 2; enkele met gradatie 3.
Enkele gebouwen van klasse E lijden schade met gradatie 2.

EMS schaal, vervolg**X Vernietigend**

- c Veel gebouwen van klasse C ondergaan gradatie 4 schade. Veel gebouwen van klasse B en enkele van klasse C lijden schade met gradatie 5, evenals de meeste van klasse A.
Veel gebouwen van klasse D lijden schade met gradatie 3; enkele met gradatie 4.
Veel gebouwen van klasse E lijden schade met gradatie 2.
Enkele gebouwen van klasse F lijden schade met gradatie 2.

XI Verwoestend

- c De meeste gebouwen van klasse C lijden schade met gradatie 4. De meeste gebouwen van klasse B en veel van klasse C lijden schade met gradatie 5.
Veel gebouwen van klasse D lijden schade met gradatie 4; enkele met gradatie 5.
Veel gebouwen van klasse E lijden schade met gradatie 3; enkele met gradatie 4.
Veel gebouwen van klasse F lijden schade met gradatie 2; enkele met gradatie 3.

XII Algehele verwoesting

- c Vrijwel alle onder- en bovengrondse bouwconstructies worden verwoest.

De schadebeoordeling van de EMS schaal is voor gebouwtypen A, B en C (die niet speciaal voor aardbevingen zijn ontworpen en die onderwerp zijn van deze studie) samengevat in tabel 1.

Int.	type A					type B					type C				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
I															
II															
III															
IV															
V															
VI															
VII															
VIII															
IX															
X															
XI															
XII															

Tabel A.1 Matrix van waargenomen schade per intensiteitsklasse voor gebouwtypen A, B en C: lichtgrijs: weinig, middelgrijs: veel, donker grijs: meeste. Klassen boven grijsintin: geen schade. Klassen onder grijsintin: Schade is van hogere gradatie

De Nederlandse woningen in metselwerk vallen in gebouwtype B. Uit tabel 1 blijkt, dat er bij lichte schade aan gebouwen van type B een intensiteit van de aardbeving van VI of hoger wordt aangehouden.

B Schade door trillingen, regels en richtlijnen

B.1 Voorkomen van schade door trillingen, regels en richtlijnen

In Nederland bestaat een uitgebreid wettelijke stelsel van bouwregelgeving. Dit stelsel maakt onderdeel uit van de Woningwet en is erop gericht dat gebouwen op een aantal essentiële functies (constructieve veiligheid, energiezuinigheid, brandveiligheid, wering van vocht etc.) bepaalde, wel omschreven minimale prestaties kunnen leveren. De bouwregelgeving geeft dus minimum eisen, waaraan ten minste moet worden voldaan. In de bouwregelgeving worden zowel voor de bestaande gebouwen als voor nieuwbouw eisen gegeven.

Bij de constructieve veiligheid van gebouwen wordt op basis van deze wettelijke regels rekening gehouden met zaken als belasting door het eigen gewicht van gebouwen, belasting door wind, personen, meubilair etc., maar niet met trillingen van buiten een gebouw. Hoewel er ten aanzien van de weerstand tegen bodemtrillingen geen concrete eisen zijn gesteld, blijkt in de praktijk er wel een zeker incasseringsvermogen te zijn, omdat bouwconstructies ook andere soorten belastingen moet kunnen weerstaan. Een belangrijke vraag is dan ook welke bestandheid van gebouwen op basis van de bouwregelgeving mag worden verwacht tegen bodemtrillingen die een gebouw via de fundering belasten. Het is in dit verband van belang dat er buiten het publiekrechtelijke stelsel wel richtlijnen en normen beschikbaar zijn, die dit incasseringsvermogen kwantificeren en die aangeven of schade door trillingen kan optreden bij een zekere trillingsterkte.

B.2 Nederlandse bouwregelgeving

In Nederland is vanwege de Woningwet het Bouwbesluit 2003 van kracht. In het Bouwbesluit is een aantal normen aangewezen, die technische regels geven voor nieuw te bouwen en voor bestaande gebouwen. Trillingen kunnen van invloed zijn op de constructieve veiligheid van gebouwen. Bij de beoordeling van de constructieve veiligheid van gebouwen wordt in het Bouwbesluit onderscheid gemaakt tussen de zogenaamde uiterste grenstoestanden, waarbij de constructie de uiterste draagkracht bereikt en waarmee blijvend verlies van de dragende functie optreedt, en de bruikbaarheidsgrenstoestanden, waarbij het gebruik van de constructie bijvoorbeeld door sterke doorbuigingen of trillingen althans tijdelijk wordt belemmerd.

Het Bouwbesluit geeft aan dat de uiterste grenstoestand van een bouwconstructie moet zijn getoetst onder een aantal belastingscombinaties. Hiertoe moet een bouwconstructie worden geschematiseerd en moeten de materiaaleigenschappen worden ontleend uit in het Bouwbesluit aangewezen NEN-normen. Voor de belastingscombinaties is in de desbetreffende artikelen van het Bouwbesluit voor zowel nieuw te bouwen gebouwen als bestaande gebouwen de norm NEN 6702 aangewezen als bepalingmethode.

Nieuwbouw

Wat betreft het niet-overschrijden van de uiterste grenstoestand eist het Bouwbesluit dat nieuw te bouwen bouwconstructies duurzaam bestand zijn tegen de in NEN 6702 [35] omschreven belastingscombinaties. Die belastingscombinaties vallen uiteen in twee soorten:

1. fundamentele belastingscombinaties, waarbij het overschrijden van uiterste grenstoestand van de bouwconstructie en van bouwdelen niet mag optreden. Onder deze belastingscombinaties zijn begrepen belastingen door het eigen gewicht van de bouwconstructie, de belasting door wind en sneeuw, belastingen door personen, meubilair en aankleding. Fundamentele belastingscombinaties zijn belastingen op

bouwconstructies die tijdens de levensduur van de constructie een relatief hoge kans van optreden hebben en die de bouwconstructie in beginsel zonder schade moet kunnen doorstaan.

2. bijzondere belastingscombinaties, waarbij het overschrijden van de uiterste grenstoestand van de hoofddraagconstructie van de bouwconstructie niet mag optreden. Hieronder vallen bijvoorbeeld ook brand, explosies en stootbelastingen, waarbij schade wordt geaccepteerd, zolang het gebouw niet instort. Bijzondere belastingscombinaties zijn belastingen die gedurende de levensduur van een bouwconstructie een relatief kleine kans van optreden hebben, maar waarvan de effecten bijzonder groot kunnen zijn. Het is in het algemeen niet economisch om bouwconstructies te ontwerpen op het kunnen weerstaan van bijzondere belastingscombinaties zonder enige schade. Bij deze bijzondere belastingscombinaties mogen daarom onderdelen van de bouwconstructie bezwijken, voor zover zij geen deel uitmaken van de hoofddraagconstructie. Het doel hiervan is te voorkomen dat het bezwijken van onderdelen van de bouwconstructie aanleiding geeft tot onevenredig grote schade of tot voortschrijdende instorting.

Bestaande gebouwen

Het Bouwbesluit stelt ook eisen aan bestaande gebouwen. Dit betekent dat voor bestaande gebouwen geverifieerd moet kunnen worden of aan de eisen voor constructieve veiligheid is voldaan. Voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van bestaande gebouwen mogen in de systematiek van het Bouwbesluit lagere waarden voor de fundamentele belastingscombinaties worden gehanteerd. Van bestaande gebouwen worden dus minder hoge prestaties verwacht dan bij nieuwbouw. Dit betekent overigens niet dat gebouwen die gebouwd zijn voordat het huidige Bouwbesluit in werking trad gevoeliger zijn voor schade. Een uitzondering op dit laatste vormen historische gebouwen van meer dan 100 jaar oud.

B.3 De rol van bodemtrillingen bij de constructieve veiligheid

De belasting op een bouwwerk door trillingen valt volgens de systematiek van NEN 6702 [35] onder de fundamentele belastingen. In NEN 6702 zijn bijvoorbeeld regels gegeven voor dynamische belastingen door machines die in gebouwen zijn opgesteld. Bij controle van de verwijzingsstructuur van het Bouwbesluit naar de diverse artikelen van NEN 6702 kan eenvoudig worden nagegaan dat bodemtrillingen geen onderdeel uitmaken van voorgeschreven belastingscombinaties. Dit betekent dat voor het verkrijgen van een bouwvergunning in Nederland geen controle behoeft te worden uitgevoerd op de weerstand tegen bodemtrillingen. Daarnaast is het in de bouwkundige praktijk in Nederland ook geen gebruik om op bodemtrillingen te ontwerpen; van een redelijk deskundig bouwmeester of constructeur wordt daarom in de praktijk ook niet verwacht dat hij hiervoor bij het ontwerp van een gebouw controles uitvoert.

Concluderend kan worden gesteld dat de bouwregelgeving in Nederland geen verplichtingen oplegt wat betreft de weerstand van een gebouw tegen de inwerking van bodemtrillingen. Deze weerstand wordt dus bij het ontwerp van een gebouw niet expliciet als een van belang zijnd aspect beschouwd. De ervaring leert echter dat gebouwen toch een zekere weerstand tegen trillingen bezitten. Dit komt doordat zij wettelijk aan een aantal andere belastingen weerstand moeten bieden, zoals windbelasting, belastingen door meubilair en personen etc., waardoor min of meer vanzelf een bepaalde mate van weerstand tegen bodemtrillingen aanwezig zal zijn. De conclusie is echter dat de mate van weerstand tegen bodemtrillingen niet rechtstreeks uit de bouwregelgeving kan worden afgeleid.

De SBR Richtlijnen

In de praktijk komt het regelmatig voor dat in concrete gevallen moet worden beoordeeld of schade in een gebouw een causale relatie heeft met een bepaalde trillingsbron. De mate van weerstand tegen trillingen kan weliswaar niet uit de bouwregelgeving worden afgeleid, maar er zijn wel een aantal normen en richtlijnen beschikbaar, die uitspraken doen over de weerstand van gebouwen tegen bodemtrillingen. Wat betreft de beoordeling van schade door trillingen is in Nederland met name Richtlijn A van de Stichting Bouwresearch (SBR-richtlijn A [13]) van belang. De Stichting Bouwresearch heeft ook richtlijnen gepubliceerd met het oog op het beoordelen van de hinderlijkheid van trillingen voor personen in gebouwen (SBR-richtlijn B) en voor het beoordelen van de kans op versterking van gevoelige apparatuur of processen door trillingen (SBR-richtlijn C). Hierna worden de SBR-Richtlijnen A en B nader toegelicht.

Hoewel de SBR richtlijnen A en B op zich geen wettelijke status hebben, is hun inhoud wel nauw afgestemd op de Woningwet en het Bouwbesluit respectievelijk op de Wet geluidhinder en de bestaande praktijk met de voormalige Hinderwet (nu de Wet milieubeheer). De SBR Richtlijnen hebben wel juridische relevantie, indien zij in vergunningen als beoordelingsgrondslag worden genoemd of wanneer in vergunningen naar de grenswaarden of streefwaarden uit de richtlijnen wordt verwezen. Met name voor de beoordeling van de hinderlijkheid van trillingen gebeurt dit zeer frequent in vergunningen op basis van de Wet milieubeheer. SBR Richtlijn B is bovendien in de vorm van een bepalingsmethode genoemd in de Besluiten Wet Milieubeheer.

In Duitsland bestaan met de SBR Richtlijnen A en B vergelijkbare documenten (de Duitse normen DIN 4150, deel 2 en 3), waarvoor eveneens geldt dat zij op zich geen wettelijke status hebben. Soms wordt in vergunningen in plaats van naar de SBR Richtlijnen naar de overeenkomstige Duitse norm verwezen. De verschillen tussen deze documenten zijn gering.

De Nederlandse rechtspraak beschouwt het gehinderd zijn van personen door trillingen anders dan schade door trillingen of versterking van gevoelige processen door trillingen. Trillingshinder is gedeeltelijk publiekrecht, aangezien het wordt behandeld in de Wet geluidhinder en de Wet milieubeheer. SBR-Richtlijn B heeft in de jurisprudentie enige status verworven, doordat de Raad van State in diverse beroepsprocedures heeft uitgesproken dat deze richtlijn de stand der techniek vertegenwoordigt en is samengesteld door een commissie, breed samengesteld uit Nederlandse deskundigen en betrokkenen.

Schade door trillingen valt in Nederland buiten het publiekrechtelijke kader en is daarom een privaatrechtelijke kwestie. Bij de beoordeling ervan wordt in de Nederlandse bouwadviespraktijk op ruime schaal de SBR-richtlijn voor schade (SBR-Richtlijn A) gehanteerd, met name bij de beoordeling van schade door verkeerstrillingen en heittrillingen. Bij het voldoen aan de grenswaarden uit SBR Richtlijn A is schade door trillingen niet waarschijnlijk. De kans op schade is dus niet volledig uit te sluiten, maar is bij het voldoen aan de gestelde grenswaarden aanvaardbaar klein. Anderzijds betekent het overschrijden van de grenswaarden van SBR Richtlijn A zeker nog niet dat dan met grote zekerheid schade zal optreden. De SBR Richtlijn vermeldt deze zaken wel, maar koppelt geen gekwantificeerde schadekans aan het al dan niet voldoen aan de grenswaarden.

C Geïnduceerde aardbevingen gerelateerd aan het Groningen-veld

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
19911205	002456.74	Middelstum	53.358	6.657	239503	597465	2.40
19921206	203432.01	Ten-Boer	53.320	6.740	245107	593338	1.26
19921211	130050.05	Slochteren	53.210	6.747	245782	581126	1.37
19930212	114600.76	Noordbroek	53.295	6.868	253716	590669	0.99
19930312	221241.52	Hoogezand	53.160	6.805	249789	575582	0.92
19930326	183421.16	Overschild	53.285	6.795	248848	589495	1.10
19930505	200832.79	Haren	53.177	6.685	241729	577378	1.49
19930514	193942.00	Ten-Post	53.305	6.793	248692	591773	1.05
19930627	025710.06	Stedum	53.315	6.660	239788	592647	0.99
19930627	020851.80	Bedum	53.317	6.650	239118	592839	1.40
19930710	002234.51	Appingedam	53.333	6.837	251518	594928	1.43
19930727	133918.07	Loppersum	53.336	6.808	249625	595169	0.77
19930823	005121.69	Nijenkleooster	53.332	6.848	252297	594851	0.68
19930904	022450.15	Oldenzijl	53.363	6.765	246682	598117	1.35
19930922	173703.82	Middelstum	53.368	6.675	240682	598562	2.01
19930925	002133.46	Slochteren	53.208	6.812	250129	580932	0.89
19931123	123147.68	Slochteren	53.202	6.820	250699	580256	2.16
19931222	020442.79	Ten-Post	53.294	6.753	246050	590462	1.61
19940204	213238.97	Winneweer	53.306	6.777	247581	591790	1.30
19940228	210016.59	Garsthuizen	53.370	6.720	243671	598895	0.61
19940302	103638.08	Steendam	53.279	6.807	249639	588861	1.53
19940306	200231.23	Eenrum	53.323	6.805	249431	593774	0.99
19940314	223209.67	Westerbroek	53.170	6.747	245866	576693	1.11
19940314	104400.00	Zandweer	53.390	6.680	240970	601053	1.55
19940314	093101.18	't-Zandt	53.345	6.808	249605	596207	1.34
19940324	052903.80	Delfzijl	53.316	6.962	259885	593193	0.77
19940404	184611.65	Steendam	53.275	6.828	251094	588389	1.25
19940507	200853.67	Kolham	53.194	6.798	249269	579374	0.95
19940510	013411.97	Hellum	53.226	6.835	251646	583021	0.76
19940605	021450.79	Weiwerd	53.295	6.950	259160	590784	1.01
19940606	040826.16	Achterdiep	53.156	6.823	251023	575217	1.03
19940608	222024.55	Garsthuizen	53.359	6.682	241142	597625	1.45
19940626	174438.88	DeKlip	53.335	6.852	252512	595171	0.97
19940627	205853.88	Uithuizermeeden	53.424	6.770	246885	604892	1.74
19940701	062743.03	Stedum	53.324	6.613	236660	593651	2.73
19940719	081729.67	't-Zandt	53.372	6.743	245220	599164	2.00
19940730	095329.68	Middelstum	53.365	6.577	234143	598134	1.27
19940730	091820.78	Middelstum	53.351	6.628	237609	596616	2.72
19941026	214101.83	Schildwolde	53.246	6.737	245039	585119	1.22
19941213	215046.58	Steendam	53.282	6.815	250188	589187	1.00
19950124	093839.19	Amsweer	53.316	6.897	255555	593044	1.26
19950321	163744.34	Bierum	53.438	6.913	256377	606679	1.07
19950406	080343.45	Loppersum	53.360	6.680	241031	597677	1.99
19950515	095239.35	Weiwerd	53.309	6.945	258791	592390	1.83
19950715	160539.14	Veenhuizen	53.207	6.823	250911	580817	1.03

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
19950721	232440.48	Meedhuizen	53.276	6.963	260095	588689	1.10
19950913	213436.83	Wirdumerdraai	53.335	6.728	244299	594974	1.09
19951102	010700.71	Loppersum	53.352	6.718	243599	596835	1.64
19951104	055043.21	Uithuizerwad	53.470	6.722	243577	609986	1.78
19951120	022054.73	Steendam	53.315	6.762	246561	592809	1.13
19960212	140224.24	Schaaphok	53.256	6.767	247021	586231	0.91
19960229	080734.42	Eppenuizen	53.343	6.640	238401	595721	2.03
19960316	041632.77	Appingedam	53.298	6.848	252374	591031	1.36
19960415	034131.20	Ten-Boer	53.289	6.688	241727	589862	0.86
19960417	190512.18	Holwierde	53.357	6.883	254570	597680	0.93
19960421	213602.32	Warffum	53.376	6.595	235342	599378	0.50
19960425	232220.44	Delfzijl	53.356	6.863	253242	597486	0.88
19960607	083407.01	Garrelsweer	53.309	6.778	247685	592143	1.29
19960809	063847.14	Oterdumerwarven	53.287	6.958	259734	589942	1.64
19961116	033349.87	't-Zandt	53.355	6.755	246033	597251	1.32
19961226	195205.57	Schaaphok	53.261	6.765	246898	586824	-0.17
19970108	012054.49	Westeremden	53.338	6.713	243294	595288	1.50
19970217	072055.23	Zijldijk	53.387	6.752	245743	600826	1.60
19970325	001307.74	Woudbloem	53.252	6.748	245806	585726	-0.18
19970409	222143.97	Noordbroek	53.200	6.865	253708	580187	0.47
19970429	181646.34	Schildwolde	53.249	6.803	249482	585519	1.40
19970504	042909.85	Kropswolde	53.144	6.737	245252	573770	0.79
19970504	024239.74	Weiwerd	53.300	6.930	257813	591386	1.09
19970606	193918.88	Opwierde	53.293	6.875	254165	590455	1.22
19970619	231925.56	't-Zandt	53.364	6.753	245903	598231	1.83
19970723	064436.04	Lageland	53.247	6.753	246150	585195	1.22
19970823	193935.04	Lageland	53.239	6.683	241494	584256	1.63
19970913	213041.02	Wirdum	53.338	6.747	245514	595349	1.08
19971101	225625.87	Zandeweer	53.427	6.705	242558	605164	1.36
19971104	195501.94	Wirdum	53.328	6.793	248643	594278	1.65
19971120	173521.04	Slochteren	53.206	6.792	248796	580756	1.15
19971126	023537.01	Woudbloem	53.254	6.765	246913	586062	0.17
19971203	150103.65	Siddeburen	53.244	6.858	253164	585000	1.31
19971203	144719.71	Meedhuizen	53.279	6.897	255641	588947	1.78
19971223	062132.11	Termunterzijl	53.317	7.015	263437	593327	1.25
19980131	083939.26	Woudbloem	53.237	6.745	245615	584053	0.72
19980205	211149.34	Meedhuizen	53.291	6.935	258169	590317	1.09
19980215	072416.42	't-Zandt	53.356	6.773	247251	597367	2.64
19980329	060640.52	Westeremden	53.345	6.730	244390	596070	1.31
19980419	153235.72	Uithuizen	53.425	6.682	241012	604894	1.62
19980419	080012.08	Zeerijp	53.339	6.723	243958	595412	1.54
19980430	010841.72	Scharmer	53.197	6.707	243138	579574	0.85
19980518	220342.46	Oldenzijl	53.404	6.732	244378	602655	1.34
19980530	094315.14	Slochteren	53.204	6.777	247800	580422	0.91
19980814	192516.89	Froombosch	53.192	6.803	249607	579177	1.12
19980824	042858.00	Overschild	53.298	6.810	249820	590961	2.44
19981004	032832.97	Zeerijp	53.353	6.748	245593	597001	0.95
19981212	075139.52	Oldenzijl	53.392	6.698	242186	601261	1.95
19981226	234802.19	Slochteren	53.215	6.830	251338	581716	1.60
19990113	193637.03	Zeerijp	53.359	6.777	247466	597724	2.09

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
19990131	045300.59	Siddeburen	53.255	6.825	250915	586215	0.44
19990306	055639.96	Wirdum	53.325	6.778	247651	593906	1.60
19990421	105956.44	Appingedam	53.312	6.840	251788	592577	1.38
19990508	204018.93	Stedum	53.325	6.700	242432	593845	1.56
19990521	000938.86	Sappemeer	53.165	6.815	250447	576133	0.68
19990810	232418.31	Garsthuizen	53.382	6.727	244091	600201	1.40
19990811	011800.96	Westeremden	53.346	6.702	242500	596202	0.71
19991208	053928.47	Achterdiep	53.179	6.802	249524	577729	0.25
19991209	095212.96	Achterdiep	53.184	6.797	249179	578242	1.01
19991209	093800.05	Schildwolde	53.247	6.803	249487	585241	1.12
19991210	061332.01	Achterdiep	53.175	6.792	248865	577215	1.40
19991220	122929.69	Westeremden	53.352	6.710	243042	596898	1.47
19991221	045237.74	Kolham	53.190	6.765	247049	578905	0.98
19991224	235241.12	Delfzijl	53.320	6.947	258876	593616	1.81
20000212	194810.61	Appingedam	53.321	6.822	250546	593554	1.67
20000319	161336.08	Westeremden	53.343	6.698	242285	595827	1.56
20000408	211317.80	Godlinze	53.370	6.845	251990	599056	1.12
20000408	110728.03	Engelbert	53.205	6.632	238111	580375	1.17
20000414	230747.79	Ten-Boer	53.308	6.772	247243	592006	1.21
20000516	011114.73	Garsthuizen	53.381	6.710	242985	600032	1.89
20000611	041220.13	Loppersum	53.348	6.763	246602	596483	2.03
20000612	154823.01	Loppersum	53.340	6.742	245177	595546	2.55
20000615	014224.75	Siddeburen	53.280	6.847	252303	589063	2.45
20000706	230956.72	Loppersum	53.340	6.752	245843	595559	1.19
20000716	013412.00	't-Zandt	53.367	6.782	247783	598565	1.54
20001226	163357.64	Meedhuizen	53.294	6.910	256494	590708	1.38
20010318	041420.68	Lageland	53.243	6.692	242042	584747	1.61
20010621	035049.03	Overschild	53.295	6.800	249158	590670	1.73
20011010	140657.24	Schaaphok	53.240	6.763	246833	584429	0.75
20011010	140643.35	Schaaphok	53.239	6.763	246834	584355	0.99
20011204	223337.96	Woudbloem	53.210	6.743	245560	581085	1.02
20011204	190837.83	Woudbloem	53.204	6.785	248355	580507	-0.01
20011204	190831.06	Woudbloem	53.204	6.785	248355	580507	0.19
20011211	151717.62	Slochteren	53.217	6.788	248551	581902	0.71
20011225	232809.44	Noordzee	53.487	6.718	243320	611874	1.30
20020205	103039.74	Stedum	53.319	6.717	243555	593197	2.21
20020227	035214.03	Appingedam	53.337	6.825	250733	595339	1.14
20020510	103348.95	Bierum	53.378	6.857	252748	599980	1.67
20020718	053116.83	Froombosch	53.188	6.783	248279	578687	1.64
20020829	211322.74	Luddeweer	53.247	6.747	245705	585205	0.01
20021217	002318.74	Tjuchem	53.291	6.860	253168	590249	0.88
20021218	203109.15	Spitsbergen	53.175	6.847	252540	577380	0.77
20030101	191615.30	Loppersum	53.338	6.743	245293	595289	0.96
20030118	181243.32	Overschild	53.287	6.770	247176	589723	1.05
20030123	074616.66	Winneweer	53.307	6.752	245912	591906	1.65
20030130	012730.24	Leermens	53.342	6.793	248613	595817	1.51
20030131	152047.78	Denemarken	53.232	6.782	248073	583618	0.32
20030206	192524.91	De-Paauwen	53.259	6.768	247124	586623	0.32
20030211	192949.56	Zeerijp	53.353	6.773	247258	596996	1.35
20030212	062220.02	De-Paauwen	53.262	6.812	250009	586995	0.80

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
20030228	215418.19	Westeremden	53.355	6.730	244369	597201	0.70
20030303	205121.89	Middelstum	53.360	6.662	239809	597730	2.17
20030306	201518.67	Hoogezand	53.141	6.753	246374	573419	0.94
20030309	053126.70	Kantens	53.372	6.640	238344	598984	1.06
		Emmapolder(Eemsha					
20030323	160003.03	ven)	53.457	6.783	247698	608673	1.48
20030329	210901.44	Harkstede	53.238	6.682	241386	584087	0.42
20030401	002552.09	Oldenklooster	53.364	6.852	252448	598342	0.35
20030402	201948.74	Loppersum	53.340	6.718	243623	595517	1.90
20030405	164948.33	Engelbert	53.209	6.630	237991	580874	0.33
20030406	230204.37	Ruiten	53.206	6.763	246904	580683	0.71
20030406	005727.90	Ruiten	53.205	6.750	246017	580499	1.03
20030406	000750.70	Overschild	53.272	6.795	248877	588012	0.07
20030416	162042.53	Overschild	53.281	6.775	247522	589079	0.68
20030418	235955.00	Schaaphok	53.238	6.753	246168	584250	0.00
20030420	001939.19	Schaaphok	53.247	6.750	245928	585172	0.10
20030428	215611.33	Ten-Boer	53.284	6.727	244294	589260	1.00
20030429	025504.92	Ten-Boer	53.284	6.730	244516	589283	1.28
20030514	222346.52	Siddeburen	53.257	6.847	252357	586411	0.77
20030514	205215.91	Siddeburen	53.254	6.865	253587	586121	0.76
20030531	231225.73	Siddeburen	53.247	6.875	254270	585374	0.77
20030603	161538.91	Stedum	53.337	6.683	241299	595104	1.45
20030606	142716.47	Harkstede	53.225	6.682	241411	582696	0.68
20030608	081416.55	Woltersum	53.271	6.737	244988	587863	1.47
20030608	053047.24	Froombosch	53.192	6.788	248605	579139	1.02
20030807	105639.85	Zeerijp	53.345	6.748	245611	596093	1.30
20030807	082421.12	Zeerijp	53.350	6.758	246266	596643	1.66
20030922	175011.50	Uithuizen	53.395	6.688	241514	601638	2.36
20030927	135754.15	Westeremden	53.348	6.697	242164	596381	2.71
20031024	015241.16	Hoeksmeer	53.295	6.792	248604	590622	2.95
20031026	091700.14	Hoeksmeer	53.304	6.788	248362	591619	1.22
20031029	143009.26	Froombosch	53.192	6.783	248271	579114	0.98
20031110	024055.01	Westeremden	53.349	6.710	243049	596546	1.43
20031110	002238.04	Stedum	53.335	6.702	242524	594923	3.00
20031116	200411.48	Stedum	53.344	6.702	242505	595924	2.67
20031226	100958.93	Garrelsw eer	53.320	6.802	249216	593380	1.41
20031229	130959.31	Delfzijl	53.343	6.938	258266	596144	1.47
20040112	010547.88	Kolham	53.189	6.745	245716	578732	1.58
20040124	135344.54	Woltersum	53.271	6.720	243876	587861	0.95
20040130	114740.99	Appingedam	53.314	6.868	253671	592821	1.17
20040308	014116.41	Meedhuizen	53.293	6.895	255498	590483	0.44
20040321	170544.58	Wagenborgen	53.255	6.918	257142	586344	1.44
20040326	023245.52	Steendam	53.273	6.862	253321	588231	0.48
20040430	221243.89	Lageland	53.230	6.712	243404	583270	0.51
20040610	011326.72	Doodstil	53.391	6.663	239860	601089	2.15
20040727	224945.94	Appingedam	53.343	6.875	254048	596111	1.16
20040821	010632.82	Kleinemeer	53.164	6.793	249000	575993	1.80
20040918	033312.38	Uithuizen	53.416	6.703	242470	603938	1.18
20040922	124433.00	Winneweer	53.311	6.743	245348	592377	1.54
20041030	114052.88	Zeerijp	53.356	6.778	247583	597411	1.36

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
20041113	121557.32	Overschild	53.291	6.802	249280	590134	1.17
20041124	181857.95	Wittewierum	53.289	6.753	246061	589886	1.86
20041125	142554.43	Froombosch	53.195	6.772	247485	579414	0.65
20041126	065801.52	Winneweer	53.314	6.737	244897	592685	1.61
20041216	211430.20	Engelbert	53.231	6.652	239396	583309	0.78
20050109	235938.53	Wirdum	53.323	6.797	248875	593781	1.69
20050117	000055.58	Wirdum	53.317	6.808	249666	593128	1.10
20050130	023134.04	Ten Boer	53.277	6.692	241974	588475	1.03
20050208	132033.86	Bedum	53.316	6.638	238342	592733	2.25
20050216	104617.86	Zijldijk	53.404	6.793	248478	602752	1.26
20050218	220552.17	Schaaphok	53.239	6.727	244386	584327	1.63
20050218	184925.65	Schaaphok	53.231	6.750	245961	583467	0.54
20050218	125546.57	Westeremden	53.341	6.735	244731	595612	1.34
20050220	060324.65	Hoogezand	53.176	6.795	249084	577405	0.02
20050225	034609.86	Appingedam	53.336	6.812	249848	595154	1.58
20050301	163159.41	Schaapbulten	53.326	6.922	257197	594229	1.23
20050308	230058.53	Wagenborgen	53.262	6.915	256904	587062	0.86
20050310	020439.78	Oosterwijtwerd	53.342	6.810	249722	595894	1.95
20050321	105833.93	De Paauwen	53.257	6.767	247019	586343	0.93
20050402	232108.74	Overschild	53.270	6.798	249104	587793	1.21
20050418	191116.59	Overschild	53.264	6.803	249450	587151	1.03
20050421	204921.64	Tjuchem	53.291	6.885	254836	590247	0.90
20050422	001449.67	Appingedam	53.335	6.858	252958	595106	0.82
20050430	192802.72	Vierburen	53.360	6.700	242362	597683	0.97
20050517	085014.19	Siddeburen	53.232	6.893	255528	583731	1.00
20050525	213346.22	Noordbroek	53.194	6.850	252721	579425	1.06
20050530	153645.87	Westeremden	53.343	6.710	243063	595804	2.29
20050622	160202.05	Oosterwijtwerd	53.330	6.818	250305	594496	1.51
20050709	170137.49	Lageland	53.238	6.685	241607	584183	1.11
20050717	180707.83	Winneweer	53.319	6.747	245553	593254	1.82
20050725	032158.98	Harkstede	53.212	6.712	243441	581267	0.82
20050805	192302.02	Sappemeer	53.170	6.810	250100	576775	2.22
20050910	020511.67	Garrelsw eer	53.316	6.772	247225	592952	1.23
20051005	091602.95	Eppenh uizen	53.331	6.642	238535	594406	1.70
20051023	170338.08	Diddingehuizen	53.366	6.675	240685	598358	1.88
20051111	170229.54	Harkstede	53.224	6.697	242414	582639	1.36
20060102	120045.67	Harkstede	53.236	6.695	242279	583917	1.07
20060114	222954.76	Hoogezand	53.177	6.767	247189	577424	0.33
20060118	220815.79	Overschild	53.274	6.773	247427	588243	1.60
20060118	081246.65	Wittewierum	53.290	6.765	246836	590068	1.49
20060120	202250.10	Loppersum	53.336	6.740	245073	595137	1.35
20060123	111739.96	Lageland	53.237	6.697	242389	584012	1.91
20060128	030042.14	Spijk	53.380	6.818	250193	600133	1.13
20060211	190135.92	Siddeburen	53.256	6.847	252358	586375	1.26
20060212	143638.63	Hoeksmeer	53.297	6.795	248822	590830	1.48
20060224	045030.03	Wirdumerdraai	53.312	6.788	248346	592453	1.33
20060304	043233.96	Kropswolde	53.144	6.742	245588	573702	1.77
20060321	145033.70	Ten-Post	53.302	6.755	246145	591354	2.37
20060323	031223.91	Overschild	53.284	6.778	247740	589325	2.24
20060405	014111.29	Delfzijl	53.344	6.890	255045	596187	1.44

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
20060412	052029.14	Steendam	53.270	6.837	251660	587863	1.19
20060413	073851.89	Garmerwolde	53.240	6.647	239044	584342	1.53
20060416	184454.42	Garrelsw eer	53.313	6.770	247121	592578	1.12
20060416	135152.50	Garrelsw eer	53.311	6.783	248015	592336	1.92
20060419	173915.34	Stedum	53.336	6.685	241410	595087	1.59
20060422	170313.66	Warffum	53.382	6.598	235552	600105	0.36
20060422	034154.26	Loppersum	53.325	6.752	245874	593890	1.48
20060423	011818.28	Delfzijl	53.338	6.883	254614	595566	0.88
20060502	165201.31	Wirdumerdraai	53.314	6.797	248896	592706	1.03
20060503	191637.31	Wittewierum	53.290	6.767	246948	590014	1.23
20060507	161132.06	Westeremden	53.345	6.717	243501	596109	1.35
20060522	202340.85	Lageland	53.241	6.698	242492	584477	0.87
20060606	031734.01	Schildwolde	53.238	6.810	249952	584267	1.35
20060608	233106.38	Lageland	53.240	6.690	241937	584356	0.75
20060616	210646.76	Overschild	53.293	6.770	247165	590316	1.61
20060617	131621.58	Appingedam	53.330	6.852	252525	594540	1.44
20060617	024308.64	Garrelsw eer	53.297	6.768	247044	590814	1.18
20060623	223543.14	Garrelsw eer	53.317	6.763	246669	593014	1.68
20060624	164219.50	Oosterwij twerd	53.341	6.823	250613	595745	1.25
20060712	225623.84	Appingedam	53.309	6.868	253683	592263	1.30
20060712	001356.33	Godlinze	53.369	6.813	249884	598922	0.86
20060716	081039.15	Appingedam	53.303	6.867	253585	591593	1.48
20060808	094923.26	Westeremden	53.350	6.707	242826	596579	2.53
20060808	050400.09	Westeremden	53.351	6.692	241825	596728	3.46
20060811	062123.03	Harkstede	53.219	6.672	240755	582016	1.11
20060826	224118.49	Westeremden	53.346	6.718	243610	596240	2.31
20060927	233044.28	Garsthuizen	53.368	6.687	241459	598557	1.62
20061006	001028.98	Hoeksmeer	53.302	6.790	248477	591418	1.56
20061023	133805.84	Garsthuizen	53.372	6.738	244887	599158	2.27
20061025	094541.93	Delfzijl	53.326	6.923	257308	594195	1.38
20061026	135937.27	Zandewe er	53.389	6.702	242413	600968	1.36
20061105	150025.43	Schaaphok	53.273	6.792	248652	588137	1.18
20070110	183628.54	Delfzijl	53.341	6.883	254609	595807	1.46
20070118	222944.29	Overschild	53.274	6.767	246983	588216	0.89
20070126	002009.10	Zeerijp	53.352	6.755	246039	596898	2.33
20070131	010335.87	Zandewe er	53.368	6.672	240459	598595	1.19
20070204	044735.16	Middelstum	53.346	6.658	239615	596168	0.64
20070216	111409.06	Harkstede	53.229	6.702	242739	583110	1.46
20070217	195801.45	Krewerd	53.351	6.857	252810	596939	0.89
20070217	022108.02	Harkstede	53.228	6.683	241516	583013	0.92
20070217	014114.01	Harkstede	53.227	6.703	242853	582981	2.58
20070303	064333.49	Harkstede	53.235	6.708	243170	583878	1.09
20070311	010814.36	Wirdum	53.326	6.780	247760	594019	1.12
20070321	230436.36	Schaaphok	53.240	6.722	244051	584414	1.21
20070330	162505.67	Lageland	53.236	6.707	243058	583950	1.24
20070401	154237.31	Harkstede	53.230	6.690	241958	583207	0.66
20070413	145728.11	Woudbloem	53.231	6.745	245628	583405	1.33
20070514	121924.02	Stedum	53.331	6.702	242531	594533	1.99
20070519	053322.59	Westeind	53.163	6.828	251342	575984	0.44
20070609	200733.63	Zeerijp	53.353	6.747	245482	597018	2.07

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
20070610	172740.31	Bedum	53.326	6.613	236656	593873	1.70
20070611	021812.25	Bedum	53.321	6.653	239331	593344	1.05
20070623	020146.32	Stedum	53.317	6.703	242670	592995	1.23
20070815	054924.24	Garsthuizen	53.369	6.732	244450	598779	1.46
20070917	050120.88	Leermens	53.344	6.800	249052	596122	1.55
20070918	061633.81	Schildwolde	53.236	6.800	249288	584068	0.88
20070928	052640.03	Fraamklap	53.338	6.623	237300	595182	1.22
20070930	141735.63	Froombosch	53.194	6.788	248600	579399	2.07
20071027	015751.45	Loppersum	53.333	6.748	245635	594776	1.99
20071113	102605.83	Overschild	53.293	6.823	250719	590460	1.67
20080107	215316.80	Garmerwolde	53.243	6.658	239818	584652	1.15
20080124	192101.70	Bedum	53.196	6.773	247593	579602	1.52
20080212	024849.96	Garrelsw eer	53.311	6.783	248014	592372	0.91
20080219	154451.34	Froombosch	53.183	6.762	246842	578122	0.92
20080319	170210.02	Onderdendam	53.348	6.565	233397	596248	1.16
20080329	165722.03	Steendam	53.292	6.842	251943	590373	1.42
20080331	070602.50	Westeremden	53.346	6.700	242389	596218	1.23
20080407	043222.73	Meedhuizen	53.294	6.897	255605	590689	1.22
20080411	225126.21	Tjuchem	53.283	6.875	254186	589416	1.12
20080428	024701.09	Siddeburen	53.259	6.860	253242	586652	1.30
20080505	195608.87	Onderdendam	53.333	6.590	235090	594551	1.01
20080509	213303.07	Ten-Post	53.286	6.725	244179	589499	1.32
20080510	232035.31	Loppersum	53.327	6.728	244317	594046	1.22
20080518	132346.14	Garsthuizen	53.375	6.728	244215	599480	2.17
20080519	150729.55	Loppersum	53.325	6.740	245098	593857	1.85
20080530	144808.51	Usquert	53.408	6.633	237831	603001	1.33
20080601	110058.77	Garrelsw eer	53.308	6.782	247910	592037	1.32
20080610	205105.76	Garrelsw eer	53.310	6.785	248127	592263	0.86
20080622	210615.53	Siddeburen	53.248	6.842	252043	585422	0.91
20080710	065733.90	Holwierde	53.351	6.882	254475	596918	2.46
20080723	200512.97	Engelbert	53.212	6.663	240213	581209	1.24
20080823	194907.37	Loppersum	53.330	6.725	244088	594413	0.94
20080914	203212.48	Westerwijtwerd	53.331	6.622	237203	594383	1.12
20080920	084558.68	Lageland	53.238	6.707	243054	584173	1.33
20080929	102044.81	Warffum	53.379	6.602	235780	599738	1.83
20081026	024850.06	Schildwolde	53.243	6.805	249606	584873	1.07
20081029	163621.82	Stedum	53.330	6.710	243089	594376	1.38
20081030	055429.06	Westeremden	53.341	6.722	243843	595633	3.23
20081107	164001.28	Garsthuizen	53.381	6.735	244647	600100	2.16
20081210	032238.90	Tetjehorn	53.280	6.828	251083	588946	1.09
20081215	204117.08	Onderdendam	53.336	6.600	235750	594952	1.54
20081223	151659.84	Oldenzijl	53.403	6.710	242940	602480	1.43
20090101	165446.91	Loppersum	53.366	6.772	247118	598533	1.73
20090101	093546.69	Delfzijl	53.330	6.902	255856	594609	1.22
20090108	011701.76	Westeremden	53.348	6.717	243496	596387	1.66
20090109	201658.44	Westeremden	53.340	6.713	243289	595549	1.88
20090115	124113.36	Marsum	53.339	6.872	253836	595606	1.0
20090117	060503.64	Sappemeer	53.170	6.795	249097	576755	1.1
20090201	042324.16	Westeremden	53.360	6.740	245024	597769	2.2
20090203	065352.07	Appingedam	53.315	6.875	254114	592922	1.2

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	X_RD	Y_RD	MAG.
20090204	122350.02	Garsthuizen	53,376	6,742	245101	599571	1,7
20090205	115612.95	Delfzijl	53,328	6,923	257304	594417	1,1
20090216	092455.58	Overschild	53,298	6,800	249153	590930	1,4
20090313	143332.82	Delfzijl	53,350	6,902	255809	596853	1,2
20090327	025128.16	Hoeksmeer	53,308	6,810	249797	592092	1,0
20090414	210525.96	Huizinge	53,342	6,678	240955	595673	2,6
20090414	233502.87	't-Zandt	53,359	6,780	247689	597672	0,9
20090416	171215.91	Appingedam	53,313	6,845	252118	592732	2,6
20090420	144251.49	Wirdumerpolder	53,296	6,808	249712	590774	1,5
20090501	141301.73	Harkstede	53,222	6,720	243976	582428	1,2
20090504	113116.56	't-Zand	53,356	6,782	247805	597433	1,8
20090507	012024.54	't-Zand	53,379	6,778	247535	599932	1,4
20090507	034212.64	Winneweer	53,316	6,728	244339	592841	1,6
20090507	131442.56	Lageland	53,253	6,723	244135	585862	1,2
20090508	052311.95	Zeerijp	53,354	6,762	246479	597129	3,0
20090508	155422.87	Kropswolde	53,142	6,715	243807	573465	0,9
20090526	000759.58	Meedhuizen	53,302	6,930	257809	591553	1,3
20090526	110036.74	Meedhuizen	53,314	6,928	257669	592904	1,3
20090601	023225.49	Siddeburen	53,230	6,878	254530	583525	0,9
20090615	153250.85	Overschild	53,287	6,813	250067	589705	1,0
20090705	104246.37	Winneweer	53,308	6,755	246133	591966	1,8
20090705	185242.27	Schildwolde	53,226	6,835	251647	582965	1,2
20090722	000000.11	Wittewierum	53,290	6,765	246836	590068	1,7
20090819	014938.13	Middelbert	53,232	6,632	238060	583360	0,7
20090914	003251.39	Steendam	53,278	6,845	252198	588782	1,3
20090929	022310.19	Eekwerderdraai	53,314	6,802	249229	592731	1,6

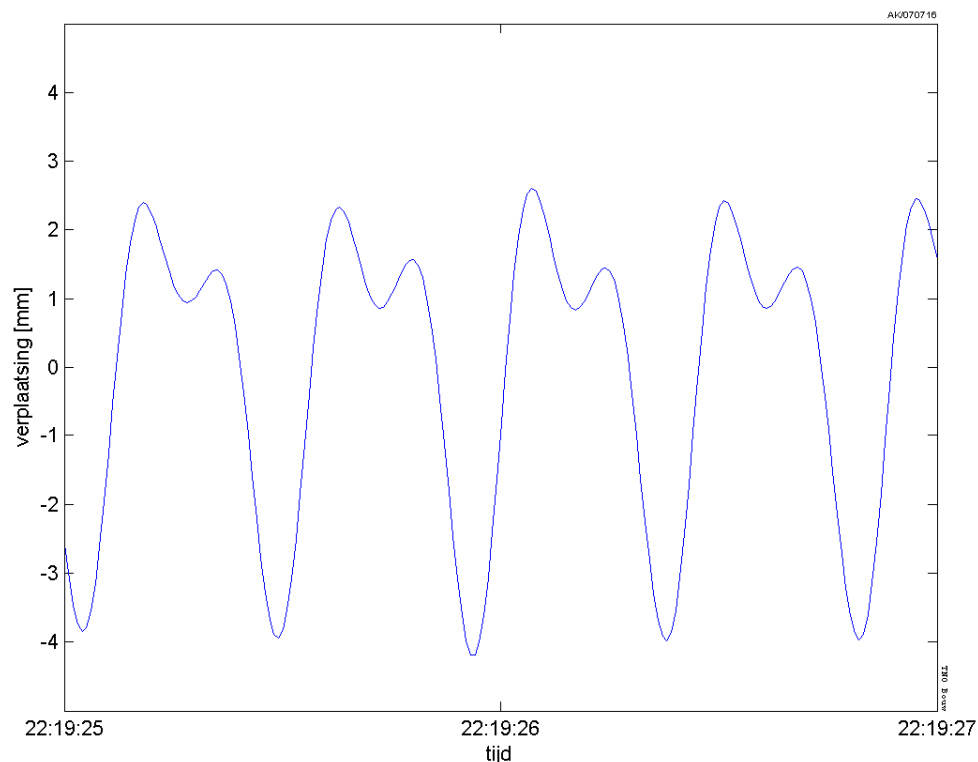
D Fysica trillingen

Een trilling is het heen en weer bewegen van een object, zoals een kind op een schommel. De kenmerkende grootheden hiervan zijn de uitwijking en het aantal keren per tijdseenheid dat de beweging optreedt.

De uitwijking ten opzichte van de rusttoestand wordt amplitude genoemd. Het aantal keren dat de beweging per seconde optreedt, de frequentie (uitgedrukt in Hertz).

Bekende trillingen zijn, naast de schommel, bijvoorbeeld geluid (trillende lucht, leidend tot een trillend trommelflies), aardbevingen, geschud in een rijdende trein en trillende gebouwen vanwege een passerende trein.

Een trilling kan beschreven worden als een samenstelling van zuiver sinusvormige trillingen, elk met een eigen frequentie. Een triangel bijvoorbeeld veroorzaakt een trilling in de lucht waarin behalve de grondtoon (een zuivere sinus) ook boventonen zitten (sinussen met hogere frequenties).



Figuur D.1 een trilling, gemeten op een vloer, veroorzaakt door springende mensen; de trilling heeft als voornaamste onderdelen een sinus van 2,2 Hz en een (kleinere) sinus van 4,4 Hz

Een trilling kan worden beschreven in het “tijddomein” en in het “frequentiedomein”.

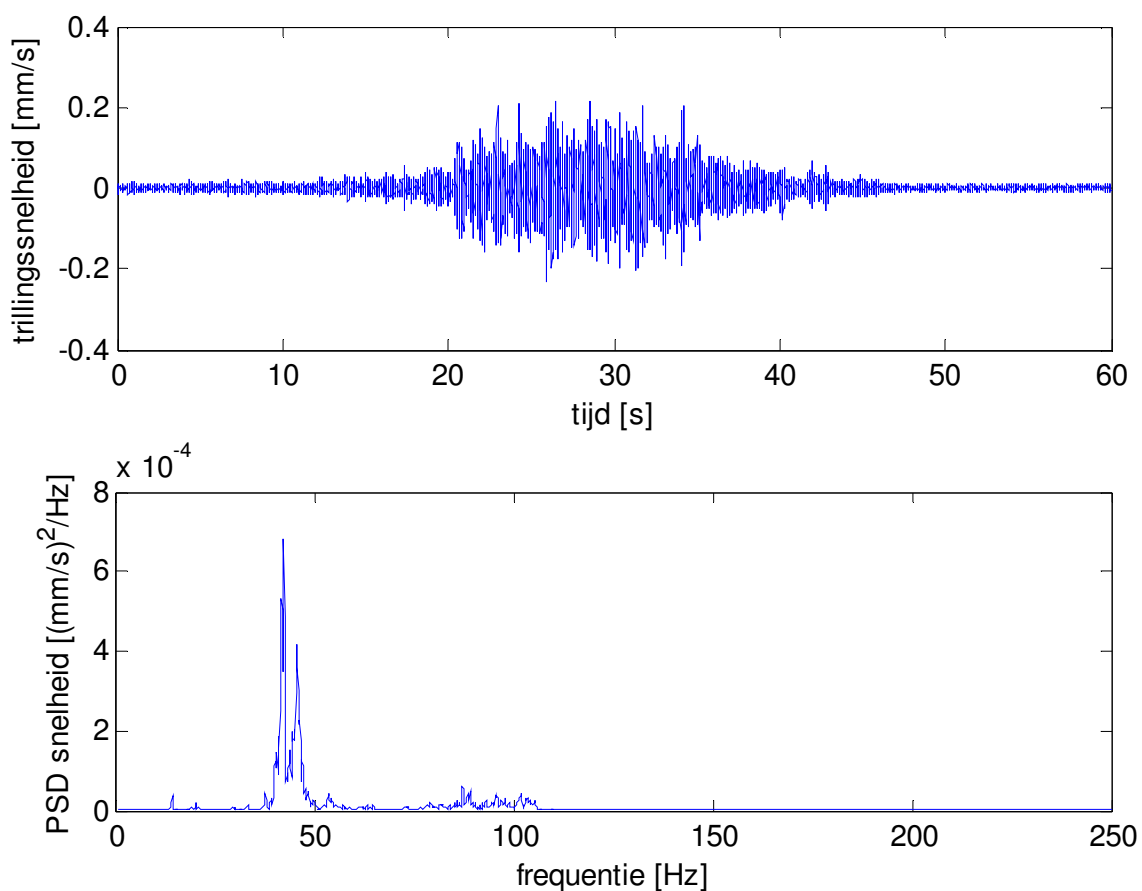
Het tijddomein vertelt hoe het object van moment tot moment zich verplaatst. Het beantwoordt vragen als:

- hoe lang duurt de trilling?
- wat is de uitwijking gemiddeld?

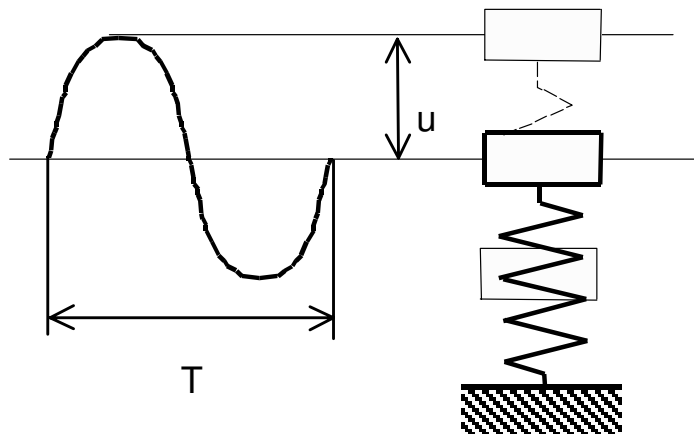
- wat is de maximale uitwijking?

Het frequentiedomein vertelt welke sinusvormige trillingen de totale trilling opbouwen. Populair gezegd: welke frequenties met welke sterkte in de trilling zitten. Omdat de manier waarop objecten reageren op een trilling sterk afhangt van de frequentie(s) van een trilling, kan het helpen vragen te beantwoorden zoals:

- wat is de oorzaak van de trillingen?
- zijn de trillingen bruikbaar c.q. schadelijk c.q. voelbaar?
- hoe zijn de trillingen te bestrijden?



Figuur D.2 trillingen vanwege een treinpassage, volgens een sensor aan een gebouw in de omgeving; de bovenste figuur presenteert de trillingen in het tijddomein, de onderste figuur toot uit welke frequenties de trillingen voornamelijk bestaan (in dit geval sinussen tussen de 40 en de 50 Hz)



Figuur D.3 de trillingen van een massa op een veer is een perfecte sinus

Een object in trilling ondergaat *versnellingen* en vertragingen tijdens de heen en weergaande beweging. Tijdens de reis heeft het object een steeds wisselde *snelheid*. Uitwijking, versnelling en snelheid zijn aan elkaar gerelateerd: kent men van een trilling een van de drie, dan kent men alle drie. Een trilling kan dus op verschillende manieren worden gemeten en weergegeven: als uitwijking (u in μm), als snelheid (v in mm/s) of als versnelling (a in m/s^2). De betrekking tussen de verschillende grootheden, waarin een trilling kan worden gedefinieerd, is voor een zuiver sinusvormige trilling als volgt:

- Verplaatsing

$$u(t) = u \sin \omega t$$

$$u_{\max} = u$$
- Snelheid = du/dt

$$v(t) = u \omega \cos \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$v_{\max} = 2\pi f u$$
- Versnelling = dv/dt

$$a(t) = u \omega^2 \sin \omega t$$

$$a_{\max} = 4\pi^2 f^2 u$$

Voor een algemene trilling geldt dat met differentiëren en integreren uitwijking, snelheid en versnelling in elkaar zijn om te rekenen.

Het lijkt het meest logisch om een trilling te beschrijven als uitwijking. Toch wordt dit zelden gedaan. Dat heeft twee redenen. Enerzijds blijkt het eenvoudiger te zijn om sensoren te maken die versnellingen registreren, anderzijds blijken veel effecten (zoals hinder, schade-mechanismen en geluidafstraling) het makkelijkst te relateren te zijn aan trillingssnelheid. In de praktijk worden trillingen dus vaak gemeten als versnelling en vervolgens geïntegreerd naar snelheid voor de beoordeling.

Trillingen zijn voelbaar: het kind schommelt niet voor niets. Het voelbare trillingsgebied voor de mens strekt zich uit tot circa 80 Hz. Een kind op een schommel ervaart de verplaatsing op de momenten van de grootste uitwijking, wanneer het hoog boven de begane grond is verheven; de snelheid wordt ervaren wanneer het laagste punt wordt gepasseerd; de versnelling voelt het kind in de buik en is het sterkst op de hoogste punten.

De laagste frequentie van voelbare trillingen in woningen, veroorzaakt door treinverkeer, bedraagt ongeveer 2 Hz. Vanaf 4 Hz kan trillende lucht door het oor worden waargenomen, als geluid.

Trillingen die tijdens een treinpassage in het spoor ontstaan planten zich door de bodem voort naar de omgeving. Gebouwen gaan meetrillen, vloeren slingeren op en de lucht in de kamers gaat meetrillen (hoorbaar als laagfrequent geluid). In de voortplanting naar de omgeving toe verzwakken de trillingen door zogenaamde geometrische uitbreiding (energie wordt over een steeds groter gebied verdeeld, in essentie verdwijnt trillingsenergie naar de diepte) en door demping van het grondmateriaal. De gebouwfundering, vooral van grote gebouwen, verzwakt de trillingen verder, maar de vloeren in het gebouw versterken de trillingen weer omdat ze opslingeren. Het gebouw verder gaat ook 'zwaaien' waardoor vooral in hogere gebouwen de trillingen ook worden versterkt.