

Rapport

Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen

Methodologie en case studies ter duiding van
de oorzaken

TU Delft

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

Rapport nummer: CM-2018-01

Projectcode: C31H16

Auteurs:

Ir. P.C. van Staalduinen, Dr.ir. K.C. Terwel, Prof.dr.ir. J.G. Rots

Datum:

11 juli 2018

Leeswijzer

Voor u ligt een rapport van TU Delft dat is opgesteld in opdracht van de Nationaal Coördinator Groningen. Het rapport doet verslag van een onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in de provincie Groningen. Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een aantal case studies.

In het onderzoek is ingegaan op veel verschillende aspecten die van belang zijn bij het ontstaan en bij het beoordelen van bouwkundige schades. Er is voor gekozen al die informatie in dit rapport te presenteren en dat heeft geleid tot een omvangrijk rapport.

Alle hoofdstukken zijn zo opgezet, dat zij zelfstandig leesbaar zijn. Het gevolg hiervan is dat uitleg of verklaring soms op meer plaatsen in het rapport is terug te vinden.

Snel een beeld en overzicht

In hoofdstuk 1 is een overzicht gegeven van het uitgevoerde onderzoek, van de voornaamste conclusies en van de belangrijkste aanbevelingen.

Onderzoek: aanleiding, achtergronden, opzet, onderzoeksmethode, onderzoeksvragen

Zie hiervoor de hoofdstukken 2, 3 en 4.

Schade aan gebouwen: gehanteerde beoordelingsmethodologie, oorzaken van bouwkundige schade, achtergrondinformatie

In de hoofdstukken 5 tot en met 13 is ingegaan op bouwkundige schade, diverse aspecten die van belang zijn voor het ontstaan van bouwkundige schade en de criteria die zijn gehanteerd bij de beoordeling.

Resultaten van de case studies

Hoofdstuk 14.

Conclusies en aanbevelingen

Hoofdstuk 15.

Bijdragen aan dit onderzoek

Aan dit onderzoeksresultaat is inhoudelijk bijgedragen door de volgende personen:

Ir. H. Borsje, TNO

Ing. H.J. Everts, TU Delft en Everts Geotechniek

Dr.ir. H.R. Schipper, TU Delft

Prof.ir. S.N.M. Wijte, Adviesbureau Hageman en TU Eindhoven

Prof.dr.ir. R.F. Hanssen, TU Delft

Specifieke inhoudelijke bijdragen

De analyses in hoofdstuk 11 zijn uitgevoerd door M. Longo en M. Sousamli.

Review

Prof.ir. J. Maertens, oud-hoogleraar grondmechanica en funderingstechnieken

Prof.dr.ir. J. Blaauwendraad, oud-hoogleraar constructiemechanica

Medewerking in andere vorm

Het onderzoeksteam van de TU Delft is de eigenaren en bewoners van panden die in deze studie onderwerp van onderzoek zijn geweest zeer erkentelijk voor hun toestemming en voor hun medewerking aan dit onderzoek. Het onderzoeksteam wil hen daarvoor hartelijk bedanken.

Tijdens het onderzoek heeft het onderzoeksteam talloze malen met de begeleidingsgroep en de klankbordgroep, ingesteld door NCG, van gedachten gewisseld over de opzet van het onderzoek, de uitvoering en de duiding van de resultaten. Die wisselwerking heeft mede het onderzoeksrapport gevormd. Het onderzoeksteam bedankt hen en de medewerkers van de NCG die het project hebben begeleid.

Tevens dankt het onderzoeksteam allen die op enigerlei een bijdrage hebben geleverd aan het ter beschikking stellen van gegevens, bij de gegevensvergaring en aan de analyses van de cases.

Inhoudsopgave

1.	Samenvatting	5
2.	Inleiding	12
3.	Hoofdvraag en doelstelling	15
4.	Opzet van het onderzoek, onderzoeksmethodiek	20
5.	Classificatie van schadeoorzaken in gebouwen	29
6.	Methodologie schadeonderzoek bij meervoudige oorzaken	36
7.	Kwantificering van de trillingen als gevolg van historische bevingen	51
8.	Kwantificering van langzame bodembewegingen	68
9.	Kwantificering van wijzigingen in de waterhuishouding	78
10.	Effecten van trillingen door bevingen	85
11.	Simulatieberekeningen naar de effecten van trillingen	99
12.	Effecten van langzame bodembewegingen	127
13.	Falsificatie, verificatie en toerekening van schadeoorzaken	144
14.	Onderzoek aan schadeobjecten	152
15.	Beantwoording onderzoeksvragen, conclusies en aanbevelingen	194
	Referenties	210

BIJLAGEN A - H

De referenties zijn per hoofdstuk benoemd. Sommige referenties kunnen daardoor vaker in de referentielijst voorkomen.

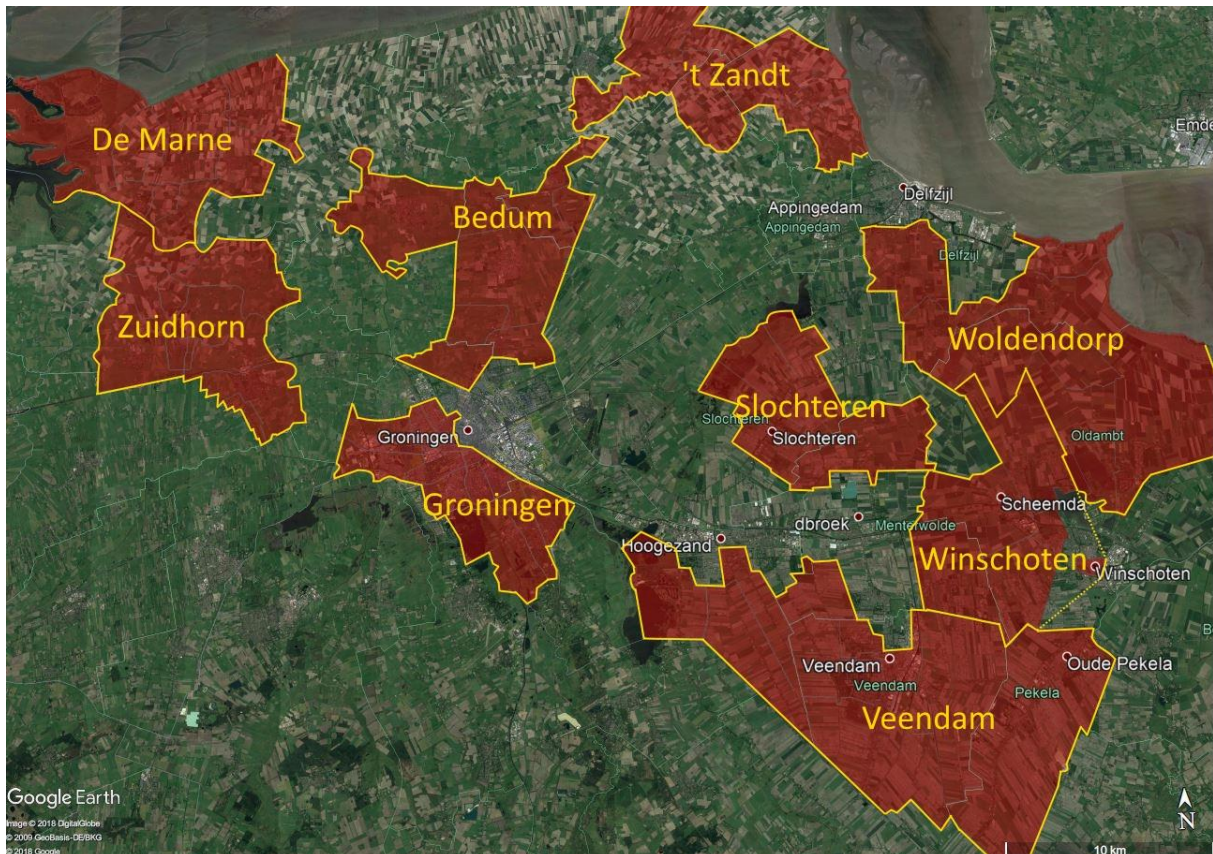
1 Samenvatting

Het uitgevoerde onderzoek

Dit rapport doet verslag van een onderzoek naar de oorzaken van schade aan gebouwen in Groningen. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Nationaal Coördinator Groningen door een onderzoeksteam van TU Delft. Doel is om duidelijkheid te verkrijgen over de oorzaken die ten grondslag liggen aan de schades in de provincie Groningen en om inzicht te krijgen in de mate waarin diverse oorzaken een rol spelen. Aanleiding tot het onderzoek is de discussie over de voormalige contour. Binnen die contour werd tot 2016 in de provincie Groningen schade als gevolg van bevingen wél vergoed en daarbuiten werden claims op voorhand afgewezen. Hoewel die contour nu niet meer wordt gehanteerd, vormt deze wel de directe aanleiding tot de studie. Immers de vraag was, als bevingen niet de hoofdoorzaak van de schade zouden zijn buiten de contour, wat zijn dan wel de oorzaken? De invloeden van de verschillende mijnbouwactiviteiten in Groningen (gaswinning, gasopslag, zoutwinning, waterwinning, waterinjectie) worden in deze studie beschouwd en ook de stapeling van mijnbouwactiviteiten op bepaalde locaties. Duidelijkheid en duiding bieden over de oorzaken en hun invloed op de schade aan gebouwen staan centraal in dit onderzoek.

Bouwkundige schade doet zich vaak voor in de vorm van scheuren in metselwerk. Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van 69 case studies aan gebouwen, in zes gebieden op grote afstand van de epicentra van de zware bevingen (De Marne, Zuidhorn, Groningen/Haren, Veendam e.o., Winschoten e.o. en Woldendorp e.o.) en in drie gebieden op kleinere afstand tot de epicentra van de zware bevingen (Bedum, Slochteren, 't Zandt e.o.). De cases zijn geselecteerd uit diverse lopende of afgeronde schadeprocedures. Uitgangspunt is dat er voor schadeobjecten al een schademelding en een schadeopname zijn gedaan. De panden omvatten historische boerderijen, vrijstaande woningen, twee onder één kap woningen, enkele rijtjeswoningen en enkele bijzondere gebouwen, waaronder één korenmolen. Onder de 69 objecten bevinden zich 3 rijksmonumenten. De uiteindelijk 69 geselecteerde schadeobjecten blijken samen ruim 2300 schades te bevatten, dus gemiddeld 35 schades per pand. Deze schades zijn individueel gekwalificeerd en gecatalogiseerd (type en aard, kenmerken).

Deze studie zoekt het verband tussen (1) schade, (2) gebouw en (3) omgeving en beoogt daarmee oorzaken te verklaren en een diagnose te stellen. Het *gebouw zelf* vormt een eerste relevante omstandigheid of *context* voor de bouwkundige schade. De opbouw, geometrie, krachtswerking, gebruikte materialen en constructieprincipes, fundering en funderingsgrondslag, huidig en historisch gebruik, aanpassingen, uitbreidingen – al deze kenmerken van het gebouw kunnen een relatie met de schade hebben. Die relatie is voor alle panden onderzocht. Daarnaast vormt de *omgeving* van het gebouw een tweede belangrijke context voor schade. Soms is de omgeving om het gebouw in de loop van de tijd veranderd, zijn er naburige gebouwen gekomen, zijn er wegen aangelegd, is het terrein opgehoogd etc. Een ander belangrijk element in de context van de omgeving is de waterhuishouding. Niet in de laatste plaats zijn ook de mijnbouwactiviteiten in de provincie Groningen een belangrijke omgevingscontext. Effecten hiervan zijn diepe bodemdaling en bevingen. Het betreft de gaswinning in het Groningenveld en in tal van kleine velden, de zoutwinningsactiviteiten nabij Veendam en Winschoten, gasopslag bij Grijpskerk, Veendam en Winschoten en waterinjectie bij o.m. Borgsweer.



Figuur 1.1: Overzicht van de ligging van de negen onderzoeksgebieden in deze studie

Om de beoordeling te faciliteren zijn diverse aanvullende gegevens over het pand en de omgeving verzameld. Bij alle panden zijn zettingsmetingen uitgevoerd door middel van *lintvoegwaterpassingen*, is door middel van *satellietwaarnemingen* het zakkingsbeeld van gebouw en de nabije omgeving bepaald en is de invloed van historische geïnduceerde bevingen sinds 1986 op basis van rekenmodellen bepaald. Bij ongeveer twee derde van de panden is ter plaatse *funderings- en grondonderzoek* uitgevoerd.

In de studie is gekeken welke *afzonderlijke oorzaken of combinaties van oorzaken* een rol gespeeld kunnen hebben bij het ontstaan van schade. Daartoe zijn *scenario's* beschouwd om de schade te kunnen verklaren naar type, aard en voorkomen. Die scenario's zijn gefalsificeerd of geverifieerd aan de hand van gegevens over de context van gebouw en omgeving. Als een *best verklarend scenario* is gevonden, is de vraag van de *causaliteit*, het oorzakelijk verband tussen een omstandigheid en de schade, in principe beantwoord. Tevens is een oordeel gegeven over de mate waarin die oorzaak heeft geleid tot het overschrijden van opneembare spanningen in een bouwconstructie of bouwdeel. Dit is *technische toerekenbaarheid*; technisch opdat geen vermenging of verwarring plaatsvindt met eventuele juridische of financiële toerekenbaarheid. Het begrip 'technische toerekenbaarheid' staat ook los van een 'kans op schade'. De beoordeling van de schades en het opstellen van de best verklarende scenario's is uitgevoerd door een multidisciplinair samengesteld panel van experts (met als disciplines zowel geotechniek, funderingstechniek, constructief en bouwkundig) binnen een ingekaderde werkwijze. Daarmee zijn zoveel mogelijk waarborgen ingebouwd om te zorgen voor een objectieve beoordeling waarbij steeds zoveel mogelijk aspecten zijn belicht.

Het aantal cases en aantallen schades zijn per soort zodanig laag en de cases hebben zodanig specifieke kenmerken, dat met een statistische interpretatie van de resultaten voorzichtig moet

worden omgegaan. De resultaten zijn geldig voor de onderzoekspopulatie en – tenzij anders aangegeven – voor de populatie van gebouwen waarvoor schade is gemeld. Maar het veralgemeniseren van de resultaten naar de totale populatie gebouwen in de provincie Groningen kan alleen met zorgvuldige overwegingen gebeuren. Een bredere geldigheid van de uitspraken is bij de conclusies benoemd.

Dit onderzoek heeft als overeenkomst met eerder¹ uitgevoerd onderzoek naar de oorzaken van schade dat de schade door experts is beoordeeld en dat gebruik gemaakt is van een door TNO opgestelde generieke set aan schadeoorzaken. Het verschil met deze eerdere onderzoeken ligt in 1) het hanteren van een scenario-aanpak met meer oorzaken, 2) het hanteren van het begrip technische toerekenbaarheid, 3) in een grote hoeveelheid ondersteunende en aanvullende informatie in het beoordelingsproces waarmee consequent rekening is gehouden met de context van het gebouw, de ondergrond en de omgeving, 4) modelgegevens om de sterkte van laagfrequente trillingen beter te kunnen schatten en 5) verdiepende inzichten over de schadelijke werking van trillingen. Dit laatste geldt zowel voor de invloed van trillingen door bevingen als afzonderlijke oorzaak, maar ook voor de invloed die bevingen samen met andere oorzaken kunnen hebben bij het ontstaan van schade.

Het onderhavige rapport bespreekt de resultaten van de cases studies op een geaggregeerd niveau, in termen van gebouwtypen, bouwwerkklassen en ligging van de panden. Over de situatie van de afzonderlijke panden is alleen een terugkoppeling aan de eigenaren/bewoners gegeven.

De belangrijkste conclusies uit het onderzoek

Aantal, mate en type schade is afhankelijk van bouwtype, bouwjaar en ligging t.o.v. epicentra

Het aantal schades, de mate van schade (scheurwijdte) het type schade (scheurtype) en de locatie van schade (binnen of buitenzijde van het gebouw) heeft een verband met het bouwtype en met de bouwjaarklasse:

- Wanneer onderscheid wordt gemaakt naar bouwjaarklasse, zijn er in alle vier gehanteerde bouwjaarklassen gemiddeld meer schades per pand in gebieden op kleine afstand tot de epicentra van zware bevingen dan in de gebieden op grote afstand tot de epicentra.
- Panden van na 1970 blijken relatief meer schade aan de binnenzijde van de woning te hebben dan aan de buitenzijde. Dit verschil wordt ook aangetroffen bij twee-onder-een-kap woningen. Dit houdt verband met de constructiewijze van deze (veelal) nieuwere panden en houdt geen verband met hun ligging ten opzichte van de epicentra.
- Panden van voor 1940 vertonen in de regel meer schades dan panden van na 1940. Boerderijen (woonhuis inclusief de daaraan gekoppelde schuur) vertonen in de regel meer schades dan vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen, hetgeen verklaarbaar is vanwege de grotere omvang van boerderijen.

De oorzaak van het optreden van de schade kan bij ongeveer 70 % van de schades worden vastgesteld

In gemiddeld 70 % van de schades kon op basis van beschikbare schadeopname rapporten een best verklarend scenario worden geformuleerd. In de overige gevallen waren er te veel opties of was de kwaliteit van de informatie over de schade onvoldoende om tot een oordeel te komen. Deze score geeft een inzicht in de mate waarin op basis van schadeopname rapporten tot een uitspraak over de

¹ Grote schadeonderzoeken in Groningen door onder meer Arcadis in 2015 en Witteveen + Bos in 2016/2017

causaliteit kan worden gekomen. Nader onderzoek aan het schadeobject zou deze score nog kunnen verbeteren.

Toerekening van aandeel van oorzaken aan schade is slechts indicatief mogelijk

In deze studie is het begrip (technische) toerekenbaarheid gehanteerd. De toerekenbaarheid van de schade betreft het aandeel van een oorzaak in de spanningen of rekken van een bouwdeel of constructiedeel, wanneer de schade is ontstaan. Een nauwkeurige kwantitatieve vaststelling hiervan blijkt binnen het proces van de beoordeling niet mogelijk te zijn. Dit is te bewerkelijk en er blijven te veel onzekerheden. Over de technische toerekenbaarheid kunnen daarom alleen indicatieve en kwalitatieve uitspraken worden gedaan.

Gebouwgebonden oorzaken en ongelijkmatige zettingen vormen voornaamste bestanddeel in de scenario's

De mogelijke oorzaken van schade zijn in drie hoofdcategorieën onderverdeeld: 1) gebouwgebonden oorzaken, 2) bevingen en 3) ongelijkmatige zettingen.

De meerderheid van de schades heeft een best verklarend scenario, waarin gebouwgebonden oorzaken en zettingsverschillen als oorzaken voorkomen. Veel van de best verklarende scenario's voor het ontstaan van de schade in de onderzochte panden bevatten ook de bevingen als medeoorzaak.

Gebouwgebonden oorzaken en ongelijkmatige zettingen zijn in termen van technische toerekenbaarheid de belangrijkste schadeoorzaken, gezien over alle schades bij de onderzochte panden. Het aandeel van gebouwgebonden oorzaken en ongelijkmatige zettingen in de spanningen die tot schade leiden is voor beide typen oorzaken *middelmatig* (middelmatig betekent een orde van grootte tussen 33 % en 66 %). Trillingen door bevingen hebben bij de onderzochte panden een kleiner aandeel.

Indien naar bouwtype of bouwjaarklasse wordt gekeken, wijken alleen 'Twee onder één kap woningen' en gebouwen van na 1970 van dit beeld af: de toerekening van de schade aan zettingen is hier aanzienlijk geringer en wordt als *klein* gekwalificeerd (orde van grootte 10 % tot 33 %). Gebouwen van na 1970 zijn mede op basis van beter grondonderzoek beter gefundeerd.

Gebouwgebonden oorzaken zijn niet specifiek voor de onderzochte panden of voor de provincie Groningen

Gebouwgebonden oorzaken zijn die oorzaken, die uitsluitend samenhangen met het gebouw, de geometrie, de toegepaste bouwmaterialen en constructiewijzen en met de krachtswerking in het gebouw en staan los van de lokale situatie. Deze bevinding over de mate van toerekenbaarheid aan gebouwgebonden oorzaken heeft brede geldigheid voor gebouwen in de provincie Groningen.

Zettingen en zettingsverschillen zijn sterk bepaald door specifieke lokale omstandigheden

Zettingen en zettingsverschillen kennen een breed spectrum van achterliggende of dieper liggende oorzaken, die worden bepaald door lokale omstandigheden.

- Gebouw en fundering: in vrijwel alle onderzochte gevallen is de situatie van de fundering in combinatie met de lokale ondiepe ondergrond de belangrijkste factor bij het ontstaan van zettingen en zettingsverschillen. Voor de verklaring van de bouwkundige schade speelt deze oorzaak een grote rol. De meeste onderzochte panden staan niet op palen en zijn zgn. 'op staal' gefundeerd. Dan speelt het ontwerp van de fundering een rol, de eigenschappen van de bodem

en ook de grondwaterstand en het vochtgehalte van het bodemmateriaal. Ook de ligging van panden op een talud of op de rand van een wierde heeft invloed op zettingen en zettingsverschillen.

- Diepe bodemdaling: deze speelt geen rol bij het ontstaan van schade door zettingen in de onderzochte gevallen, althans niet in termen van door de bodemdaling veroorzaakte hellingen, krommingen en rekken in de bodem en in een gebouw. Dit geldt ook voor locaties met een zeer lokale diepe bodemdaling en zogenaamde gestapelde mijnbouwactiviteiten, zoals nabij Veendam en nabij Winschoten.
- Peilaanpassingen en wijziging grondwaterstanden: in enkele afzonderlijke gevallen hebben aanpassingen van oppervlaktepeilen verband houdend met diepe bodemdaling door mijnbouwactiviteiten mogelijke wel een invloed gehad op de grondwaterstand. Deze oorzaak speelt alleen in zeer specifieke situaties een rol. Er kunnen dan ongelijkmatige zettingen in de ondiepe ondergrond ontstaan.

Onzekerheid in historische grondwaterstanden en seizoensgebonden variaties is zeer groot

Geconstateerd wordt dat de dichtheid van het meetnet van de grondwaterstanden vooral in het noordelijk deel van de provincie Groningen zeer grofmazig is. Ook is de compleetheid van de data en van de bemonsteringsperioden vaak zodanig beperkt, dat geen goed oordeel kan worden geveld over de grondwaterstanden in het verleden. Het invullen van deze lacunes vereist het uitvoeren van lokale of regionale grondwaterstudies waarin ook gegevens over historische neerslag en verdamping worden meegenomen. Dergelijke studies zijn in het onderhavige onderzoek niet uitgevoerd, als gevolg waarvan de onzekerheid in de lokale grondwaterstand bij veel panden aanzienlijk is.

Oorzakelijke verband tussen schade en bevingen moeilijk uit te sluiten of te bewijzen

Bevingen zijn als schade-bijdragende factor moeilijk uit te sluiten van de best verklarende scenario's, maar vallen tegelijk ook moeilijk te bewijzen. Het schadebeeld biedt hiervoor meestal onvoldoende aanknopingspunten. Waar combinaties van bevingen met andere oorzaken optreden, lijkt bij lichte bevingen het schadebeeld vooral gerelateerd te zijn aan de andere onderliggende oorzaak. Voor het betrouwbaarder bepalen van de invloed van de beving op de schade is kennis van het moment van het ontstaan van de schade essentieel. Deze conclusie heeft bredere geldigheid voor schades bij andere gebouwen in de provincie.

Slechts bij een zeer beperkt aantal afzonderlijke schades is vastgesteld dat deze uitsluitend door de bevingen kunnen zijn veroorzaakt. Deze schades komen voor bij enkele cases binnen de voormalige contour, daar waar in het verleden sterke trillingen als gevolg van de bevingen zijn opgetreden.

Triggerwerking kan bij bevingen schade laten ontstaan bij betrekkelijk lage trillingssterkte

De studie heeft nader inzicht gegeven in de schadelijke werking van trillingen door bevingen. Door middel van simulatieberekeningen is de invloed van trillingen door bevingen in combinatie met spanningen door andere belastingen onderzocht. Daarbij is gekeken naar de spanningen in het vlak van gevels en muren als gevolg van de trillingen uit de bodem. Speciaal is gekeken naar de mogelijkheid dat een beving van geringe sterkte schade kan laten ontstaan in een situatie dat een bouwdeel al spanningen bevat als gevolg van een andere belasting, zoals door een gebouwgebonden situatie of door een zettingsverschil. Deze zgn. triggerwerking is op basis van modelvorming rekenkundig onderbouwd. Het moment waarop de beving plaatsvindt, in relatie tot de opgebouwde spanningen door de andere mechanismen is bepalend is voor de triggerwerking. De triggerwerking is een belangrijke omstandigheid dat bij veel panden schade door bevingen kan ontstaan, ondanks de

geringe invloed van de trillingen op de spanningen in de desbetreffende gebouwen. Deze inzichten zijn meegenomen bij de beoordeling en de kwalitatieve toerekening van de schade.

Bij bijzondere gebouwen en in bijzondere situaties kan interactie van bouwdelen als gevolg van bevingen aanleiding zijn tot schade

Bij een aantal cases in de studie, zoals boerderijen en bijzondere gebouwen, zijn er indicaties dat de bevingen interacties tussen gebouwdelen hebben veroorzaakt, die op een andere manier tot schade hebben geleid dan de spanningen in het vlak van de gevel of muurdelen als gevolg van de bevingen. Dergelijke interacties blijken vooral aan de orde bij grote dakconstructies (met name schuren/stallen van boerderijen) en bij bijzondere constructies (zoals bijv. een korenmolen).

De mate van toerekenbaarheid van schade aan bevingen ligt voor veel cases op een laag niveau

Met de verkregen inzichten is een indicatieve en kwalitatieve schaal van toerekenbaarheid gebruikt bij beoordeling van de invloed van bevingen.

Gemiddeld over alle gebouwen op kleine afstand tot de epicentra van geïnduceerde bevingen – dit betreft de onderzoeksgebieden binnen de voormalige contour – is de technische toerekenbaarheid van de schade aan bevingen gekwalificeerd als *klein* tot *middelmatig* (orde van grootte 33 %). Omdat het een gemiddelde over alle onderzochte gebouwen betreft, zullen voor afzonderlijke schades deze percentages afwijken.

Op grote afstand tot de epicentra van zware bevingen – dit betreft de onderzoeksgebieden buiten de voormalige contour – is de technische toerekenbaarheid gekwalificeerd als (*vrijwel*) *geen* (orde van grootte: minder dan 1 %) tot *zeer klein* (orde van grootte 1 % tot 10 %).

Deze verschillen tussen de onderzoeksgebieden buiten de contour ontstaan vooral, doordat bij sommige kleinere gasvelden of lokale winningsactiviteiten (lichte) geïnduceerde bevingen blijken op te treden, die bij panden in de directe nabijheid sterkere trillingen veroorzaken dan de zwaardere bevingen op grote afstand. De invloed van deze lichterbevingen op zeer kleine afstand is in veel eerdere schadeonderzoeken niet beschouwd.

De aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek

Verbeter de kwaliteit van de bouwkundige schadeopname. Deze is sterk bepalend voor de kwaliteit en betrouwbaarheid van de beoordeling. Om de beoordeling in complexe gevallen te faciliteren, zou overwogen moeten worden voor specifieke gebieden of voor specifieke kwetsbare panden alsnog een bouwkundige vooropname uit te voeren, waarbij alle reeds aanwezige schade eenduidig wordt vastgelegd.

Voeg de lintvoegwaterpassing toe als element bij de beoordeling van belangrijke en/of complexe schades waar ongelijkmatige zettingen mogelijk een rol spelen. De informatie uit de lintvoegwaterpassingen is cruciaal voor een goede beoordeling van de invloed van zettingen.

Maak de onzekerheden in de vaststelling van het oorzakelijk verband beter zichtbaar en expliciet. Dit zal op termijn de kwaliteit van de beoordelingen vergroten en leiden tot betere gegevensverzameling of onderzoek om de gesignaleerde onzekerheden te verminderen.

De modelvorming van gebouwen moet verder worden uitgebreid voor meer bouwtypen en ondergrondssituaties, om beter inzicht te krijgen in de invloed van bevingen en andere belastingen op de spanningen in gebouwen. Hierdoor kunnen kansen op het ontstaan van schade in diverse omstandigheden en situaties beter worden onderbouwd.

Breid bestaande monitoringprogramma's voor bodemdaling uit, individualiseer de resultaten daarvan en maak meer gebruik van beschikbare nieuwe monitoringtechnologie, bijvoorbeeld op basis van satellietwaarnemingen. Dit vergroot het inzicht in de effecten van diepe bodemdaling aan het aardoppervlak.

Maak beter gebruik van de beschikbare sensornetwerken voor het meten van trillingen (waaronder het KNMI en het TNO netwerk) om de schatting van de trillingssterkte per beving per pand te optimaliseren en de resterende onzekerheid in de modellen te verminderen.

Verbeter het inzicht in actuele grondwaterstanden bij kwetsbare panden of panden op gevoelige locaties zoals taluds, hellingen (wierden). Hiertoe zou het meetnet van grondwaterstanden aanzienlijk moeten worden verdicht. Waar zulke lacunes bestaan, zullen lokale of regionale grondwaterstudies uitgevoerd moeten worden, waarin invloed van peilveranderingen, grondwateronttrekkingen, neerslag en verdamping moet worden meegenomen.

Verbeter het inzicht in de complexe wisselwerking tussen grondwaterstanden, ondiepe en diepe bodemdaling en bevingen en de effecten hiervan op bodem en gebouwen. Dit geldt ook voor het inzicht in vervormingen van massieven met taluds onder invloed van de wisselwerking van deze omstandigheden. De relatie tussen deze fenomenen en bouwkundige schade kan hierdoor in deze specifieke situaties beter worden onderbouwd.

2 Inleiding

TU Delft heeft een validatieonderzoek uitgevoerd in opdracht van de Nationaal Coördinator Groningen (NCG). Het validatieonderzoek als geheel betreft een breed onderzoek naar de mogelijke oorzaken van de schade aan gebouwen, ook daar waar bevingen niet de (enige) oorzaak kunnen zijn.

Op verzoek van de Begeleidingscommissie is het Validatieonderzoek destijds opgeknipt in Fase 1 en Fase 2. Door TU/Delft is in het voorjaar van 2016 Fase 1 van het Validatieonderzoek uitgevoerd, dat uitsluitend betrekking had op de Arcadisrapportages ‘Schade buiten de Contour’ uitgevoerd. Fase 1 betrof een onderzoek naar de juistheid van de door Arcadis gehanteerde methodologie. Hierbij ging het om een bureaustudie waarbij de onderzoeksmethodologie, doelstellingen, aanpak van het onderzoek, gehanteerde aannames, veronderstellingen en uitgangspunten, theoretisch en conceptueel kader, gebruikte normen en richtlijnen, etc. worden getoetst. Het validatieonderzoek van Fase 1 door de TU Delft naar de methodologie van het Arcadisonderzoek is in 2016 afgerond [2.1]. Kort samengevat is de conclusie uit de Validatiestudie Fase 1 dat de methode van Arcadis niet houdbaar is. Op basis van deze conclusie heeft NAM besloten alle schademeldingen in het buitengebied (circa 1800 stuks) in behandeling te nemen.

Vervolgens heeft NCG aan TU Delft opdracht verleend om Fase 2 van het Validatieonderzoek te starten. Dit betreft het bredere onderzoek naar zowel de impact van de aardbevingen op de gebouwen aan de randen van het gaswinningsgebied, als naar de mogelijke oorzaken van de schade aan gebouwen elders in Groningen, waar aardbevingen en ook andere externe oorzaken door mijnbouwactiviteiten in het geding kunnen zijn.

Het onderzoek waarover dit rapport verslag doet, richt zich principieel op schade in gebouwen. De schade is het focuspunt van het onderzoek. Vanuit deze objecten wordt onderzoek verricht om aard en omvang van de schade vast te leggen en het ontstaan er van te duiden, de context van de schade (het gebouw, de directe omgeving) vast te leggen en de relatie met de schade te duiden. Verder worden ook andere invloeden, zoals de eventuele gevolgen van mijnbouwactiviteiten, bijvoorbeeld in de vorm van bodemdaling en bevingen, vastgelegd en wordt de invloed op de schade geïdentificeerd. Het onderzoek richt zich dus niet op de fenomenen in de ondergrond die tot bodemdaling aanleiding geven en ook niet op mechanismen die in de gasvelden tot bevingen aanleiding geven. Het onderzoek richt zich ook niet op mijnbouwkundige maatregelen om bijvoorbeeld bodemdaling te beïnvloeden of te beperken of om aantal en sterkte van bevingen te beperken. Alleen de schade aan gebouwen staat centraal en de directe beïnvloeding vanuit de omgeving die tot schade kan leiden.

In de Nederlandse onderzoekspraktijk was er tot voor kort niet veel houvast voor het bepalen van oorzaken van schade in metselwerk. Stichting Bouw Research heeft in de jaren '70 een aantal brochures uitgebracht, zoals “Scheurvorming in gemetselde wanden” [2.4] en “Scheuren in woningen” [2.5]. Hierin worden voorbeelden van scheuren gegeven en ook een uitleg van mogelijke oorzaken. Er zijn uit deze periode geen Nederlandstalige publicaties bekend waarin een systematiek om van waargenomen scheuren op een betrouwbare manier te bepalen, waardoor deze worden veroorzaakt. Individuele ingenieursbureaus werkten met een eigen aanpak, die afhankelijk van de kwaliteit van de betrokken experts, tot bevredigende resultaten kon leiden. Deze ingenieurs-aanpak bestaat vaak uit het verzamelen van gegevens over de schade, vervolgens op basis van deze gegevens en eigen ervaring een overzicht maken van mogelijke schade-oorzaken en ten slotte

bepalen welke van deze mogelijke schade-oorzaken de meest waarschijnlijke is. De verschillende stappen in dit proces worden vaak intuïtief en met een verschillende maat van grondigheid uitgevoerd.

Op het gebied van schadeonderzoek bij monumenten werd vanuit Nederland een bijdrage geleverd aan het Europese project “Masonry Damage Diagnostic System” [2.6]. Bij dit diagnosesysteem worden verschillende typen schade bij monumenten meegenomen, vaak met een focus op bijvoorbeeld vochtproblemen waarbij gedetailleerd onderzoek naar mortel- en steeneigenschappen wordt gedaan.

In het buitenland zijn er voor 2006 al wel diverse publicaties verschenen over het proces van schadeonderzoek. In Amerika is het vakgebied Forensic Structural Engineering als een aparte discipline ontwikkeld. Dit heeft geleid tot praktijkgerichte publicaties zoals het “Forensic Structural Engineering Handbook” [2.7] met uitleg over het proces van schadeonderzoek en aandachtspunten voor verschillende materialen. Ook in Engeland zijn in de jaren '90 diverse publicaties verschenen. “Appraisal & Repair of Masonry” [2.8] geeft een beschrijving van het onderzoeksproces, diverse mogelijke oorzaken en maatregelen voor reparatie. “Has your house got cracks?” [2.9] is een meer praktische gids voor huizenbewoners met uitleg over mogelijke oorzaken en het schadeonderzoek- en afwikkelingsproces. De Vent geeft in haar proefschrift [2.2] ook een overzicht van diverse internationale publicaties die zich focussen op ‘gebouw pathologie’; het diagnosticeren van gebouwschade.

In de schade-onderzoekpraktijk was met name de fase van het ontwikkelen van een overzicht van mogelijke schadeoorzaken en het toetsen van deze mogelijkheden niet goed ontwikkeld. Daarom is door De Vent in 2007 een promotieonderzoek gestart naar het bepalen van oorzaken van constructieve schade bij metselwerk [2.2]. Hierbij is ook een ‘diagnostic decision support tool’ ontwikkeld [2.10].

In de methodiek van De Vent worden symptomen, oorzaken en contextcondities onderscheiden. Voor de symptomen van schade onderscheidt De Vent 60 karakteristieke schadepatronen. Per schadepatroon is een overzicht gemaakt van mogelijke oorzaken. Een aantal oorzaken is alleen mogelijk wanneer de essentiële condities vanuit de context aanwezig zijn. De methodiek van De Vent maakt het mogelijk om de hoeveelheid mogelijke oorzaken op een efficiënte manier te reduceren. Met de koppeling van schadepatronen en mogelijke oorzaken wordt bestaande kennis hergebruikt. De aanpak van De Vent is niet specifiek gericht op aardbevingsschade.

In de provincie Groningen wordt vanaf 1963 naar gas geboord. Af en toe werden er bevingen gevoeld, maar deze waren gering in aantal (minder dan 50 per jaar) en van geringe sterkte (lager dan 3,5 op schaal van Richter). Toen in 2006 in Westeremden een aardbeving werd waargenomen van 3,5 op de schaal van Richter, werd schade door aardbevingen opeens een factor van betekenis. Naar aanleiding van vragen gesteld door burgers heeft Gedeputeerde Staten van de Provincie Groningen een onderzoek opgestart naar opgetreden schade. In het kader van dat onderzoek heeft TNO in 2009 een voorstel gedaan voor een methodiek voor het gestructureerd onderzoeken van oorzaken van scheurvorming van gebouwen. Dit is in de praktijk getest en heeft in 2011 geleid tot een aangepaste methodiek [2.11].

De TNO systematiek bestaat uit 4 stappen:

1. Inventarisatie van basisgegevens van het betreffende gebouw en de omgeving
2. Inventarisatie van de scheurvorming
3. Vaststellen van mogelijke oorzaken

4. Vaststellen van consequenties

Voor het vaststellen van mogelijke oorzaken wordt eerst een lijst met alle mogelijke oorzaken opgesteld. Hierbij worden drie hoofdoorzaken voor scheurvorming genoemd:

1. door belastingen
2. door opgelegde of verhinderde vervormingen
3. door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.

Deze categorisering is ook bruikbaar voor andere vormen van schade.

De mogelijke oorzaken die niet aansluiten bij de specifieke gebouw- en omgevingskenmerken worden verworpen (gefalsificeerd, falsificatie). Vervolgens wordt bepaald of de overgebleven oorzaken een rol kunnen hebben gespeeld (verificatie). Hierbij dient per oorzaak ook te worden aangetoond of de oorzaken zelfstandig de opgetreden schade kunnen hebben veroorzaakt. Uiteindelijk dienen scenario's te worden opgesteld, waarin het verloop van schades door de tijd heen, veroorzaakt door één of meer oorzaken, wordt weergegeven.

Diverse onderzoeken die daarna werden uitgevoerd door o.a. Arcadis en Witteveen & Bos [2.12] naar schade in Groningen volgden de TNO-methodiek. Ook het Handboek Aardbevingsschade [2.13] volgt deze methodiek in hoofdlijnen.

Er is voor gekozen om het onderhavige onderzoek te richten op gemelde en dus opgetreden schade, met als doel om de oorzaken van het optreden van die schade beter te begrijpen en de invloed te kunnen kwantificeren. Daarbij heeft deze studie het karakter van een terugblik: onderzocht wordt welke omstandigheden in het verleden tot de schades of schadebeelden aanleiding gegeven kunnen hebben. De verkregen inzichten kunnen uiteraard bruikbaar zijn bij het inschatten van kans en mate van schade in de toekomst, maar dit onderzoek richt zich daar niet op.

3 Hoofdvraag en doelstelling

3.1 Hoofdvraag

Het validatieonderzoek richt zich op verzoek van NCG op de mogelijke oorzaken van de schade aan gebouwen, ook daar waar bevingen niet de (enige) oorzaak kunnen zijn. NCG heeft aan TU Delft de volgende hoofdvraag voorgelegd:

Wat is de (meest waarschijnlijke) oorzaak of wat zijn de (meest waarschijnlijke) oorzaken van de gemelde schades in het onderzoeksgebied?

Bij de beantwoording van deze hoofdvraag zouden op verzoek NCG de volgende twee onderdelen specifiek aan de orde moeten komen, samengevat:

- a) *Soorten schade en oorzaken:* Welke typen gebouwschade treden in Groningen op en in welke aantallen en in welke mate is dit gerelateerd aan gebouwtypes, ondergrondomstandigheden of locatie? Wat zijn de mogelijke oorzaken van deze gebouwschades (zowel interne oorzaken als externe oorzaken, zoals trillingen, hemelwater, diepe of ondiepe bodemdaling, peilaanpassingen, wisselende waterhuishouding, verweking, zettingen, bodemopbouw- en samenstelling, w.o. waterlopen/stroomgebieden etc.) en wat is de mogelijke rol hierin van bodemdaling (zowel diep als ondiep) en bevingen als gevolg van mijnbouwactiviteiten. Welke schades zijn in het verleden geaccepteerd als gevolg van de mijnbouwactiviteiten?
- b) *Cumulatie:* Welke soorten schades en schade oorzaken treden in combinatie op? Waar kan sprake zijn van gelijktijdige werking tussen interne en/of externe oorzaken, zoals zettingen, bevingen, wisselende grondwaterpeilen, diepe of ondiepe bodemdaling, Deze combinatie kan bestaan uit cumulatie-effecten, degradatie-effecten, triggeren etc. Indien zich dit voordoet, kan dan met een redelijk mate van betrouwbaarheid worden aangegeven of worden bepaald welke schade c.q. welk aandeel in de schade in welke mate is gerelateerd aan de verschillende effecten van mijnbouwactiviteiten? Kunnen onzekerheidsmarges worden aangegeven?

3.2 Doelstelling van het onderzoek

Het onderzoek heeft betrekking op bouwkundige objecten in gebieden, waar directe en indirecte effecten van mijnbouwactiviteiten een (mede)oorzaak kunnen zijn van het ontstaan van schade aan gebouwen. We noemen dit externe oorzaken van schade. Tot de directe en indirecte effecten van mijnbouwactiviteiten rekenen we geïnduceerde bevingen, diepe bodemdaling, wijzigingen in het (grond)waterpeil en ondiepe bodemdaling.

Geïnduceerde bevingen treden in Nederland sinds enkele decennia op bij gaswinning als gevolg van de afnemende druk in het reservoir. Diepe bodemdaling kan door mijnbouwactiviteiten van diverse aard ontstaan, zoals gaswinning, winning van mineralen of de (tijdelijke) opslag van gas. Wijzigingen in het (grond)waterpeil kunnen door de diepe bodemdaling autonoom ontstaan of door waterbeheerders worden aangebracht. In een aantal gevallen zijn dergelijke actieve aanpassingen van de waterstand noodzakelijk als gevolg van de diepe bodemdaling. Op hun beurt kunnen

wijzigingen in het (grond)waterpeil ook weer invloed hebben op de ondiepe bodem, in de vorm van zettingen.

Schade aan gebouwen kan diverse oorzaken hebben, zoals bijvoorbeeld zettingen of zettingsverschillen als gevolg van het eigen gewicht van een gebouw, overbelasting of verhinderde vervormingen, of wijzigingen die in de loop der tijd in de constructie van het gebouw zijn aangebracht. Schade kan ook zijn oorzaak vinden in andere externe oorzaken, zoals trillingen door verkeer, zettingen door bouwwerkzaamheden in de omgeving van het pand, grondwaterstand-wijzigingen of fluctuaties in het grondwater, bijvoorbeeld door gebreken in rioleringen of als gevolg van bomen.

Het onderzoek richt zich specifiek op complexe gevallen van schade waarbij verschillende interne en/of externe oorzaken mogelijk zijn of aannemelijk zijn. Vervolgens is van belang of en in welke mate de schade ook zou zijn opgetreden indien er geen sprake was van de externe omstandigheid 'mijnbouw'. De NCG heeft in zijn uitvraag een onderzoeksgebied aangegeven, dat zowel het bevingsgebied zelf als de randen daarvan omvat. Voor die gebieden waar aardbevingen de evidente dominante (hoofd)oorzaak van de complexe schades blijken te zijn, zal dit uit het onderzoeksresultaat volgen.

In dit onderzoeksvoorstel staan drie hoofddoelen centraal:

- Eerste hoofddoel van het onderzoek is het bepalen van de oorzaak of oorzaken van de waargenomen schade binnen de context van het gebouw en de omgevingsinvloeden (onderzoek naar causaliteit).
- Tweede hoofddoel van het onderzoek is het bepalen van de mate waarin de gevonden oorzaken hebben bijgedragen tot de schade (onderzoek naar toerekenbaarheid).
- Derde hoofddoel is het formuleren van aanbevelingen voor informatieverzameling, opname en beoordeling van bouwkundige schadegevallen met meervoudige oorzaken in het algemeen en van aanbevelingen voor vervolgacties (inhoudelijk of procesmatig). Deze aanbevelingen worden waar mogelijk gedifferentieerd naar deelgebied, cluster van oorzaken en/of cluster van gebouwtypologieën.

3.3 Relatie tussen hoofdvraag en onderzoeksdoelen

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt ingegaan op de relatie van de onderzoeksdoelen met de eerder vermelde vraagstelling van NCG.

Om te beginnen zal dit onderzoek een **duiding** geven van de schadeproblematiek in Groningen. Evident is dat in Groningen een stapeling van schade-oorzaken optreedt en dat het aantal meldingen van schade in Groningen zeer groot is. Het is in de ogen van NCG van belang dat de schadeproblematiek wordt herleid naar de verschillende oorzaken ervan en dat er **duidelijkheid** komt over de bijdrage van die oorzaken aan de geconstateerde schade.

Schade aan bouwwerken kan ontstaan door een groot aantal oorzaken en een diverse verzameling oorzaken gezamenlijk die op een bouwconstructie kunnen inwerken gedurende hun normale

levensduur. Hiertoe behoren 'normale' schadeoorzaken gelegen in de constructie (inclusief de fundering), in het gebruik, in wijzigingen of in omstandigheden in de directe omgeving (bouwactiviteiten, verkeer etc). Dit soort oorzaken is relevant voor ieder bouwkundig object, ongeacht de plaats in Nederland. Daarbij komt dat de bouwcultuur in Groningen zeer goed aansluit bij die in de rest van Nederland en dat sinds de jaren 20 van de vorige eeuw onder hetzelfde regime van bouwtoezicht wordt gebouwd.

Groningen kent aanvullende oorzaken die specifiek verband houden met mijnbouwactiviteiten.

De *eerste set* aan oorzaken houdt verband met diepe bodemdaling en daarmee verbonden wijzigingen in de geohydrologische situatie. Deze oorzaken zijn vooral beperkt tot het bodemdalingsgebied en directe omgeving daarvan. In de Nederlandse praktijk tot nu toe wordt er van uitgegaan dat de effecten van diepe bodemdaling zelf op bouwconstructies zeer gering zijn. De effecten van de geohydrologische wijzigingen (wijzigingen grondwaterstanden, wijzigingen als gevolg van peilaanpassingen naar aanleiding van de diepe bodemdaling) kunnen indirect wel zettingen van de ondergrond opleveren en zijn een vaker genoemde en gedetecteerde aanleiding tot schade. De veronderstelling is dat deze oorzaken niet wezenlijk afwijken van de situatie in andere gebieden in Nederland waar grondwaterpeil aanpassingen hebben plaatsgevonden en dat de schade hierdoor qua aard vergelijkbaar zou moeten zijn.

Specifiek bij gasopslag in gasvelden (zoals nabij Grijskerk) kan een fluctuerend proces van diepe bodemdaling en bodemstijging optreden, wat mogelijk bijzondere effecten heeft op bouwconstructies, vooral door de snelheid en het aantal van de wisselingen (meerdere keren per jaar). Dit is een omstandigheid die redelijk uniek is voor de gebouwen in de provincie Groningen en waarvan niet duidelijk is wat de effecten zijn. Opgemerkt wordt dat de situatie is anders bij gasopslag in zoutcavernes (zoals bij Zuidwending en Heiligerlee) waarbij drukvariaties in principe worden opgevangen in de plastische zoutlaag die de caveerne omgeeft. Hierbij worden wel zeer geleidelijke bodemdalingen gemeten als gevolg van het kruipgedrag van het zout.

Een *tweede set* aan oorzaken hangt samen met de bevingen die door de gaswinning worden geïnduceerd. Het invloedgebied van de bevingen is potentieel veel groter dan het bodemdalingsgebied. Het karakter is dynamisch en het verschijnsel treedt herhaald op. Er zijn immers meerdere bevingen per jaar. Hoewel ook elders in Nederland bij gaswinning incidenteel geïnduceerde bevingen optreden (bijvoorbeeld in Noord-Holland), is het aantal bevingen in Groningen het grootste en zijn de bevingen tot nu toe het sterkst.

De sterkste bevingen zijn goed waarneembaar in een groot gebied en belasten de bouwconstructies in Groningen voelbaar, zichtbaar en ook (zeker in het centrum van het gebied) met duidelijk aanwijsbare schade. De aardbevingen hebben de attentiewaarde voor schade en de daarmee gepaard gaande bezorgdheid sterk vergroot, niet alleen over schade maar - zeker in het centrum van het Groningenveld - ook over de veiligheid. De aardbevingen vormen een omstandigheid die bovenop de andere schadeoorzaken komt (cumulatie) en die bovendien met zekere regelmaat terugkomt. Er zijn dan ook zorgen over de invloed van het herhaald karakter van de bevingen, over verergering van bestaande schades en over een triggerwerking op schades, die anders niet zou zijn ontstaan.

De bodemdaling door mijnbouwactiviteiten en de aardbevingen vormen de *grote differentiator* ten opzichte van andere situaties met mijnbouwactiviteiten en mogelijke bouwkundige schade in Nederland. Het is ook duidelijk (zie onder meer het Winningsplan van NAM) dat het aantal meldingen van schades in Groningen door bevingen nu al zeer groot is.

Op basis van de bevindingen in dit onderzoek zullen aanbevelingen worden gedaan voor het documenteren en interpreteren van (complexe) schades waarbij directe en indirecte externe invloeden van mijnbouwactiviteiten, zoals zettingen, waterpeilwijzigingen, diepe bodemdaling en aardbevingen een (mede)oorzaak kunnen zijn en voor het bepalen van de mate waarin de schade aan de diverse oorzaken is toe te rekenen. Het nu voorgestelde onderzoek zal aansluiten bij een wetenschappelijke methodiek die recent is ontwikkeld [3.1][3.2] en bij methodieken die in de afgelopen jaren in de praktijk zijn toegepast [3.3]. Hierin staat het afleiden van oorzaken van schade aan de hand van symptomen van de schade en contextuele omstandigheden centraal. In die methodiek zal op specifieke onderdelen verduidelijking en verdieping worden aangebracht met het oog op de beoordeling van dergelijke complexe bouwkundige schades in het algemeen. Het onderzoek richt zich evenwel niet op het doen van uitspraken of aanbevelingen over de afhandeling van de afzonderlijke schadegevallen die in het onderzoek zijn betrokken.

Als meer **duidelijkheid** is ontstaan over de oorzakelijke relaties en de toerekenbaarheid van het ontstaan van schade, zal ook het overkoepelende beeld in Groningen of in gebieden met specifieke oorzaken aan de orde komen. Met de kennis en achtergronden uit de case studies zal het beter mogelijk zijn om te **duiden** dat in bepaalde gebieden relatief vaker schade van een bepaald type aanwezig is of zal optreden dan elders.

Om de vergelijking zo zuiver mogelijk te houden, zullen ook enkele gebieden op grote afstand van de epicentra en gebieden zonder mijnbouwactiviteiten en op grote afstand van de bevingen worden onderzocht.

Het doel van het afrondend deel van het onderzoek is om een breder beeld op te bouwen over de oorzakelijkheid en toerekenbaarheid van de schade gezien over grotere (deel)gebieden, over verschillende typologieën van gebouwen, gerelateerd aan verschillende mogelijke schadebronnen of afstanden tot die schadebronnen. Dit beeld speelt een belangrijke rol in de duiding van de schadeproblematiek in Groningen, omdat hier in meer algemene zin uitspraken gedaan zullen worden over typen schade, achterliggende oorzaken en toerekenbaarheid daarvan, die in het gebied kunnen worden verwacht. Op basis hiervan kunnen aanbevelingen worden geformuleerd. Op basis hiervan kunnen bijvoorbeeld maatregelen worden genomen of procedures worden gehanteerd die adequaat zijn voor de aard van de schades in het gebied of in specifieke deelgebieden. Dit meer algemene beeld doet overigens niet af aan het principe, dat een afzonderlijke schade altijd individueel beoordeeld moet worden.

Met andere woorden op basis van het overkoepelend beeld van de oorzakelijkheid en toerekenbaarheid van de schade die over grotere (deel)gebieden of onder generieke omstandigheden worden waargenomen, worden richtinggevende aanbevelingen geformuleerd voor de aanpak van de schades specifiek voor bepaalde gebieden of meer in het algemeen, zowel inhoudelijk als procesmatig.

3.4 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen zijn rechtstreeks verbonden met de hoofddoelen van het onderzoek en met de hoofdvraag van NCG.

Aanwezigheid en oorzaken van schade

- Wat is als schade te duiden in de afzonderlijke cases?
- Welke zijn de waarschijnlijke scenario's met oorzaken voor schade binnen de context van gebouw en omgeving. Wat is de motivering van de mate van waarschijnlijkheid?
- Welke aanvullende achtergrondgegevens of meetgegevens kunnen meer duidelijkheid opleveren over de waarschijnlijke scenario's met oorzaken?

Toerekenbaarheid van schade naar oorzaken

- In welke mate kan de schade worden toegerekend aan de waarschijnlijke oorzaken en wat is de motivering daarvoor, rekening houdend met de mogelijkheid dat bepaalde oorzaken en gevolgen volgtijdig zijn geweest, de gevolgen vertraagd kunnen zijn ontstaan of dat een combinatie van oorzaken tot een andere schade leidt dat de oorzaken afzonderlijk?
- Welke aanvullende achtergrondgegevens of meetgegevens zouden meer duidelijkheid kunnen opleveren over de waarschijnlijke oorzaken?

Synthese en veralgemenisering beoordeling schade met meervoudige oorzaken

- Welke gemeenschappelijke kenmerken zijn aanwezig bij cases die onderdeel zijn van een ruimtelijk cluster (en dus gemeenschappelijke kenmerken hebben in termen van bodemomstandigheden, bodemdaling, waterpeilaanpassingen, invloed van bevingen etc)?
- Dito, voor cases die behoren tot vergelijkbare gebouw typologieën en ouderdomsklassen (en die dus gemeenschappelijke kenmerken zouden kunnen hebben vanuit de aard van het gebouw)
- Dito, voor verzamelingen van cases die vergelijkbare niveaus van trillingen als gevolg van de historische bevingen hebben ondervonden (en die dus gemeenschappelijke kenmerken zouden kunnen hebben als gevolg van de bevingen).
- Welk inzicht biedt deze beoordeling van deze cases over vaak aanwezige soorten schade, hun voornaamste waarschijnlijke oorzaken en de grote lijnen van de overwegingen met betrekking tot de toerekenbaarheid over de schades die bij bouwkundige constructies in bredere zin zijn te verwachten?
- Welke lessen zijn te leren uit het beoordelingsproces, die hun plaats zouden moeten vinden in procedures en methodieken voor een betere beoordeling van complexe schadegevallen in het algemeen?

Noot: De wijze van afhandeling van de onderzochte afzonderlijke schadegevallen was nadrukkelijk geen onderdeel van het onderzoek.

4 Opzet van het onderzoek, onderzoeksmethodiek

4.1 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied zal beperkt blijven tot de omgeving van het Groningen veld waar schades aan gebouwen door diverse oorzaken (intern, gelegen in het gebouw incl. de fundering) of extern, gelegen in de omgeving) kunnen samengaan met de gevolgen van mijnbouwactiviteiten, zoals diepe en ondiepe bodemdaling, wijzingen in het (grond)waterpeil en geïnduceerde bevingen, en/of de gevolgen van waterpeilwijzigingen, afzonderlijk of in samenhang.

Zoals gesteld gaat het bij deze studie om complexe schades. Bij de selectie van cases voor het onderzoek speelt dus een belangrijke rol of bij (eerdere) beoordeling onduidelijk is (gebleven) of externe oorzaken door mijnbouwactiviteiten, zoals zettingen eventueel in combinatie met de aardbevingen een rol hebben gespeeld en welke rol zij mogelijk hebben gespeeld. Ook zullen enkele cases worden meegenomen en beoordeeld waar nauwelijks invloed of juist een grote invloed van mijnbouwactiviteiten wordt vermoed (op grote en op kleine afstand van bevingengebied en bodemdalingsgebied). Dit wordt gedaan om de consistentie van de methodiek te toetsen.

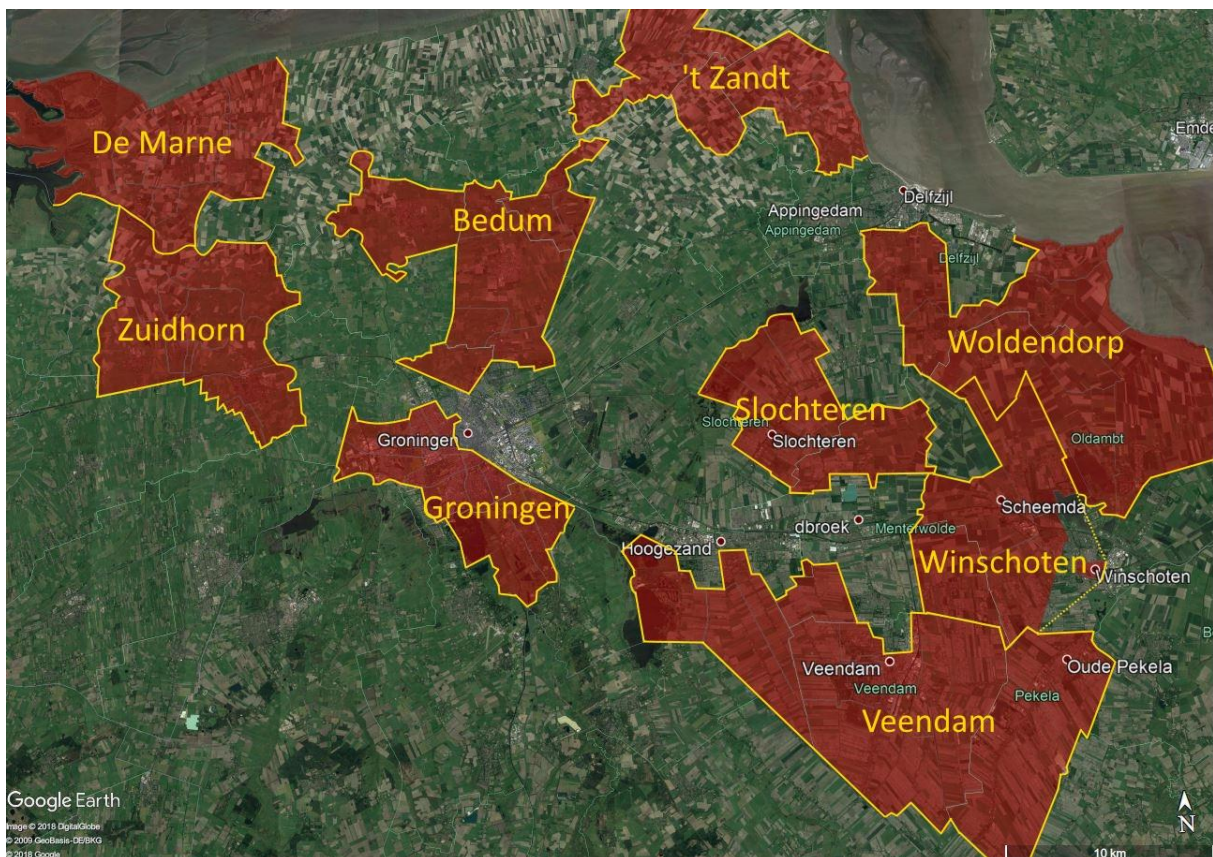
De scope van het onderzoek wordt daarom ook bepaald door de omstandigheid dat bouwkundige schade zou kunnen zijn ontstaan door:

- a) mijnbouwactiviteiten in de omgeving, die aanleiding geven tot bijvoorbeeld diepe of ondiepe bodemdaling, en/of
- b) al dan niet in combinatie met wijzigingen in het (grond)waterpeil, en/of
- c) geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning.

Daarmee wordt zoekgebied in grote lijnen bepaald door:

- a) het invloedgebied van de aardbevingen als gevolg van de gaswinning in het Groningenveld, met inbegrip van het centrale deel er van waar aardbevingen een dominante schadeoorzaak zijn.
- b) specifieke gebieden waar wijzigingen in het (grond)waterpeil zijn opgetreden en/of diepe of ondiepe bodemdaling plaatsvindt als gevolg van mijnbouwactiviteiten.

Het invloedgebied van de mijnbouwactiviteiten in combinatie met de aardbevingen kan niet worden vastgesteld op basis van objectieve criteria. Op voorstel van NCG wordt het onderzoek gericht op c.q. beperkt tot de volgende gemeenten: De Marne (zoals Ulrum), Winsum, Bedum (zoals Onderdendam, Terlaan en Oude Wolddijk), Eemsum, Loppersum, Delfzijl (zoals Wagenborgen, Termunten, Termunterzijl, Meedhuizen, Woldendorp en Borgsweer), Appingedam, Slochteren, Ten Boer, Hoogezand-Sappemeer (zoals Kielwindeweer en Kropswolde), Menterwolde (zoals Korengarst en Meeden), Groningen (G12) en op de gemeenten Oldambt (zoals Nieuwolda), Zuidhorn (zoals Grijpskerk, Niehove, Oldehove en Kommerzijl), Bellingwedde, Pekela, Veendam en Haren. De kern Moddergat wordt ook meegenomen. Het onderzoeksgebied betreft dus het 'aardbevingsgebied' en de randen rond de voormalige contour. Figuur 4.1 toont de onderzoeksgebieden.



Figuur 4.1: Overzicht van de ligging van de negen onderzoeksgebieden in deze studie

4.2 Onderzoeksubjetten

Het onderzoek baseert zich op door of via NCG aan te geven en aan te leveren gedocumenteerde schades, waarin 1) een bouwkundige opname of vastlegging van de schade heeft plaatsgevonden en waar 2) reeds een analyse van de schades of het schadebeeld heeft plaatsgevonden en 3) in het desbetreffende onderzoek of tussen verschillende onderzoeken die op dezelfde casus betrekking hebben onduidelijkheid is gebleven of gebleken over de werkelijke relevante schadeoorzaken. Het onderzoek betreft dus reeds gedocumenteerde schades. Deze keuze is gemaakt, om op basis van gerapporteerde schade, gebouwtypologie en ligging een gerichte selectie van onderzoeksobjecten te kunnen maken.

Aan deze voorwaarde voldoen naar verwachting de 70 cases van het Arcadisonderzoek 'schade buiten de contour' die onderwerp van review waren in de Validatiestudie Fase 1 en de bijna 1800 gevallen in het buitengebied, waar vervolgens de schade is opgenomen door Witteveen en Bos. Daarnaast stond het onderzoek open voor aanmelding door de klankbordgroep en de begeleidingsgroep van het onderzoek. Tenslotte kunnen ook schadegevallen aan de randen van de contour of buiten de contour worden beschouwd, mogelijk ook uit andere schadebeoordelingstrajecten, zoals TCBB. Voorwaarde is steeds dat het over voldoende gedocumenteerde schadegevallen gaat, waar ten minste een bouwkundige/schade opname heeft plaatsgevonden.

4.3 Clustering van objecten

Het is van belang bij dit onderzoek dat de kenmerken van de onderzoeksobjecten systematische worden behandeld. Immers, bij de selectie van de cases is van belang dat niet een willekeurige verzameling schadegevallen ontstaat, maar dat in de verzameling voldoende structuur is aangebracht in termen van (onder meer):

- de clustering van gebouwen per locatie (9 ruimtelijke clusters)
- typen gebouw (4 categorieën)
- ouderdom gebouwen (4 categorieën)
- funderingswijze
- patronen van bouwkundige schade
- afstanden van gebouwen ten opzichte van bevingscentra
- afstanden van gebouwen ten opzichte bodemdalingsgebieden

De gewenste mogelijkheid om op basis van gebouwkenmerken, schadekenmerken en ligging te selecteren, vergt dus een inhoudelijke a priori beoordeling van de aangeleverde schadegevallen. Om die reden is de selectie in twee stappen gedaan.

Als eerste stap en op basis van een meer globale screening zal gelet worden op het samenstellen van een voldoende brede portfolio van op metaniveau gelijksoortige objecten en zal ook gelet worden op dominante schadepatronen en potentiële oorzaken.

Om in termen van ligging, omstandigheden en potentiële oorzaken van mijnbouwactiviteiten de gewenste spreiding te verkrijgen, zijn aan het begin van het onderzoek een aantal ruime gebieden in de provincie gezocht, met:

- Verschil in opbouw en omstandigheden van de ondiepe ondergrond
- Verschil in afstand tot het gebied met de epicentra van de bevingen en dus de sterkte van de bevingen
- Verschil in afstand of juist nabijheid bij andere mijnbouwactiviteiten (mineralenwinning, gasopslag in gasvelden, gasopslag in zoutcavernes)
- Verschil in ligging in het bodemdalingsgebied van het Groningenveld gelet op wijzigingen in de geohydrologische omstandigheden (aanpassing waterpeilen)
- Voldoende ruimtelijke dekking over het onderzoeksgebied in de provincie Groningen
- De aanwezigheid van bijzondere omstandigheden, zoals terpen of wierden

Dit heeft in een vroeg stadium van het onderzoek geleid tot een keuze van 9 ruimtelijke clusters in de provincie Groningen. Binnen die ruimtelijke clusters zijn de onderzoeksobjecten gezocht. Bijlage 1 bevat de beschrijving van de ruimtelijke clusters, inclusief de aanduiding van de desbetreffende postcodegebieden.

4.4 Selectieproces objecten

Er is naar gestreefd per onderzoeksgebied opnamerapporten van circa 15 objecten beschikbaar te hebben. Gestart is met de objecten die door leden van de klankbordgroep, de begeleidingsgroep, het NCG Bureau (complexe schades) en de TCBB zijn aangeleverd. In 7 van de 9 gebieden is deze lijst aangevuld met een willekeurige selectie uit de recent onderzochte schadegevallen in het buitengebied, zodat per gebied een lijst van 30 objecten beschikbaar was.

NCG heeft aan de bewoners/eigenaren van deze objecten schriftelijk gevraagd toestemming te verlenen voor het onderzoek. Het onderzoek per ruimtelijk clusters is gestart zodra 15 of meer toestemmingsbrieven waren ontvangen.

Het streven is naar 15 objecten per onderzoeksgebied (ca. 135 in totaal). In het geval dit aantal niet werd gehaald, is een aanvullende selectie gemaakt van schadeadressen buiten en binnen de contour (in de desbetreffende deelgebieden), totdat het aantal van 15 per deelgebied is bereikt. Deze aantallen zijn gekozen om het onderzoek qua omvang hanteerbaar te houden. De desbetreffende opnamerapporten zijn door NCG vervolgens opgevraagd bij CVW, of bij andere partijen waar de rapporten beschikbaar waren.

Alle 15 cases per gebied zijn individueel beoordeeld op de kwaliteit van de schade opnamerapportage. Dit is een absoluut toelatingscriterium. Indien de kwaliteit van de rapportage op één of meer onderdelen onvoldoende is, kan de case niet in onderzoek worden genomen. Vervolgens is gelet op de aard van de schade en het schadebeeld en op de aanwezigheid van bijzondere omstandigheden. Dit zijn criteria die tot preferentie aanleiding kunnen geven. Tenslotte is over het geheel van de cases in een gebied bezien of de variëteit in gebouwtype en bouwjaarklasse voldoende is.

Schade opnamerapportage

- a) Er moet een schade opnamerapportage beschikbaar zijn (is er ten minste één opnamerapport).
- b) Het schade opnamerapport moet bruikbaar zijn voor het onderzoek. Dit is primair beoordeeld op de kwaliteit van de beschikbare schadeopname rapportages. De rapportage moet aan alle onderstaande drie criteria voldoen:
 - overzichtsfoto's van gevelvelden, muurvelden of overige constructieonderdelen (vloeren, kelders, plafonds, dak- of afbouwconstructies)
 - gedetailleerde en voldoende scherpe foto's van de afzonderlijke schades, waarop de schade en zijn verschijningsvorm goed zichtbaar is.
 - foto's waarop de schade in het gebouw of in gevelvelden, muurvelden etc. goed te lokaliseren is.

Schade en schadebeeld

- c) Er moet in ieder geval schade aan de binnen of buitenzijde van het gebouw zichtbaar zijn
- d) Cases met meerdere schades en met een divers schadebeeld hebben de voorkeur boven cases met weinig schades.
- e) Cases met een grote representativiteit qua lay-out en opbouw voor veel voorkomende panden hebben de voorkeur boven unieke of zeer complexe cases.

Bijzondere omstandigheden

- f) Objecten waar bijzondere omstandigheden aanwezig zijn (bijvoorbeeld ligging op wierde, bijzondere funderingsomstandigheden of bijzondere grondwaterstand situaties) hebben de voorkeur.
- g) In het totaal van de cases per gebied moet voldoende variëteit zijn in bouwtypes en bouwjaarklasse

Hiertoe zijn de volgende bouwtypes onderscheiden:

- Vrijstaande woning

- Rijtjeswoning
- Appartementen
- Twee onder één kap woning

Daarnaast zijn de volgende bouwjaarklassen onderscheiden:

- Voor 1900
- Tussen 1900 en 1940
- Tussen 1940 en 1970
- Na 1970

Het beperkte aantal cases in een gebied brengt met zich mee dat in één gebied niet alle combinaties van gebouwtypes en bouwjaarklassen aanwezig kunnen zijn.

Op basis van de schriftelijke rapportages en bovenstaande criteria is de verdere selectie per ruimtelijk cluster uitgevoerd.

4.5 Opzetten van een generieke beoordelingsprocedure

Transparant, uniforme en gestroomlijnd proces

Het is van groot belang dat de uiteindelijke beoordeling van de schades plaatsvindt in een uniform en gestroomlijnd proces, waarbij de input van afzonderlijke deskundigen in een multidisciplinair teamproces op een traceerbare en transparante wijze leidt tot oordeelsvorming.

Als eerste stap is daarin omschreven wat wel en wat niet in het kader van deze studie onder schade wordt verstaan. Het onderzoek richt zich primair op schade aan gebouwen en bouwwerken. Het gaat over (of combinaties) van waarneembare schade, zoals scheuren (duidend op een blijvend verlies aan samenhang), blijvende vervormingen (zonder verlies aan samenhang) en blijvende positieveranderingen (zoals scheefstand of zetting). Daarnaast kan schade geclassificeerd worden in termen van zijn gevolgen, als constructieve of niet-constructieve schade, esthetische schade, schade met impact op gebruikswaarde of op levensduur.

Voor de beoordeling van schade en oorzaken is een methodologie opgezet. Daarbij is aansluiting gezocht bij een methodiek die door TNO [4.1] is opgesteld in opdracht van Commissie Bodemdaling door Gaswinning en een systematiek op basis van koppeling schadepatroon aan mogelijke oorzaken en toetsing van noodzakelijke condities, zoals door De Vent [4.2] is opgesteld. Vanuit hun ontstaan hebben beide methoden specifieke eigenschappen en voordelen. Voor dit onderzoek zijn die beide aanpakken zo veel mogelijk samengebracht.

De context van schade

Schade (bijvoorbeeld scheuren in een muur) doet zich voor in een context van een gebouw. Het gebouw ondervindt invloeden van zijn context, de omgeving. Het is van groot belang dat de context van het gebouw (ruimtelijke structuur, geometrie, toegepaste materialen, fundering, krachtswerking) goed bekend is. Dit zijn gegevens uit het ontwerp en bouwstadium, van eventuele bouwkundige aanpassingen en verbouwingen, maar ook gegevens over de huidige staat en stand van een gebouw. Evenzo is van belang een goed begrip te hebben van de invloeden die vanuit de omgeving kunnen hebben bestaan op het gebouw. Daartoe is goed inzicht nodig in de ondiepe ondergrond (funderingsgrondslag), de geo hydrologie (grondwaterstanden), wijzigingen in bestemming van de omgeving (bijv. aanleg (spoor)wegen, gebouwen), invloeden vanuit het gebruik van infrastructuur of

naburige gebouwen (bijv. trillingen) etc. Voor een eenduidige methodiek is in kaart gebracht welke gegevens van de context voor de beoordeling ten minste nodig zijn.

Scenario's als basis voor de beoordeling

Mogelijke oorzaken van schade op basis van gebouwkenmerken en omgevingskenmerken worden in kaart gebracht en waar deze niet aan de orde kunnen zijn uit de analyse verwijderd. De kern van de beoordeling is het werken met scenario's. Scenario's zijn vanuit de context van gebouw en omgeving mogelijke oorzaken of combinaties van meerdere oorzaken. Deze scenario's worden geverifieerd of gefalsificeerd. De methode besteedt specifiek aandacht aan scenario's met een combinatie van meerdere oorzaken.

Stapsgewijze en multidisciplinaire aanpak

De opgestelde methodiek is eerst bij wijze van proef op een klein aantal gebouwen toegepast. Met die eerste ervaring is vervolgens de documentatie van alle panden voorbereid en is de beoordeling van alle schades uitgevoerd. De beoordeling van de schades is uitgevoerd door een team met multidisciplinaire achtergrond, waaronder ten minste bouwkundige of constructieve kennis en funderingstechnische kennis.

4.6 Onderzoek naar de schade aan de objecten en de context in het gebouw

Van alle geselecteerde cases zijn de dossiers van Bouw- en Woningtoezicht van desbetreffende gemeente opgevraagd. In de regel zijn daardoor bouwtekeningen, constructietekeningen en gegevens van funderingsontwerp en grondonderzoek beschikbaar. Voor 7 oudere panden ontbraken deze gegevens.

Op basis van de beschikbare schadeopname rapporten een beoordeling uitgevoerd of aanvullend onderzoek a priori nodig is.

Indien de opnamerapporten onduidelijkheden bevatten over de schade of over de context van de schade, is indien nodig een aanvullende schadeopname ingepland. In de regel is dit gerichte aanvullend onderzoek, waarbij niet opnieuw de schade in het pand volledig is opgenomen en vastgelegd. Deze aanvullende opname is, indien nodig, uitgevoerd in aanvulling op het onderzoek ter plaatse bij 50 van de 69 cases.

4.7 Onderzoek naar de zettingen van een gebouw

Omdat uit de schade opnamerapporten in veel gevallen het beeld naar voren komt dat zettingen van de fundering een rol zouden kunnen spelen bij het ontstaan van de schade zijn bij alle objecten in het onderzoek lintvoegwaterpassingen uitgevoerd. Bij een lintvoegwaterpassing wordt de hoogteligging van een horizontale voeg van het metselwerk, een zgn. lintvoeg, langs de omtrek van het pand ingemeten. Omdat de lintvoegen altijd horizontaal en waterpas worden aangebracht tijdens de bouw, geven hoogteverschillen die nu in de lintvoeg worden aangetroffen een goede indicatie of en in welke mate verschilzettingen zijn opgetreden. De lintvoegwaterpassingen zijn in opdracht van TU Delft uitgevoerd door gespecialiseerde bedrijven.

4.8 Onderzoek naar de fundering en funderingsgrondslag van een gebouw

Indien uit de documentatie onvoldoende duidelijkheid ontstond over de wijze van fundering (bijvoorbeeld onduidelijkheid over funderingstype, aanlegdiepte et cetera) en indien de resultaten van de zettingsmetingen daartoe ook aanleiding gaven, is een aanvullende funderingsinspectie uitgevoerd door de fundering tot aanlegniveau uit te graven. Dit is gedaan in combinatie met ondiep grondonderzoek in de vorm van een handboring. Deze vorm van aanvullend onderzoek is uitgevoerd in 50 gevallen door het onderzoeksteam zelf.

4.9 Inventarisatie van de context van de omgeving van de objecten

Bij ieder adres is een algemeen omgevingsonderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek omvat de vastlegging van het historisch ruimtegebruik en de bebouwings- en gebruikshistorie van de omgeving van het gebouw op basis van openbare informatie (topografische kaarten, luchtfoto's).

Voorts is op basis van DINO-loket nagegaan welke gegevens van de ondiepe ondergrond beschikbaar zijn. Dit betreft samenstelling van de ondiepe ondergrond en de grondwaterpeilen ter plaatse. Indien uit openbare registers en andere openbare informatie te weinig informatie kon worden verkregen over de ondergrondsituatie ter plaatse, is aanvullend grondonderzoek uitgevoerd in de vorm van een sondering en een boring per pand. Dit aanvullend grondonderzoek is uitgevoerd in 50 gevallen.

Bij de twee waterschappen in Groningen (Hunze en Aa en Noorderzijlvest) zijn gegevens opgevraagd over de uitgevoerde peilaanpassingen in het verleden. Voor objecten die zijn gelegen in gebieden met peilaanpassing is deze informatie gericht onderzocht.

Specifiek is aandacht besteed aan ligging van infrastructuur (wegen, spoorwegen), in het verleden uitgevoerde bouwwerkzaamheden en ligging van industriële bestemming met het oog op de verstoring die deze voor het desbetreffende object kunnen opleveren.

4.10 Onderzoek naar de trillingen als gevolg van de historische bevingen

Het afgelopen jaar zijn de data van het KNMI en TNO monitoringnetwerk opnieuw onderzocht om daaruit gegevens af te leiden over de aard en sterkte van de aardbevingsbelasting op de locaties van de onderzochte panden. Eén studie is uitgevoerd door Bommer et al [4.4, 4.5], en een andere studie is in opdracht van NCG uitgevoerd door TNO [4.3]. Het betreft onderzoek zowel naar de bevingen die zijn waargenomen door het sensornetwerk (dus relatief recente bevingen) als bevingen van voor de tijd dat het sensornetwerk actief was. In deze studies zijn gekwantificeerde schattingen gemaakt van de opgetreden dynamische belasting, inclusief een kwantificering van de onzekerheidsmarges.

De resultaten van deze twee studies bieden een goede basis voor een nauwkeuriger inschatting van de invloed van trillingen op gebouwen. Deze informatie was nog niet beschikbaar en is nog niet eerder betrokken bij de onderzoeken van Arcadis [4.6] en Witteveen en Bos [4.7] in het buitengebied.

4.11 Onderzoek naar de bodembewegingen op basis van InSAR

Momenteel wordt het gaswinningsgebied (en daarmee de aardbevingsregio) Groningen systematisch waargenomen met drie radar-satelliet systemen². Met behulp van deze data kan de bodemdaling in het gaswinningsgebied worden gemonitord tot op het niveau van enkele millimeters. Deze gegevens worden door een commerciële partij verwerkt in opdracht van de NAM. De parametrisatie van de bodemdaling is meestal gegeven in relatieve bodemdalingssnelheden, in millimeters per jaar. Door de frequente (wekelijkse) metingen in de tijd, bevatten deze data echter ook potentieel informatie om de gevolgen van aardbevingen voor bebouwing en infrastructuur in kaart te brengen. Deze mogelijkheid is tot op heden niet onderzocht, maar zou van belang kunnen zijn (i) voor het vaststellen van oorzaak-gevolg relaties m.b.t. aardbevingen en schade, en (ii) om begrip te krijgen voor de ‘natuurlijke dynamiek’ van de bodem, d.w.z. zonder dat er sprake is van aardbevingen.

In dit deelonderzoek is, gebruik makend van reeds verwerkte radar-data, een analyse uitgevoerd op deze InSAR tijdseries. Met inbegrip van een verbeterde kwaliteitsbeschrijving van de data is de deformatie bepaald: (i) een generieke kwantificering van verticale zetting, (ii) helling(verandering) en (iii) eventuele krommingsverandering van de directe omgeving van een object. Voor een beperkt aantal objecten is nagegaan of instantane deformaties ten gevolge van aardbevingen in het object kunnen worden gedetecteerd.

4.12 Onderzoek naar de invloed van bodembewegingen op de spanningen in gebouwen

Een belangrijk onzekerheid is in hoeverre de schades door andere oorzaken of reeds aanwezige schades invloed hebben op het incasseringsvermogen van panden voor andere externe invloeden, zoals (herhaalde) bevingen of additionele zettingen. Incasseringsvermogen zoals hier bedoeld, heeft hier geen betrekking op de uiteindelijke bezwijkweerstand van een bouwkundige object maar op de weerstand om aanvullende externe invloeden schadevrij of met zeer geringe schade te doorstaan. Bij reeds aanwezige schades in combinatie met andere externe invloeden zoals herhaalde bevingen, spelen cumulatieve-, superpositie-, en degradatie-effecten mogelijk een rol. Er is weinig informatie beschikbaar over de additionele spanningen die kortstondige dynamische belastingen zoals aardbevingen opleveren in Nederlandse gebouwen in metselwerk, dus aanvullend op de spanningsverdeling die al aanwezig is onder invloed van eigen gewicht, inventaris of bijvoorbeeld reeds eerder opgelegde vervormingen (bijv. door bodemdaling, variatie grondwaterstand). Daarom zullen kwantitatieve analyses voor een beperkt aantal karakteristieke schadebeelden worden gemaakt.

Met het oog op het rekenkundig vaststellen van de invloed van trillingen op reeds aanwezige schadepatronen, zullen een beperkt aantal karakteristieke gevelvlakken met de eindige-elementenmethode worden gemodelleerd. Met behulp van deze rekenmodellen zal worden bepaald hoe gevoelig deze gevelvlakken zijn voor spanningen als gevolg van een in de tijd en ruimte variërende belasting, die de aardbeving simuleert, in combinatie met spanningen door eigen gewicht en eventuele zettingen. De grootte van de belasting en de herhaling van de trillingen zullen

² TerraSAR-X, Radarsat-2, en Sentinel-1

invloedparameters zijn. Gelet op het oriënterend karakter van de berekening, worden deze beperkt tot lineair-elastische analyses.

Indien dominante schadebeelden in de gevelvlakken aanwezig zijn, waarbij scheuren open staan, kan eventueel ook een gescheurde situatie worden gemodelleerd of gesimuleerd en aan bovengenoemde analyse worden onderworpen. De verkregen inzichten ondersteunen de beoordeling van resultaten van visuele inspectie van de scheurpatronen.

5 Classificatie van schadeoorzaken in gebouwen

5.1 Inleiding

Bouwconstructies en gebouwen worden ontworpen op basis van normen en richtlijnen om duurzaam weerstand te bieden tegen de daarop werkende belastingen met een voldoende kleine kans op bezwijken. Zij moeten immers voldoende veilig zijn.

De ontwerpuitgangspunten en voorwaarden waaraan een goed ontwerp moet voldoen vormen daarmee het startpunt voor mogelijk oorzaken van schade vanuit het gebouw zelf. Het is denkbaar dat het ontwerp vanaf het begin niet (volledig) aan de gestelde voorwaarden voldoet.

Ook is het mogelijk dat het ontwerp door later aangebrachte wijzigingen niet meer aan de gestelde voorwaarden voldoet. Ook wijziging in eigenschappen van een gebouw in de loop van de tijd (denk bijvoorbeeld aan veroudering, corrosie van stalen onderdelen of aantasting van houtconstructies) kunnen aanleiding zijn tot het niet meer voldoen aan deze voorwaarden.

Het gebruik van een constructie kan zodanig zijn, dat dit situaties creëert die buiten de oorspronkelijke uitgangspunten liggen. Denk hierbij aan overbelasting van vloeren of van dragende balken.

Ook kunnen er situaties zijn (geweest) waarin zogenaamde bijzondere belastingen zijn opgetreden, waarbij gedacht kan worden aan explosies, impact van bliksem, aanrijdingen etc. waarop een bouwconstructie niet expliciet ontworpen is of extreme situaties zoals brand, waarbij (een deel van) de bouwconstructie is beïnvloed.

Het bovenstaande veronderstelt dat schadeoorzaken vanuit het gebouw tamelijk eenduidig toetsbaar zouden moeten zijn op basis van de ontwerpuitgangspunten en de voorwaarden waaraan een ontwerp zou moeten voldoen.

Een complicerende factor is dat niet alle onderdelen van een gebouw expliciet ontworpen werden of worden op basis van een sterkteberekening. In het verleden werden bijvoorbeeld vaak vuistregels gehanteerd voor de dikte van muren, de overspanning van een sparring in een gevel, de dikte van een lateibalk etc. Volgens de huidige opvattingen worden tegenwoordig voor dergelijke ontwerpaspecten steeds vaker ontwerpberekeningen gemaakt.

Maar ook dan zijn er nog invloeden die vaak niet rekenkundig worden getoetst. Hiertoe kunnen we rekenen de invloed van het vochtgehalte in bouwmaterialen en de krimp die vaak optreedt in bouwmaterialen geruime tijd na de bouw. Ook wisselingen van vochtgehalte kunnen aanleiding geven tot spanningen doordat de rek die door de wijziging in vochtgehalte optreedt, door andere constructieonderdelen wordt belemmerd. Dit wordt verhinderde vervorming genoemd. Het verschijnsel verhinderde vervorming kan ook optreden als gevolg van temperatuurswisselingen.

Daarnaast kunnen ook vervormingen aan een onderdeel van een bouwconstructie worden opgelegd, doordat het onderdeel bijvoorbeeld rust op een ander onderdeel dat doorbuigt of vervormt. Deze opgelegde vervormingen veroorzaken ook spanningen in de bouwconstructie.

Ook zijn de ontwerpinzichten in de loop der jaren aan verandering onderhevig geweest. Zo zijn sinds de invoering van de eerste Woningwet in 1902 de ontwerprichtlijnen voor de belasting op vloeren herhaaldelijk gewijzigd (in de regel verhoogd) en zijn bijvoorbeeld ook de aan te houden waarden van de veranderlijke belasting door wind verhoogd. Met het ontstaan van meer inzicht in de krachtwerving in gebouwen en in de sterkte-eigenschappen van constructiematerialen, zijn ook nauwkeuriger bepalingsmethoden geïntroduceerd voor het dimensioneren van bouwconstructies. Ook de veiligheid van de bouwconstructie zoals die wordt beoogd, is in de afgelopen decennia veel nauwkeuriger vastgesteld en in het kielzog daarvan zijn diverse modellerings- en berekeningsmethodieken ontstaan.

In dit hoofdstuk worden de diverse schadeoorzaken vanuit het gebouw geïntroduceerd om een context te bieden bij het interpreteren van schadebeelden en voor het begrip van de mechanismen die tot schade kunnen leiden. Hierbij wordt in hoofdlijn de methodiek gevolgd, die door TNO is voorgesteld voor de beoordeling van gebouwschades [5.1], zoals samengevat in tabel 15.1

5.2 Invloed van belastingen op het gebouw/de bouwconstructie

5.2.1 Belastingen binnen de reguliere ontwerpuitgangspunten

De belastingen die op een gebouw of bouwconstructie werkzaam zijn kunnen onderverdeeld worden in:

- Belastingen door eigen gewicht of rustende belasting
- Veranderlijke belastingen in het gebouw (inventaris, meubilair, aanwezigheid van personen, het belopen van vloeren)
- Veranderlijke belastingen op het gebouw (windbelasting, sneeuwbelasting)
- Bijzondere belastingen (impact door aanrijdingen, explosies etc) vallen buiten de reguliere ontwerpuitgangspunten, zie paragraaf 6.2.4.

Belastingen leiden tot spanningen in de bouwconstructie. Denkbaar is dat de bouwconstructie onder deze reguliere belastingen niet aan de ontwerpuitgangspunten voldoet. We spreken dan over onvoldoende weerstand (A.1).

Deze 'onvoldoende weerstand' kan zijn oorzaak vinden in verschillende fasen en aanleidingen:

- Initieel, dus bij de bouw (er is dan sprake van een ontwerpfout of een uitvoeringsfout) (A.1.1)
- In de loop van de gebruiksfase, bij of door wijzigingen in de bouwconstructie (er is dan eveneens sprake van een ontwerp of uitvoeringsfout) (A.1.2)
- In de loop van de gebruiksfase als gevolg van veroudering of verzwakking van de bouwconstructie zijn ontstaan (dit is een beheers- of onderhoudsissue) (A.1.3)

Tabel 5.1: Classificatie van oorzaken van gebouwschade³ [5.1]

	Groep		omschrijving	oorzaak
A	Belastingen	A1	weerstand onvoldoende	A.1.1 Initieel
				A.1.2 Verbouwing
				A.1.3 Veroudering
		A2	overbelasting vanuit gebruik (statisch)	A.2.1 Normale gebruik
				A.2.2 Veranderd gebruik
				A.2.3 Verbouwing/uitbreiding
		A3	overbelasting (trillingen)	A.3.1 Wegverkeer
				A.3.2 Treinverkeer
				A.3.3 Bouwactiviteiten in omgeving
				A.3.4 Industriële activiteiten
				A.3.5 Aardbevingen
		A4	Incidentele overbelasting	A.4.1 Impact van voorwerpen
				A.4.2 Explosie
				A.4.3 Regen-/sneeuwval
				A.4.4 Storm
				A.4.5 Blikseminslag
B	Vervormingen	B1	verhinderde vervormingen	B.1.1 Initieel
				B.1.2 Verbouwing/uitbreiding
				B.1.3 Veroudering/aantasting
		B2	opgelegde vervormingen	B.2.1 Initieel
				B.2.2 Verbouwing/ uitbreiding
				B.2.3 Corrosie met metalen onderdelen
				B.2.4 Bomen en wortelgroei
C	Ongelijkmatige zettingen in de ondergrond	C1	autonome zettingen	C.1.1 Gelijkblijvende belastingen
		C2	verandering belasting op de ondergrond	C.2.1 Verbouwing/uitbreiding/veranderd gebruik
				C.2.2 Bebouwing
				C.2.3 Ophoging
				C.2.4 Ontgraving
				C.2.5 Weglichaam
				C.2.6 Spoorlichaam
		C3	verandering in ondergrond	C.3.1 Locale wijzigingen grondwaterstand
				C.3.2 wijziging gws door werkzaamheden
				C.3.3 Wijziging gws door peilbesluit
				C.3.4 Trillingen door wegverkeer
				C.3.5 Trillingen door spoorverkeer
				C.3.6 Trillingen door werkzaamheden
	C.3.7 Aardbevingen			
	C.3.8 Wijziging grondwaterstand door bomen			
		C.3.9 Diepe bodemdalingseffecten (rek, krommingen, scheefstanden)		
		C.3.10 Natuurlijk extreme variaties in grondwaterstand		

³ De elementen C3.8, C3.9 en C3.10 zijn aan de oorspronkelijke classificatie uit [5.1] toegevoegd.

Hierbij moet bedacht worden dat een onvoldoende sterkte die door een initieel gebrek (ontwerp- of bouwfout) wordt veroorzaakt, zich niet altijd direct bij oplevering of bij ingebruikname hoeft te tonen. Ook is denkbaar dat een initieel gebrek geen gebrek hoefde te zijn naar de inzichten van de tijd dat een gebouw is ontworpen en gebouwd.

5.2.2. Belastingen buiten de ontwerputgangspunten (overbelasting door regulier gebruik)

Het is mogelijk dat er belastingen zijn opgetreden die buiten de ontwerputgangspunten vallen. In dat geval spreken we van overbelasting. (A.2)

De overbelasting kan hebben plaatsgevonden binnen de normale gebruikscontext van een gebouw of bouwconstructie. Te denken valt aan de overbelasting van een vloer. (A.21)

Ook is mogelijk dat de gebruikscontext van een gebouw is veranderd en dat de belastingen daardoor buiten de oorspronkelijke ontwerputgangspunten vallen. Hierbij te denken aan een zolder die is opgewaarderd tot verblijfsruimte waardoor veel hogere belastingen optreden. (A.22)

Tenslotte is het denkbaar dat overbelasting wordt veroorzaakt doordat de constructie in de loop der tijd is gewijzigd. (A.2.3). Feitelijk is hier sprake van een nieuw initieel gebrek, dat dateert van de wijziging.

5.2.3 Dynamische belastingen (trillingen)

Trillingen in gebouwen ontstaan doordat zij bijvoorbeeld via de bodem- en funderingsgrondslag aan een gebouw worden opgelegd of door gebruiksprocessen in een gebouw (machines, belopen van vloeren, sluiten van deuren etc.). Trillingen leiden tot spanningswisselingen in de bouwconstructie.

Gebouwen kunnen weerstand bieden tegen trillingen, omdat zij zijn ontworpen om diverse andere belastingen te weerstaan. Dit geldt in het bijzonder voor vloerconstructies. Deze moeten doorgaans al een grote belasting dragen door eigen gewicht en ook een relatief hoge veranderlijke belasting. In die veranderlijke belasting is een toeslag verwerkt voor onder meer de dynamische eigenschappen van het belopen van vloeren. Ook worden met het oog op veiligheid van vloeren eisen gesteld aan de toelaatbare doorbuiging van vloeren onder de veranderlijke belasting. Ook die eisen leiden in de regel tot robuuste vloerconstructies, die daarbij ook een goede weerstand kunnen bieden tegen dynamische belastingen.

Andere onderdelen van gebouwen, zoals gevels en met name lichte interne scheidingswanden hebben door de reguliere ontwerpeisen minder robuustheid meegekregen.

Trillingen kunnen diverse oorzaken hebben zoals:

- Wegverkeer A.3.1
- Railverkeer A.3.2
- Bouwactiviteiten (heiwerkzaamheden, verdichtingsactiviteiten) A.3.3
- Industriële activiteiten (extern of intern) A.3.4
- Bevingen A3.5

Aan de gevoeligheid van bouwwerken voor trillingen wordt in hoofdstuk 7 meer aandacht besteed. De Nederlandse bouwvoorschriften hebben tot nu toe hierover geen bepalingen bevat, waardoor de weerstand tegen dynamische belastingen tot nu toe geen expliciet ontwerputgangspunt is geweest. De NPR 9998 is het eerste document met ontwerpregels voor de Nederlandse, specifiek de Groningse, omstandigheden als gevolg van aardbevingen.

5.2.4 Bijzondere belastingen

Hiertoe rekenen we belastingen door impact (A.4.1) bijvoorbeeld door aanrijdingen of stootbelastingen door een vallend object, belastingen door explosies (A.4.2) en bijzondere belastingomstandigheden door sneeuw (A.4.3 ophoping) of regenwater (A.4.3 accumulatie). Ook valt te denken aan windbelastingen boven de normwaarden (A.4.4) of blikseminslag (A.4.5)

In de afgelopen decennia zijn een aantal van deze bijzondere belastingen in de ontwerputgangspunten opgenomen. Dit geldt bijvoorbeeld voor de stootbelasting op balustradehekken en op vensters die een afscheiding vormen bij een groot hoogteverschil. Ook zijn in de reguliere veranderlijke belastingen voor sneeuw bepalingen opgenomen die rekening houden met ophoping van sneeuw. Tenslotte zijn, met name voor platte daken, rekenregels opgesteld ter voorkomen van overbelasting en bezwijken als gevolg van wateraccumulatie.

De invloeden van aanrijdingen en explosies worden voor woningen echter ook nu nog niet door de bouwvoorschriften gedekt. Of schade is opgetreden als gevolg van deze bijzondere belastingen, moet daarom per geval specifiek worden beoordeeld op basis van de weerstand die de constructie (op basis van andere overwegingen) door zijn vorm, afmetingen en eigenschappen tegen een bijzondere belasting kan bieden. In het algemeen wordt schade als gevolg van een bijzondere belasting in zekere mate geaccepteerd, zolang dit de veiligheid voor personen niet beïnvloedt. Impliciet uitgangspunt is natuurlijk dat schade door bijzondere belastingen kan worden hersteld.

5.3 Opgelegde vervormingen en verhinderde vervormingen

In de praktijk is er veel onduidelijkheid over opgelegde (B.2) en verhinderde vervormingen (B.1) in bouwconstructies. Om die reden introduceren we hieronder een duidelijk perspectief.

- Bij verhinderde vervormingen zal het beschouwde onderdeel van een gebouw of bouwconstructies onder een bepaalde invloed (bijvoorbeeld verlenging of verkorting als gevolg van temperatuur of vocht) willen vervormen, terwijl een ander deel van de bouwconstructie dit verhindert.
- Bij opgelegde vervormingen wordt aan het beschouwde onderdeel van een gebouw of bouwconstructie door een ander deel van de bouwconstructie een vervorming opgelegd, waardoor het wordt gedwongen mee te vervormen. Dit leidt tot spanningen in de bouwconstructie.

In beide gevallen kan de oorzaak liggen in ontwerp en uitvoeringswijze van de bouwconstructie (dus initieel B.1.1/B.2.1), maar kan dit ook zijn ontstaan door latere aanpassingen, zoals verbouwingen of uitbreidingen (B.1.2/B.2.2), of kan het zijn ontstaan door veroudering of aantasting (B.1.3/B.2.3). Corrosie van bijvoorbeeld een lateibalk kan een opgelegde vervorming (uitzetting) creëren voor het metselwerk. Vaak lopen de omstandigheden door elkaar heen, want de uitzetting van de lateibalk onder invloed van temperatuur kan eveneens een opgelegde vervorming betekenen voor het metselwerk. Bij krimp van de lateibalk onder invloed van temperatuur is sprake van een door het metselwerk verhinderde vervorming van de balk. Het is daarom essentieel om het bouwdeel te beschouwen waarin de schade voorkomt, wanneer de keuze tussen opgelegde of verhinderde vervorming moet worden gemaakt. In sommige gevallen is dit verschil echter niet te onderscheiden.

Verhinderde vervormingen zijn een veel voorkomende oorzaak van (doorgaans) kleine schades in gebouwen. Dit komt met name voor bij steenachtige gebonden materialen zoals beton en kalkzandsteen die na verharding en binding een doorgaande uitdroging vertonen en daarbij in de

regel krimpen. Schade door krimp of uitzetting kan worden voorkomen door op passende afstanden in desbetreffende constructiematerialen dilataties aan te brengen, waar de lengteverandering door krimp kan worden opgevangen.

Er zijn verschillende mechanismen voor krimp bij bouwmaterialen met bindmiddelen zoals cement, beton en kalkzandsteen. Enkele voorbeelden:

- Chemische krimp of verhardingskrimp : Volumevermindering wanneer het volume van het resulterende geheel kleiner is dan het volume van de som van de afzonderlijke volumes.
- Plastische krimp : volumevermindering tijdens de plastische fase (bv beton)
- Temperatuurkrimp of thermische krimp : door afkoeling
- Hygrometrische krimp en uitzetting : vormverandering door het opnemen en afgeven van water
Uitdrogingskrimp of hydraulische krimp: vochtafgifte aan de omgeving, gevolgd door blijvende samentrekking van de poriën.

Het is ook mogelijk dat boomtakken of wortels een opgelegde vervorming geven op het bouwwerk (B.2.4).

5.4 Ongelijkmatige zettingen van de ondergrond/funderingsgrondslag

Een gebouw draagt zijn belasting af via de fundering, de funderingsgrondslag aan de ondergrond. Onder de fundering en in de ondergrond zal door deze belasting een verhoging van de korrelspanning in het bodemmateriaal optreden. Deze verhoging van de korrelspanning leidt tot samendrukken en dus tot volumevermindering.

Bij een funderingsontwerp waarbij muren via een verbrede funderingsvoet of strook direct op de funderingsgrondslag rusten, ontstaat door het gewicht en rustende belasting een (aanvullende) funderingsdruk ten opzichte van de verticale druk die op aanlegniveau van de fundering al in de bodem aanwezig was. Er treedt dan samendrukking en dus zetting op.

Deze samendrukking is tijdgebonden. Het samendrukkingsproces wordt bepaald doordat onder de grondwaterspiegel het water uit de poriën en ruimten tussen de korrel moet verdwijnen. De snelheid van dit proces wordt bepaald door de doorlatendheid van de bodem en wordt gekenmerkt door een consolidatiecoëfficiënt.

De bodem heeft de eigenschap te blijven vervormen onder de opgelegde belasting. Dit verschijnsel komt bij meer bouwmaterialen voor en wordt aangeduid als kruip. Specifiek voor de bodem wordt dit de seculiere zetting genoemd ter onderscheid van de primaire zetting die optreedt relatief kort na het aanbrengen van een belastingverhoging.

De zakking als gevolg van de door het gebouw toegevoegde belasting op de ondergrond wordt aangeduid als de autonome zakking (C.1). Indien de belasting vanuit het gebouw op de funderingsgrondslag niet gelijk verdeeld is of wanneer de elastische eigenschappen (zoals de samendrukkingsconstante) van de bodem over de afmeting van de fundering varieert, wat bij een inhomogene bodem kan voorkomen, kunnen ongelijkmatige zettingen optreden.

Daarnaast kunnen additionele zettingen ontstaan door een verandering van de belasting op de ondergrond (C.2), bijvoorbeeld door:

- Verbouwingen (hogere belasting op de fundering, C.2.1)
- Aanbouwen (hogere belasting op de funderingsgrondslag door een nabij gelegen gebouw, C.2.2)

- Ophogingen (levert een hogere belasting op de funderingsgrondslag, C.2.3)

Ook door ontgravingen (C.2.4) kan afname van zijdelingse steun ontstaan waardoor naast een ontgraving zettingen optreden.

Verder kunnen ingrepen op enige afstand van een gebouw ook nog aanleiding geven tot verhoging van de belasting op de ondergrond, bijvoorbeeld de aanleg van een weglichaam (C.2.5) of spoorlichaam (C.2.6).

5.5 Veranderingen in de ondergrond

Veranderingen van de eigenschappen van de ondergrond (C.3) kan ontstaan door wijzigingen in de grondwaterstand (verdroging of vernatting).

Verlaging van de grondwaterstand levert een verhoging van de korrelspanning in de bodem en zal daardoor leiden tot een zakkingsproces. Het is een vergelijkbaar proces als wanneer de bovenbelasting op de bodem wordt vergroot. Dit kan optreden bij blijvende ingrepen in de grondwaterstand (bijv. als gevolg van peilaanpassingen), maar ook als gevolg van werkzaamheden (bijv. bemaling van bouwputten) (C.3.1- C.3.3.)

Wijzigingen in de grondwaterstand kunnen ook de eigenschappen van het bodemmateriaal beïnvloeden, via het vochtgehalte. Dit is mogelijk bij klei en veen. Klei kan krimp vertonen bij verlaging van het vochtgehalte en zwellen bij verhoging van het vochtgehalte. Ook de sterkte-eigenschappen van klei kunnen door het vochtgehalte worden beïnvloed. Veen zal krimp vertonen bij verlaging van het vochtgehalte. Deze krimp is in beginsel blijvend. Daarnaast kan veen bij toetreding van zuurstof oxideren, hetgeen ook leidt tot blijvende krimp.

Voorts kunnen trillingen – bijvoorbeeld als gevolg van (spoor)wegverkeer, bouwwerkzaamheden of bevingen – tot verdichting en verweking (liquefaction) van de bodem leiden (C.3.4-C.3.7). Dit kan met name aan de orde zijn bij een zandige ondergrond.

In veel gebieden is de grondwaterstand sterk afhankelijk van de seizoensgebonden invloed van neerslag en verdamping. Bijzonder lokale invloed op de grondwaterstand kan worden uitgeoefend door nabij funderingen aanwezige (hoge) bomen. Deze kunnen in de zomerperiode voor lokaal sterke verlaging van de grondwaterstand zorgen (C.3.8). Los daarvan kan het verdampingspatroon in een extreem droge zomer ook leiden tot sterke verlaging van de grondwaterstand (C.3.10).

Ook kan het proces van diepe bodemdaling spanningen in de ondergrond veroorzaken, doordat de bodemdaling gepaard gaat met lokale kromming van het aardoppervlak en daarmee gepaard gaande horizontale rekken. Deze veranderingen van de (oorspronkelijk vlakke) bodem leveren voor een gebouw een opgelegde vervorming (C.3.9).

6 Methodologie schadeonderzoek bij meervoudige oorzaken

6.1 Inleiding

Doel van het onderzoek is om te bepalen wat de oorzaak is of oorzaken zijn van vastgestelde schade bij complexe gevallen (causaliteit) en in welke mate de oorzaken hebben bijgedragen aan het overschrijden van de sterkte bij het ontstaan van de schade (toerekenbaarheid). Het onderzoek heeft als veronderstelling dat er meervoudige oorzaken van de bouwkundige schade kunnen zijn en is er op gericht op die meerdere oorzaken in beeld te brengen en hun relatieve belang te duiden.

Dit hoofdstuk beschrijft de gevolgde aanpak voor het schadeonderzoek. Allereerst wordt in 6.2 toegelicht welke schade bij welk type constructie zal worden onderzocht. Vervolgens wordt in 6.3 de methodologie toegelicht, waarna in 6.4 wordt ingegaan op de criteria die van belang zijn voor het bepalen of een oorzaak relevant kan zijn.

6.2 Bouwkundige schade

In deze paragraaf wordt vastgelegd welk type constructie in deze studie zal worden beschouwd en welke typen schade zullen worden meegenomen.

6.2.1 Bouwwerken

Een bouwwerk kan gedefinieerd worden als “elke constructie van enige omvang van hout, steen, metaal of ander materiaal, die op plaats van bestemming hetzij direct of indirect met de grond verbonden is, hetzij direct of indirect steun vindt in of op de grond, bedoeld om ter plaatse te functioneren.” (model-Bouwverordening VNG).

Binnen de categorie bouwwerken vallen naast gebouwen ook ‘bouwwerken geen gebouw zijnde’ (Bouwbesluit art.1.2). Bij ‘bouwwerken, geen gebouw zijnde’ kunnen we denken aan tuinmuren, aanlegsteigers e.d. Een gebouw wordt gedefinieerd als een “bouwwerk, dat een voor mensen toegankelijke overdekte geheel of gedeeltelijk met wanden omsloten ruimte vormt.” (Woningwet art. 1.1). Gebouwen kunnen verschillende gebruiksfuncties hebben.

Conform bouwbesluit art. 1.1. is een bouwconstructie “elk onderdeel van een bouwwerk dat is bestemd om belasting te dragen.” Hierbij kunnen we denken aan vloeren, dragende muren, draagbalken van het dak etc. Een bouwwerk kan echter ook uit onderdelen bestaan die niet bestemd zijn om belasting te dragen zoals de afwerking en installaties.

Voor deze studie zal de focus zijn op schade aan bouwwerken, waarbij schade kan optreden in zowel de bouwconstructie als in de afwerking. In het vervolg van deze studie worden de begrippen bouwwerk en gebouw soms door elkaar gebruikt, omdat de meeste objecten die in deze studie worden beoordeeld gebouwen (met een woonfunctie) zijn. Tuinmuren en dergelijke zijn in strikte zin geen gebouwen maar bouwwerken en deze worden waar dit aan de orde is ook in de studie

meegenomen. Schades kunnen zowel aan de binnenzijde als aan de buitenzijde van een gebouw worden waargenomen; beide soorten zullen worden meegenomen.

6.2.2. Typen schade die in dit onderzoek worden meegenomen

In dit onderzoek worden de volgende drie vormen (of combinaties) van waarneembare schade meegenomen:

1. Scheuren (duidend op een blijvend verlies aan samenhang)
2. Blijvende vervormingen (zonder verlies aan samenhang)
3. Blijvende positie veranderingen (zoals scheefstand of zetting)

Bij visuele inspecties vallen scheuren en grote vervormingen het meeste op. Meestal gaan grote vervormingen bij bouwwerken in metselwerk of andere steenachtige materialen gepaard met scheuren. Voor met het oog waarneembare schade gaat dus de eerste aandacht uit naar scheuren. Bij het aantreffen van scheuren zal ook aandacht worden besteed aan vervorming van de onderdelen waar de scheuren optreden.

In de praktijk blijkt dat het zeer vaak voorkomt dat er kleine scheuren zitten in afzonderlijke stenen en die beperkt blijven tot de afzonderlijke steen. Deze scheuren zijn vaak al vanaf de bouw aanwezig. Dit is een reden om deze scheuren buiten beschouwing te laten in dit onderzoek, tenzij er zeer specifieke redenen zijn om ze wel mee te nemen.

Andere waarneembare vormen van schade, zoals verkleuringen of waterdoorslag worden niet meegenomen in dit onderzoek, tenzij er concrete aanwijzingen zijn dat dit wordt veroorzaakt door scheuren, blijvende vervormingen of blijvende positieveranderingen.

6.2.3 Brede definitie van bouwkundige schade

Schade kan in abstracte zin worden gedefinieerd als een waarneembare uiting van het niet voldoen aan functionele eisen, op het gebied van veiligheid, gezondheid, bruikbaarheid en esthetica [6.2].

In lijn hiermee geeft De Vent een definitie voor constructieve schade in metselwerk: “schade die, in de vorm van scheurvorming, vervormingen of scheefstand, lijkt te wijzen op een gebrek aan sterkte, stijfheid of stabiliteit. Het verschil met andere soorten schade is dat constructieve schade niet alleen esthetische of functionele gevolgen kan hebben, maar ook fysieke veiligheid van mensen in gevaar kan brengen” [6.2].

Voor het onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen verbreden we in deze studie de door De Vent gegeven definitie van constructieve schade, omdat er in de huidige situatie ook sprake kan zijn van schade waarbij het bouwwerk veilig is, maar niet voldaan wordt aan eisen met betrekking tot bruikbaarheid of esthetica.

Een generieke definitie van bouwkundige schade in deze studie luidt als volgt: *bouwkundige schade is een waarneembare uiting van het niet voldoen aan functionele eisen van een bouwwerk of onderdelen daarvan.*

6.2.4 Constructieve versus niet-constructieve schade

In deze studie kan bouwkundige schade zowel constructieve als niet-constructieve schade zijn.

Onder *constructieve schade* wordt verstaan een schade die invloed heeft op de dragende functie, waardoor de constructieve veiligheid en daarmee de veiligheid van personen in het geding kan

komen. Constructieve schade heeft uitsluitend betrekking op de onderdelen van een bouwwerk met een dragende functie, dus alleen op de bouwconstructie [6.3].

Niet-constructieve schade betreft schade die (alleen) gepaard gaat met een vermindering van de gebruikswaarde of een verlies van een andere functie, dus zonder dat de veiligheid van personen in het geding komt [6.3]. Niet-constructieve schade kan verder onderverdeeld worden in schade met consequentie voor esthetica, voor de gebruikswaarde en voor de levensduur [6.3]. Voorbeelden zijn:

- Esthetisch: de schade is met het blote oog zichtbaar en geeft een verstoring van het aanzicht van het desbetreffende onderdeel van een bouwwerk, zoals scheurvorming in een natuurstenen vloer in een woonkamer.
- Gebruikswaarde: de schade resulteert in functieverlies van het desbetreffende onderdeel, zoals bijvoorbeeld de scheurvorming in een kelderwand, waardoor de kelder niet meer waterdicht is.
- Levensduur: de schade resulteert in een (versnelde) aantasting van onderdelen van een bouwwerk, zoals bijvoorbeeld scheurvorming in een gevel waardoor achterliggende onderdelen nat kunnen worden.

Schade zoals beschouwd in deze studie hoeft dus niet noodzakelijk een tekort aan veiligheid te impliceren. Wanneer er een scheur in muur bestaande uit metselwerk zit, is hier lokaal de treksterkte van het metselwerk overschreden. Het totale bouwwerk kan echter mogelijk nog ruimschoots voldoen aan veiligheidsnormen, bijvoorbeeld door herverdeling van krachten. Als het veiligheidsrisico als gevolg van de schade binnen een acceptabel niveau blijft kan het bouwwerk als veilig worden beschouwd.

Het mag duidelijk zijn dat bij het onderscheid tussen constructieve en niet-constructieve schade een beoordeling plaatsvindt van het voldoen aan veiligheidseisen. Dit betekent dat een oordeel moet worden gegeven over het belang en oorzaak van de schade, voordat dit als constructieve schade kan worden gedefinieerd. In deze studie zullen wij het verschil tussen constructieve en niet-constructieve schade niet hanteren. Wij sluiten aan bij het bredere begrip van schade en zullen focussen op wat waarneembaar niet voldoet aan functionele eisen.

6.2.5 Samenvatting

Dit onderzoek richt zich op de beoordeling van met het blote oog waarneembare schade, zoals scheuren en bijbehorende vervormingen van bouwwerken. Het onderzoek richt zich op het gehele bouwwerk. Schades aan zowel binnen als buitenzijde van een bouwwerk zullen worden meegenomen. Kleine scheuren die zich beperken tot afzonderlijke bakstenen en die niet doorlopen in de voeg, worden niet meegenomen, omdat deze erg gebruikelijk zijn en geregeld al vanaf de bouw aanwezig zijn. Verkleuringen en waterdoorslag en andere bouwkundige gebreken vallen buiten de scope van dit onderzoek, tenzij er concrete aanwijzingen zijn dat dit wordt veroorzaakt door scheuren, blijvende vervormingen of blijvende positieveranderingen.

6.3 Methodologie

6.3.1 Hoofdopzet

Voor de in deze studie gehanteerde methodologie is een keuze gemaakt tussen de beoordelingssystematiek op basis van uitsluiting zoals door TNO [6.11] is opgesteld in opdracht van Commissie Bodemdaling door Gaswinning en een systematiek op basis van koppeling schadepatroon

aan mogelijke oorzaken en toetsing van noodzakelijke condities, zoals door De Vent [6.2] is opgesteld.

Het voordeel van de methode De Vent is dat het potentieel een methode is met een goede balans tussen tijdsbesteding en betrouwbaarheid. Daarnaast is het een voordeel dat de methode werkt vanuit de fysieke schade die aanwezig is, in plaats van vanuit een meer abstracte set van mogelijke oorzaken. De Vent onderscheidt verschillende schadepatronen scherper dan TNO. TNO gaat echter grondiger in op uitsluitingen van oorzaken door gebouwkenmerken en omgevingskenmerken en benoemt daarnaast de mogelijkheid van het opstellen van scenario's bestaande uit meerdere oorzaken. Daarnaast onderscheidt TNO mogelijke oorzaken scherper en meer toepasbaar voor de situatie in Groningen.

Er wordt daarom gekozen voor een combinatie van de methodes van TNO en De Vent, waarbij in de analyse begonnen wordt met het schadepatroon (conform overzicht De Vent) gekoppeld aan de oorzaken (conform overzicht TNO), waarna falsificatie van mogelijke oorzaken op basis van gebouwkenmerken en omgevingskenmerken plaatsvindt. Tenslotte worden mogelijke scenario's, bestaande uit een of meerdere oorzaken, geverifieerd (zie figuur 6.1). De methode besteedt specifiek aandacht aan scenario's met een combinatie van meerdere oorzaken.

Wij zijn ons ervan bewust dat de hiermee ontstane analytische methode uitgebreider en omslachtiger is dan de gangbare toegepaste methoden, waarbij mogelijke scenario's vrij snel worden opgesteld, op basis van intuïtie en ervaring. Deze gangbare methoden kunnen een betrouwbaar resultaat geven. De recente grote aantallen schadeonderzoeken in Groningen zoals onder meer uitgevoerd door Arcadis en Witteveen en Bos hebben geleid tot een verdere explicitering van deze gangbare methoden. Het blijft echter bij de gangbare methoden ook mogelijk dat te snel conclusies worden getrokken over de relevantie van afzonderlijke oorzaken en dat de combinatie van meerdere factoren, ook met hun werking in de tijd, onderbelicht blijft. De gangbare methoden zijn in dit specifieke opzicht niet voldoende reproduceerbaar en het is daardoor mogelijk dat potentiële scenario's met gecombineerde oorzaken over het hoofd worden gezien.

Omdat het doel van het huidig onderzoek is om duiding en duidelijkheid te geven in complexe gevallen, wordt ervoor gekozen om met de uitgebreide analytische methode te werken.

De volgende paragraaf gaat dieper in op de te volgen stappen.

Methodiek bepaling oorzaken schade buiten contour



Figuur 6.1: Schematische weergave van voorgestelde methodiek schadebeoordeling (uitleg van de begrippen in paragraaf 6.3.2)

6.3.2 Gegevensverzameling

Het overzicht van te verzamelen gegevens is gebaseerd op de beoordelingssystematiek van TNO [6.11], aangevuld met specifiekere rubricering uit de aanpak van Witteveen en Bos [6.12] met betrekking tot bijvoorbeeld afstanden tot wegen en bomen. Daarnaast zijn inzichten vanuit het onderzoeksteam TU Delft verwerkt. Voor schadekenmerken wordt daarnaast de op dit punt meer gedetailleerde beschrijving van de Vent meegenomen [6.2].

6.3.2.1 Gebouwenkenmerken

Voor gebouwenkenmerken wordt het volgende geïnventariseerd:

- bouwjaar
- functies
- algemeen overzicht van het gebouw (afmetingen, type gevel, type dak, aanwezigheid kelder, etc.)
- materialen (fundering, dragende muren, balken, spantconstructie, afwerking en kleur hiervan, etc.)
- beschrijving van de constructie (incl. aanwezigheid van dilataties)
- staat van onderhoud (metselwerk, spanten, verbindingen, etc.)
- mogelijkheden voor accumulatie sneeuw/regenwater?
- zichtbare aanwijzingen voor lekkages hemelwaterafvoer/goot? (verkleuring/vochtig metselwerk, uitgespoelde grond)
- veranderingen/verbouwingen
- overige specifieke kenmerken die mogelijk relevant kunnen zijn

6.3.2.2 Omgevingskenmerken

Voor de omgevingskenmerken wordt het volgende geïnventariseerd:

- Bodemopbouw
- Fluctuaties en aanpassingen grondwaterstand (historisch overzicht, voor zover beschikbaar)
- Aanwezigheid bomen en wortelgroei (afstand bouwwerk en type)
- Opgetreden autonome zettingen / (diepe) bodemdaling
- Aanwezigheid wegverkeer (afstand/snelheid/type wegdek, aanwezigheid verkeersdrempels)
- Aanwezigheid treinverkeer binnen 100 m
- Aanwezigheid bouwactiviteiten (0, 20, 100m), ook in het verleden (ophoging wegdek, dijklichaam, graafwerkzaamheden, riolering, enz.)
- Aanwezigheid industriële activiteiten (binnen 100 m)
- Opgetreden calamiteiten (zoals aanrijding, explosie, bliksem, brand)
- Opgetreden trillingen veroorzaakt door bevingen

6.3.2.3 Schadekenmerken

- Positie van schade (bouwdeel, bouwelement, positie in bouwelement, in afwerking of door en door, scheur in voeg of steen)
- Moment eerste waarneming schade. Ontwikkeling van de schade door de tijd
- Bij scheuren:
 - verplaatsing in de scheur (in of uit het vlak)
 - Symmetrisch of niet
 - Lengte, breedte en diepte van de scheur
 - Scheurwijdte over de lengte: constant of verbreedend naar een of beide uiteinden, etc)
 - Scheurpatroon: #, ,T, >---<, \---/, \|---|/, \||/, /|/, \/, /, \, X, >
 - Vervuiling in de scheur
 - Erosie van scheurranden
 - Kleur van het scheurvlak
 - Verschillen over de lengte die verschillen in ouderdom indiceren
 - Aangebrachte afwerking over de scheuren
 - Uitgevoerde reparaties
- Vervorming in het vlak (afwijking van horizontaal of verticaal)
- Vervorming uit het vlak (boven/midden/onderin gebouw), naar binnen of naar buiten

- Verschilzakkingen in het gebouw of over de lengte van het gebouw (scheefstand vloer)
- Scheefstand gebouw/ rotatieverschillen

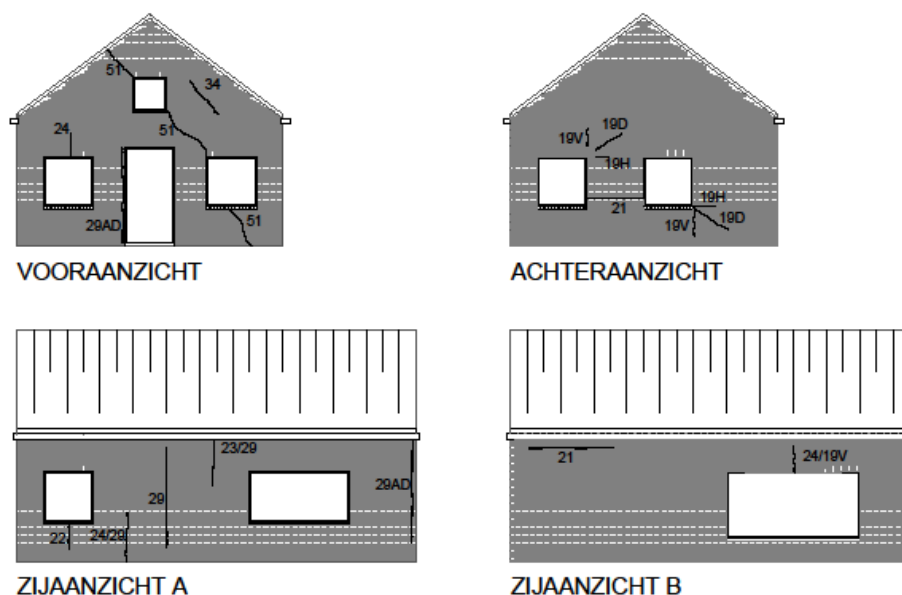
6.3.3 Analyse van scenario's

Een scenario is een omschrijving van gebeurtenissen gedurende de tijd die een verklaring geven voor het optreden van de waargenomen schade. In de volgende paragrafen wordt aangegeven hoe de mogelijke scenario's worden bepaald nadat eerst mogelijke afzonderlijke oorzaken in kaart worden gebracht.

6.3.3.1 Type schadepatroon

Een schadepatroon is een combinatie van verschillende schadekenmerken zoals positie, oriëntatie en afmeting van een scheur of van meerdere scheuren en van een vervormingspatroon. Het is belangrijk te beseffen dat door het definiëren van een schadepatroon aan de hand van schadekenmerken bepaalde oorzaken in beeld zullen komen en bepaalde oorzaken kunnen worden buitengesloten.

Voor het schadepatroon wordt aangesloten bij 43 mogelijke schadepatronen zoals door De Vent [6.2] zijn opgesteld, met uitzondering van de schadepatronen die zij heeft opgesteld voor koepels en bogen, omdat deze niet of nauwelijks van toepassing zullen zijn bij woningen in Groningen. Voor een overzicht van de diverse schadetypes wordt verwezen naar bijlage E. Figuur 6.1 geeft een voorbeeld van de classificatie van scheuren in muren, zoals deze is toegepast.



Figuur 6.1: Voorbeeld van de schade classificatie van De Vent [6.1], zie ook bijlage E

6.3.3.2 Analyse op basis van koppeling schadepatroon en mogelijke oorzaak

Voor mogelijke oorzaken wordt de categorisering van TNO aangehouden [6.11]. Bij het overzicht van mogelijke oorzaken door TNO wordt bij opgelegde vervormingen en ongelijkmatige zettingen wortelgroei van bomen toegevoegd. Wortels kunnen een opgelegde vervorming veroorzaken bij de fundering van het huis. Daarnaast kunnen ze, door het lokaal onttrekken van grondwater, ongelijkmatige zettingen veroorzaken. Verder wordt een categorie 'overig' toegevoegd, omdat er oorzaken kunnen zijn die buiten de categorisering vallen, maar waarschijnlijk niet vaak zullen voorkomen in de te beoordelen groep.

Dit levert de volgende mogelijke oorzaken:

- ontstaan door belastingen
 - onvoldoende sterkte
 - overbelasting vanuit gebruik,
 - overbelasting door trillingen,
 - incidentele overbelasting door bijzondere belastingen
- ontstaan door opgelegde of verhinderde vervormingen
 - verhinderde vervormingen (= 'materiaal wil vervormen maar kan het niet', bijv. uitzetting en verkorting door temperatuurwisselingen)
 - opgelegde vervormingen (= 'materiaal moet vervormen, maar wil het niet'; bijv. corrosie of wortelgroei bomen)
- ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de fundering en/of ondergrond
 - autonome zettingen (bijv. door onvoldoende draagvermogen fundering of bodemdaling)
 - verandering van de belastingen op de ondergrond
 - verandering in de ondergrond
 - wortelgroei bomen
- overig

Voor koppeling van schadepatronen aan oorzaken is gestart met de analyse van De Vent. Omdat de huidige studie meer en andere schadeoorzaken onderscheidt dan De Vent, is vervolgens nagegaan voor de diverse schadepatronen of deze aanvullende schadeoorzaken ook een rol kunnen spelen. Dit heeft geleid tot de matrix zoals weergegeven in tabel 6.1. Met deze tabel kunnen al in een vroeg stadium van de analyse diverse potentiële schadeoorzaken buiten beschouwing worden gelaten omdat zij geen enkele relatie met het schadepatroon hebben (falsificatie). Daarnaast geeft ze gestructureerd houvast om geen mogelijke schadeoorzaken over het hoofd te zien. Echter, bij toetsen met deze methode bleek dat er nog steeds een groot aantal schades moest worden meegenomen en dat er in die zin weinig tijd mee kon worden gewonnen. Tevens bleken verschillende schades voor meerdere schadepatronen in aanmerking te komen, waarmee er verschillen in beoordeling konden ontstaan.

Er is daarom voor gekozen een strikte koppeling tussen schadepatronen en mogelijke oorzaken los te laten, maar om wel te beginnen met het beoordelen van het schadepatroon, waarmee goed wordt stilgestaan bij de uitingsvorm van de schade.

Table 6.1: Matrix met schadeorzaken en schadepatronen. The table is a complex grid with numerous columns representing different damage patterns (e.g., A.1.1, A.1.2, ..., C.3.8) and rows representing various causes of damage (e.g., 1. er is een wijziging geweest van de gebruiksfunctie van het gebouw; 2. er zijn veranderingen (verbouwingen en/of uitbreidingen) doorgevoerd aan het bouwwerk; ...). The cells contain 'X' marks indicating the presence of a specific damage pattern under a given cause.

Tabel 6.1: Matrix met schadeorzaken en schadepatronen

6.3.3.3 Toets condities gebouwenmerken

Voor de te toetsen condities gebouwenmerken is aangesloten bij de beoordelingssystematiek van TNO. Uitzondering hierop is de conditie of het bouwwerk op funderingspalen of 'op staal' is gefundeerd. Omdat ook schade van beperkte omvang wordt meegenomen, kan niet a priori worden aangegeven dat het bouwwerk op de specifieke locatie zo weinig zettingsgevoelig is dat er daardoor geen (geringe) schade kan ontstaan. Immers ook bij een paalfundering bestaat de mogelijkheid dat er geringe zakkings en dus zakkingschade optreedt. Om die reden is een toetsing op de resultaten van de lintvoegmeting toegevoegd, waarmee oorzaken zoals zettingen kunnen worden gefalsificeerd.

Wanneer geen sprake is van de aanwezigheid van deze condities, dan kan de bijbehorende schadeorzaak buiten beschouwing worden gelaten (falsificatie).

Het gaat om de volgende gebouwenmerken en bijbehorende schadeorzaken:

1. er is een wijziging geweest van de gebruiksfunctie van het gebouw; A.2.2
2. er zijn veranderingen (verbouwingen en/of uitbreidingen) doorgevoerd aan het bouwwerk; A.1.2; A.2.3, B.1.2, B.2.2
3. er zijn wijzigingen in de eigenschappen van de draagconstructie of in de materialen waaruit het gebouw of bouwwerk bestaat zoals veroudering of aantasting (A.1.3, B.1.3, B.2.3)
4. de opbouw van het gebouw is dusdanig dat er sprake kan zijn van ophoping van regenwater en/of sneeuw; A.4.3
5. er hebben in het verleden calamiteiten plaatsgevonden die impact hebben op het gebouw. Hierbij moet worden gedacht aan bijzondere belastingen zoals aanrijdingen, explosies, blikseminslag, exceptionele storm; A.4.1, A.4.2, A.4.4, A.4.5
6. de lintvoegmetingen geven een grotere hoekvervorming dan een nader vast te stellen grenswaarde; C.1.1, C.2.1-C.2.6, C.3.1-C.3.3, C.3.8

6.3.3.4 Toets condities omgevingskenmerken

Voor de te toetsen condities omgevingskenmerken is aangesloten bij het overzicht van TNO. Uitgezonderd is de conditie opbouw ondergrond die gevoelig kan zijn voor autonome zetting. Aangezien geringe schade ook wordt meegenomen en elke Groningse ondergrond enige autonome zetting kan veroorzaken, kan deze conditie niet eenvoudig worden weggestreept. In plaats daarvan is bij 3.3.3 een toetsing op de resultaten van de lintvoegmeting toegevoegd, waarmee oorzaken in de ondergrond kunnen worden gefalsificeerd of geverifieerd. De lijst van omgevingskenmerken is aangevuld met de invloed van bomen.

Indien deze condities niet aanwezig zijn, kunnen de aangegeven mogelijke oorzaken worden uitgesloten (falsificatie). Voor de onderbouwing van de aangehouden criteria verwijzen wij naar hoofdstuk 10 en 12.

Het gaat om de volgende toetsingen met betrekking tot omgevingskenmerken.

1. er is sprake van weg- en/of treinverkeer in de nabijheid van het gebouw die kunnen resulteren in trillingen in het gebouw hoger dan een nader vast te stellen grenswaarde of ongelijkmatige zettingen in de ondergrond onder het gebouw; A.3.1, A.3.2, C.3.4, C.3.5
2. er is sprake geweest van bouwactiviteiten in de naaste omgeving van het gebouw die trillingen in het gebouw kunnen hebben veroorzaakt hoger dan een nader vast te stellen grenswaarde of die kunnen hebben geresulteerd in ongelijkmatige zettingen in de ondergrond van het gebouw; A.3.3, C.2.2, C.2.3, C.2.4, C.3.2, C.3.6
3. er is sprake geweest van industriële activiteiten in de naaste omgeving van het gebouw of in de ondergrond, die trillingen in het gebouw kunnen hebben veroorzaakt hoger dan een nader vast te stellen grenswaarde; A.3.4,
4. er hebben in de omgeving aardbevingen plaatsgevonden, met een trilling snelheid ter plaatse van de fundering van het bouwwerk groter dan 0,5 mm/s; A.3.5, C.3.7
5. er is sprake geweest van fluctuaties in de grondwaterstand groter dan een nader vast te stellen grenswaarde, bijvoorbeeld een wijziging als gevolg van een peilbesluit of lokale wijzigingen van de grondwaterstand, bijvoorbeeld als gevolg van bemalingen; C.3.1, C.3.3
6. er is sprake van aanwezigheid van een boom/bomen rondom het gebouw dichterbij dan kruinhoogte; B.2.4, C.3.8
7. de invloed van diepe bodemdaling is zodanig dat rekken in het metselwerk groter dan een nader vast te stellen grenswaarden of relatieve hoekverdraaiingen groter dan een nader vast te stellen grenswaarde optreden (C.3.9)

6.3.3.5 Beoordelen afzonderlijke mogelijke oorzaken

De overgebleven afzonderlijke mogelijke oorzaken per schadepatroon worden beoordeeld in hoeverre deze een bijdrage kunnen hebben geleverd aan de schade. Op basis van analyse, eventueel gebruik makend van eenvoudige berekeningen, wordt nagegaan of de oorzaak een verklaring kan zijn voor de waargenomen schade. In dit onderzoek is het essentieel om te motiveren op welke manier een specifieke oorzaak de waargenomen fysieke schade kan bewerkstelligen. Wanneer er geen plausibele verklaring is hoe een na falsificatie op omgevingsfactoren overgebleven oorzaak de waargenomen schade kan veroorzaken, wordt deze oorzaak achterwege gelaten (en in feite gefalsificeerd op basis van schadekenmerken).

In algemene zin gelden voor het beoordelen van de afzonderlijke oorzaken, de regels voor causaliteit.

Om causaliteit te bepalen van gebeurtenis E moet men op zoek naar [6.14]:

1. Een andere gebeurtenis C
2. Die voorafging aan gebeurtenis E
3. Die zodanig is dat als C niet was opgetreden, E niet zou zijn opgetreden (bij gelijk blijvende overige omstandigheden)
4. Zodanig dat als C in vergelijkbare omstandigheden zou zijn opgetreden, E ook zou zijn opgetreden

De derde voorwaarde geeft de noodzakelijkheid aan van gebeurtenis C. Deze derde voorwaarde wordt ook wel het 'sine qua non' principe (of in Engels 'but for' test) genoemd, waarbij in deze situatie telkens wordt nagegaan of zonder de specifieke oorzaak de schade ook zou zijn opgetreden.

De vierde voorwaarde geeft aan dat het voldoende is dat C is opgetreden om E te verklaren. Hierbij is het mogelijk dat een potentiële oorzaak in zichzelf te weinig is om de waargenomen schade te verklaren, maar dat het wel een bijdragende oorzaak kan zijn. In dat geval dient de betreffende oorzaak in een combinatie scenario te worden meegenomen (categorie 2 oorzaak).

6.3.3.6 Inventarisatie van plausibele scenario's

Van de overgebleven mogelijke oorzaken moeten plausibele scenario's worden opgesteld. Een scenario kan bestaan uit een of meerdere mogelijke oorzaken. Voor de betrouwbaarheid van het onderzoek is het van belang dat er meerdere scenario's worden opgesteld die tegen elkaar afgewogen kunnen worden [6.15].

Eerst worden scenario's opgesteld met maar één oorzaak. Vervolgens worden de verschillende mogelijke oorzaken samengesteld in scenario's. Bij meerdere mogelijke oorzaken kan dit leiden tot een grote hoeveelheid combinaties in een scenario en dus tot grote aantallen scenario's. Ingeschat moet worden of al deze combinaties een logische, realistische verklaring geven voor de opgetreden schade, zodat er al in een eerder stadium scenario's kunnen worden geschrapt (alleen plausibele, realistische scenario's over houden).

In deze stap wordt impliciet de *causaliteit* van scenario's ingeschat door alleen de scenario's mee te nemen die de schade kunnen verklaren en realistisch zijn. Voor het bepalen van *causaliteit* spelen, naast eerder genoemde toetsen, de volgende aspecten een rol:

- Is het plausibel dat een scenario is opgetreden
- Is het plausibel dat een scenario de schade kan veroorzaken (dus een significante toename in rekken kan veroorzaken)

Het is de bedoeling dat er naast zeer plausibele scenario's aandacht wordt gevraagd voor scenario's die minder plausibel zijn, maar toch niet uitgesloten kunnen worden.

Om de hoeveelheid scenario's te beperken, wordt de volgorde van gebeurtenissen of de herhaling van gebeurtenissen niet expliciet meegenomen. Vanwege de aard van het onderzoek en het feit dat er in dit gebied altijd aardbevingen zijn opgetreden (zij het met soms geringe snelheden) dient altijd de afzonderlijke oorzaak trillingen door aardbevingen (A.3.5) te zijn meegenomen als onderdeel van de scenario's.

6.3.3.7 Bepalen causaliteit scenario's

Vanuit de plausibele scenario's dient nu een short list te worden gemaakt. Hierbij wordt eerst nagegaan of er een scenario kan worden bepaald, dat de schade het best kan verklaren. De volgende aspecten worden meegewogen:

- Is het plausibel dat de gebeurtenissen binnen het scenario zijn opgetreden
- Is het plausibel dat het scenario daadwerkelijk de schade kan hebben veroorzaakt.
- inzicht in tijdsafhankelijke aspect. Bij woningen ouder dan 5 jaar is bijvoorbeeld de verhardingskrimp al uitgewerkt en kunnen er op zijn hoogst nog hygrische of thermische krimp optreden. Aan scheuren is soms te zien of ze nieuw zijn. Soms is ook een toelichting van de bewoner ter plekke een indicatie van veranderingen in de tijd. Dit kan maken dat bijv. bevingen waarvan het vermoedelijke aandeel laag is, toch worden meegenomen omdat de rol van trigger waarschijnlijk is.

Als er een best verklarende scenario is zonder bevingen, wordt deze altijd vergeleken met hetzelfde scenario met bevingen. Wanneer de rol van trillingen kan worden uitgesloten, dan wordt het scenario met trillingen buiten beschouwing gelaten.

Wanneer het niet duidelijk is welk scenario het best verklarend is (omdat er teveel goed verklarende scenario's zijn, of er gewoon nog te veel onduidelijkheid is) wordt het resultaat van de beoordeling vermeld als: best verklarende scenario niet te bepalen.

6.3.3.8 Bepalen toerekenbaarheid

Vervolgens is de *toerekenbaarheid* ingeschat. Hierbij gaat het om het aandeel van de afzonderlijke gebeurtenissen ten opzichte van andere oorzaken in de best verklarende scenario's in de opgetreden schade. Bij twee best verklarende scenario's met een grote overeenkomst in oorzaken wordt het aandeel gebaseerd op het scenario met de meeste afzonderlijke oorzaken. Het aandeel in de schade wordt geïnterpreteerd als het aandeel in de opgetreden rekken of spanningen, welke tot de schade aanleiding hebben gegeven.

Wanneer er meer dan 2 best verklarende scenario's zijn, wanneer er geen best verklarende scenario's zijn of wanneer bij 2 best verklarende scenario's volledig verschillende oorzaken zijn benoemd, dan kan deze stap niet worden ingevuld.

6.3.4 Borging van de kwaliteit van de gegevensverzameling en van de analyse van scenario's

6.3.4.1 Mogelijke bedreigingen voor de kwaliteit en mitigerende maatregelen

Vanuit de literatuur zijn er diverse potentiële bedreigingen bekend voor de kwaliteit van beoordelingen in het algemeen en van het aantonen van causaliteit bij schadeonderzoek specifiek [6.10, 6.15, 6.18, 6.19]. In deze paragraaf wordt aangegeven om welke bedreigingen het hier gaat en welke mitigerende maatregelen er worden voorgesteld voor de fases van Gegevensverzameling, Bepaling Schadepatroon, Inventarisatie mogelijke oorzaken/scenario's, Beoordeling mogelijke oorzaken/scenario's en conclusie meest waarschijnlijke scenario.

Tabel 6.2: Bedreigingen voor kwaliteit en mitigerende maatregelen

Bedreiging	Omschrijving	mitigerende maatregelen
<i>Verzamelen gegevens</i>		
'WYSIATI' (What you see is all there is) [6.18]	Je maakt je keuze op basis van de data die beschikbaar is, ook als deze niet betrouwbaar is	-Duidelijk maken wat de betrouwbaarheid is van diverse waarnemingen. Als data echt onbetrouwbaar is, ga ook na wat je conclusie zou zijn als deze data er niet was -Proberen zo volledig mogelijk data te verzamelen uit verschillende bronnen -Eigen bezoek aan cases, niet alleen afgaan op rapportages derden
Onbetrouwbare data	Data blijkt onjuist of onbetrouwbaar te zijn	Gebruik maken van gerenommeerde bedrijven voor sonderingen, lintvoegmetingen, grondwatergegevens en trillingsgegevens.
<i>Bepaling schadepatroon</i>		
'Insufficient representativeness' [6.18]	Verschillende scheuren ten onrechte bundelen tot 1 schadepatroon	Alleen bundelen, wanneer er voldoende overeenstemming is dat dit realistisch is
'Ego depletion' [6.18]	Een gestructureerde analyse houd je maar beperkte tijd vol, daarna val je vaak terug op intuïtieve beoordeling	-Niet te lang doorgaan met zelfde type beoordeling -Beoordeling dag later nog een keer nalopen
<i>Inventarisatie oorzaken/scenario's</i>		
'WYSIATI' [6.18]	Je kunt mogelijke oorzaken of scenario's over het hoofd zien, omdat ze niet eerder genoemd zijn	-Gebruik maken van overzicht mogelijke oorzaken TNO dat zich in de praktijk heeft bewezen -Open blijven voor andere oorzaken als fenomenen onvoldoende verklaard kunnen worden -Overweeg altijd een alternatief scenario (en beoordeel vervolgens welk scenario het best past bij de feiten [6.15])

Tabel 6.2 (vervolg): Bedreigingen voor kwaliteit en mitigerende maatregelen

Bedreiging	Omschrijving	mitigerende maatregelen
Beoordelen oorzaken/scenario's		
Beoordelingsfout / 'availability bias' [6.18]	Feiten niet goed geïnterpreteerd. Overmatige nadruk op mogelijke oorzaken waar expert ervaring mee heeft.	-Duidelijke instructie van te voren met betrekking tot de analyse, tussendoor afstemmingsmomenten -Experts met zeer veel ervaring inschakelen -Experts vanuit verschillende disciplines inschakelen -4 ogen principe, controle door andere expert
'Answering an easier question/ insufficient representativeness' [6.18]	Met name bij samengestelde oorzaken is er de neiging om het als som van enkelvoudige oorzaken te zien	Probeer met simuleren het effect van complexe samengestelde oorzaken te visualiseren
Kans op juiste beoordeling kleiner naarmate oorzaak specifiek [6.18]	Kans dat je een overkoepelende groep goed inschat is groter dan specifieke oorzaak binnen de groep	Indien nodig conclusies op oorzaak-hoofdgroep doen en terughoudend zijn met te specifieke oorzaken
'Group think' [6.19]	Bij het komen tot conclusies kan er sprake zijn van group think, op basis van iets dat als eerste geroepen is.	-Experts eerst eigen analyse laten maken -Gestructureerde aanpak van falsificatie en verificatie van breed overzicht aan oorzaken -Outside view door begeleidingscommissie
'Confirmation bias' [6.10, 6.18]	-Er is de neiging om te proberen alle data te laten passen bij een voorkeursalternatief -Er is externe druk om wel of niet op aardbevingsoorzaak uit te komen	-Gestructureerde aanpak van falsificatie en verificatie van breed overzicht aan oorzaken -Bij bestaande rapporten alleen gebruik maken van gegevens en niet van de beoordeling
'Outcome bias/illusory correlation' [6.18]	-de aanwezigheid van een factor hoeft nog geen causaliteit te betekenen. Er is schade, er is een potentiële oorzaak, dus dat zal ook wel de oorzaak zijn. Laat ruimte voor toeval.	-Mogelijke oorzaak moet noodzakelijk en voldoende zijn [6.14]
'Ego depletion' [6.18]	Een gestructureerde analyse houd je maar beperkte tijd vol, daarna val je terug op intuïtieve beoordeling	-Niet te lang doorgaan met zelfde type beoordeling -Beoordeling dag later nog een keer langslopen

6.3.4.2 Deskundigenteam

De beoordeling van de causaliteit en toerekenbaarheid is gedaan op basis van expert opinion. Hiertoe is een multidisciplinair deskundigenteam samengesteld⁴. De gepresenteerde methodiek is in

⁴ Het deskundigenteam bestaat uit: Ir. H. Borsje, TNO - Ing. H.J. Everts, Everts Geotechniek en TU Delft - Dr.Ir. H.R. Schipper, TU Delft - Dr.Ir. K.C. Terwel, TU Delft - Prof.Ir. S.N.M. Wyte, adviesbureau Hageman en TU Eindhoven

het deskundigenteam bediscussieerd en op basis van een aantal cases op hanteerbaarheid getoetst. Hieruit zijn enige bijstellingen en preciseringen voortgekomen. De methodiek zoals hierboven gepresenteerd is uiteindelijk als basis voor de beoordeling gehanteerd.

6.3.4.3 Procesbeschrijving inclusief mitigerende maatregelen

In deze paragraaf wordt een procesbeschrijving gegeven, waarbij de mitigerende maatregelen uit de vorige paragraaf zijn opgenomen.

De gegevensverzameling start bij de bestaande schaderapportages. Bij een schouw ter plekke wordt nagegaan of de rapportage een adequate weergave geeft van de waarnemingen ter plekke.

Daarnaast zijn de volgende gegevens van belang c.q. zullen de volgende gegevens worden verzameld:

- Voor elk pand is het dossier bij Bouw- en Woningtoezicht opgevraagd.
- Voor elk pand is een lintvoegmeting gemaakt door een gerenommeerd bedrijf.
- Voor de panden waar daar aanleiding is vanuit de lintvoegmeting en het schaderapport wordt een funderingsinspectie ter plekke gedaan, grondboring om de lokale grondgesteldheid te testen en een vloerwaterpassing
- Voor de bodemdaling wordt voor het gebied in de nabijheid van het gebouw een analyse gemaakt op basis van INSAR satelliet beelden.
- De beoordeling van de grondwaterstanden wordt ontleend aan openbare bestanden (DINO) en van waterschappen. Bij twijfel zullen bij specifieke cases aanvullende onderzoeken op dit vlak worden gedaan.
- Voor de trillingsdata door aardbevingen wordt gebruik gemaakt van een analyse van de registraties van het sensornetwerk van TNO en van KNMI, waarbij een interpolatie tussen de sensorregistraties wordt gemaakt. Deze bewerkingen worden in opdracht van NCG uitgevoerd door TNO.
- Voor trillingen door verkeer en treinen kunnen waar nodig aanvullende trillingsmetingen worden gedaan. De noodzaak hiertoe is per object beoordeeld.

Voor elke case wordt eerst een gegevensrapport opgesteld met daarin aandacht voor gebouw, omgeving en schadekenmerken, inclusief de uitkomsten uit bovenstaande aanvullende onderzoeken. In het gegevensrapport is ook een classificatie van de schade patronen conform de methode de Vent opgenomen. Het gegevensrapport wordt opgesteld door een medewerker van TUD en gecontroleerd door een lid van het deskundigenteam. Vervolgens is voor elke case door een TUD medewerker een falsificatierapport opgesteld waarbij mogelijke oorzaken worden gefalsificeerd op basis van gebouw en omgevingskenmerken. Ook deze zijn gecontroleerd door een lid van het deskundigenteam.

In het onderzoek worden uiteindelijk 69 schadegevallen (cases) geanalyseerd. Dit wordt stapsgewijs opgebouwd. De methodiek is eerst door het deskundigenteam getest op enkele cases. Op basis van deze ervaringen zijn externe analisten geïnstrueerd om de pre-beoordelingen in termen van causaliteit en toerekenbaarheid te doen, die vervolgens door het deskundigenteam zijn gereviewed. Het deskundigenteam heeft per schade de beoordeling (causaliteit en toerekenbaarheid) vastgesteld.

7 Kwantificering van de trillingen als gevolg van historische bevingen

7.1 Inleiding

De kennis van de impact van geïnduceerde bevingen als gevolg van de gaswinning in Noord Nederland is nog maar van recente datum en is nog sterk in ontwikkeling.

Enkele jaren geleden zijn onderzoeksprogramma's in gang gezet om de invloed van bevingen op gebouwen en op belangrijke industriële en infrastructurele voorzieningen vast te stellen. Veiligheid is daarbij het belangrijkste uitgangspunt, de aandacht richt zich op constructieve veiligheid bij bevingen met een zeer geringe kans van optreden. Twee jaar geleden is daartoe een eerste Nederlandse Praktijkrichtlijn opgesteld voor het evalueren van de veiligheid van gebouwen bij aardbevingen. De versterkingsopgave is een belang onderdeel van de activiteiten die onder coördinatie van de NCG worden uitgevoerd.

Met name na de beving Huizinge is het aantal meldingen van schade aan gebouwen als gevolg van de bevingen sterk gestegen en is er een grote behoefte ontstaan aan meer inzicht bij welke sterkte van bevingen schade kan ontstaan. Daarbij is de aandacht niet zozeer gericht op sterke bevingen met een zeer geringe kans van optreden, maar op bevingen met een grote kans van voorkomen en naar de huidige ervaringen aanleiding geven tot het ontstaan (voornamelijk) lichte schade. Dit is het onderwerp van het nu voorliggende onderzoek.

Ook zijn de afgelopen periode belangrijke stappen gezet in het uitbreiden van sensornetwerk, waarbij de trillingen als gevolg van de bevingen in een groot aantal punten in de provincie Groningen kunnen worden vastgesteld. Met het beschikbaar komen van meer data uit deze sensornetwerken en meerdere sensornetwerken (van zowel KNMI als van TNO) heeft ook een gerichte interpretatie van de meetresultaten een impuls gekregen. Ten tijde van de beving in Huizinge (2012) waren nog maar enkele tientallen sensoren actief. Bovendien werden de resultaten van de waarnemingen van de sensornetwerken nog niet in een vorm verwerkt en gepresenteerd die geschikt was voor het beoordelen van het ontstaan van de eerste schade.

Met het oog hierop heeft TNO in opdracht van NCG in het kader van dit onderzoek afgelopen periode een nadere interpretatie uitgevoerd van de data uit het sensornetwerk van TNO voor een aantal historische bevingen. Dit onderzoek door Pruiksmā en Rozsas [7.3] resulteert in een modelmatige beschrijving van de sterkte van de trillingen aan het aardoppervlak van een aantal historische bevingen. De gepresenteerde vorm van de bewerkte data sluit goed aan op de beoordeling van de invloed van trillingen op schade aan gebouwen. Hiermee kan de grootte van de trilling worden vastgesteld voor willekeurige locaties in de provincie Groningen. Bommer e.a. [7.4,7.5] hebben in opdracht van NAM een vergelijkbare analyse uitgevoerd van de waarnemingen van het sensornetwerk van KNMI, eveneens met het oog op het opstellen van een modelmatige beschrijving van de sterkte van de trillingen aan het aardoppervlak. De resultaten van deze studies stemmen in grote lijnen goed overeen en completeren het beeld.

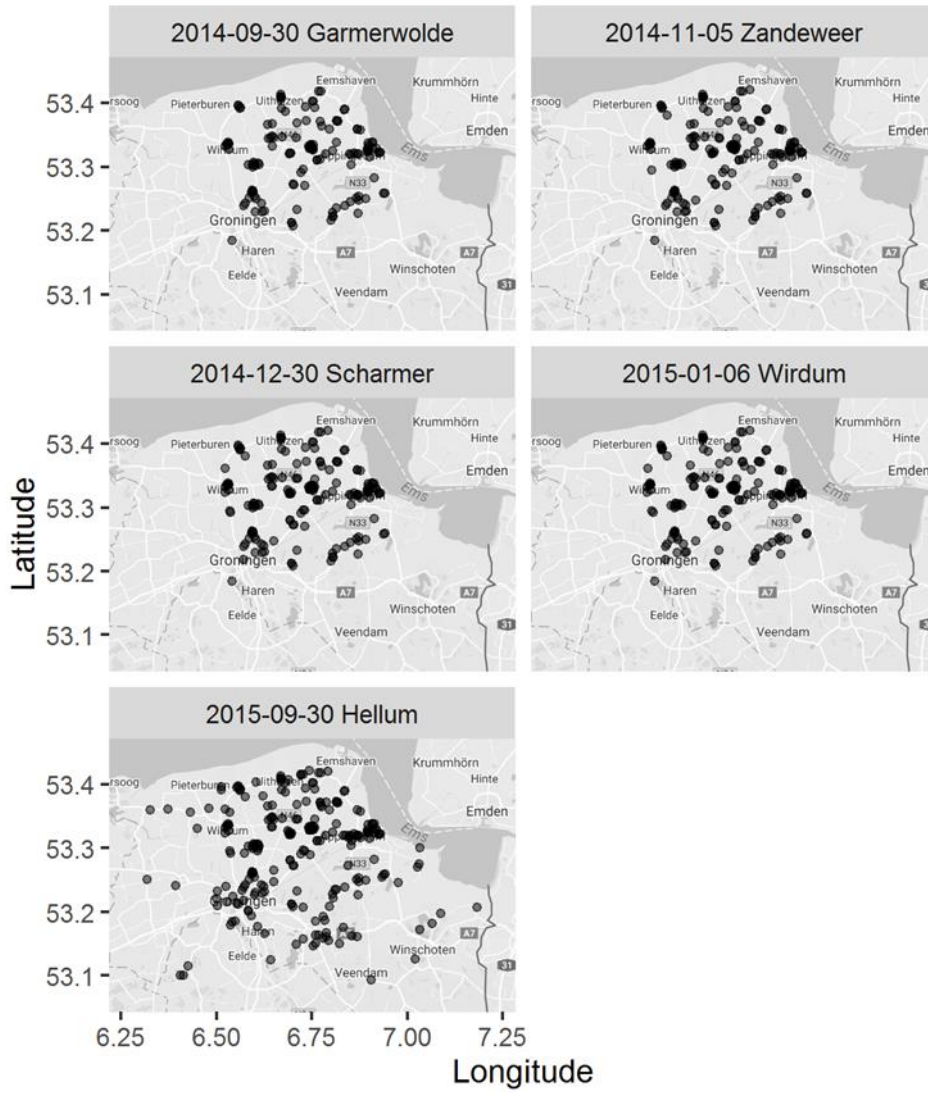
7.2 Historische bevingen, waarnemingen en modelmatige beschrijving

7.2.1 Sensornetwerken

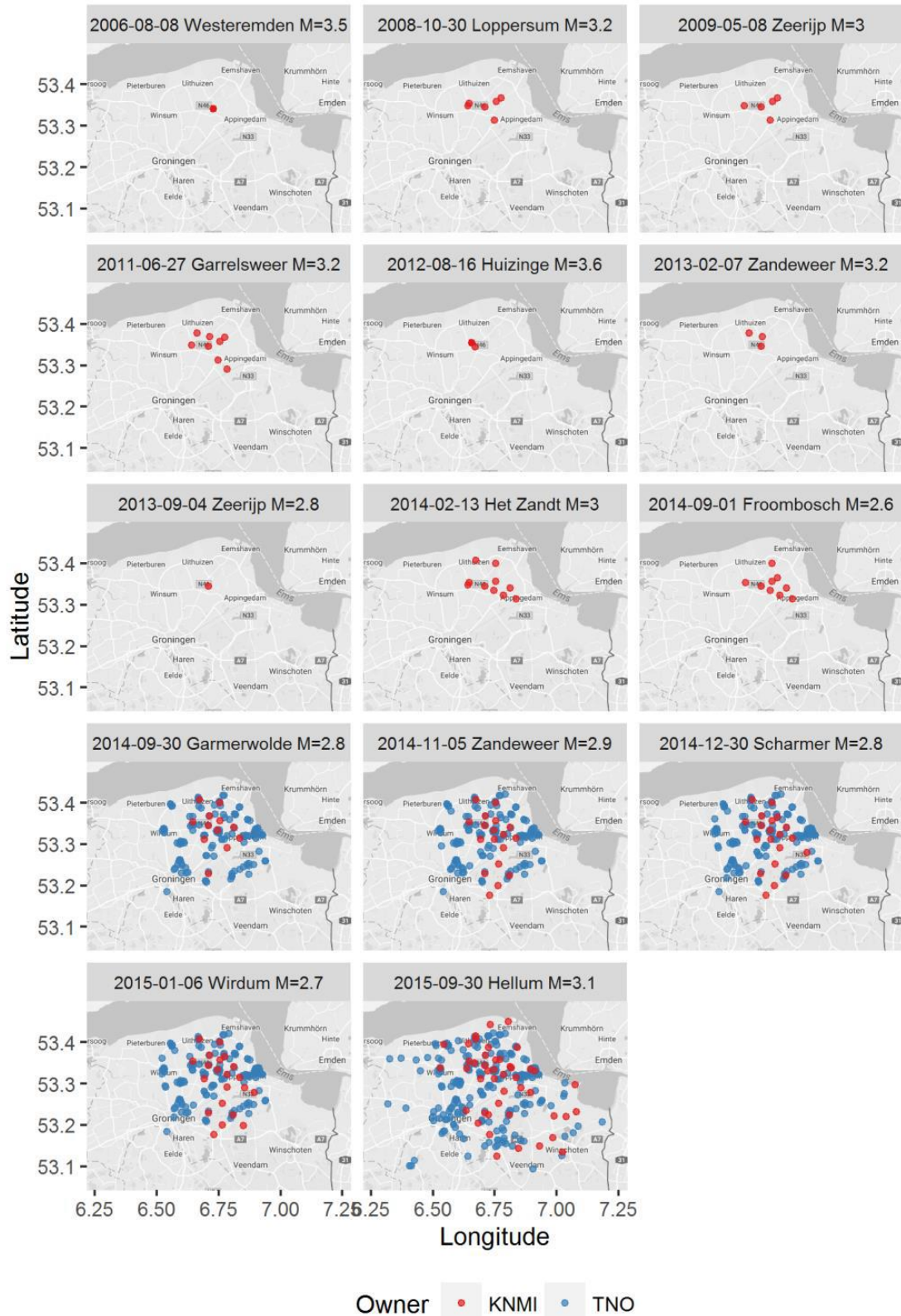
In Nederland verzorgt het KNMI een netwerk van sensoren voor het registreren en interpreteren van seismische signalen, dus trillingen in de diepe ondergrond. Het KNMI beschikt al een aantal jaren over sensoren in Noord Nederland om de geïnduceerde seismische trillingen te detecteren. Naar aanleiding van het vaker optreden van geïnduceerde bevingen in Noord Nederland is dit netwerk de afgelopen jaren sterk uitgebreid. Het KNMI sensornetwerk omvat nu ongeveer 50 sensorlocaties op maaiveldniveau. Verder bevat het KNMI sensornetwerk ook sensoren die geplaatst zijn op verschillende diepten ten opzichte van het maaiveld, tot aan 200 m diepte. De data van de sensoren van het KNMI sensornetwerk zijn toegankelijk via het data portal van KNMI. Van waargenomen bevingen wordt magnitude, diepte en locatie van epicentrum bepaald. Via het data portal van KNMI zijn deze gegevens van meer dan 1400 geïnduceerde bevingen in Nederland te raadplegen, waarvan het overgrote deel in Noord Nederland is opgetreden [7.6].

Om de effecten van geïnduceerde aardbevingen te kunnen bepalen heeft NAM een onderzoeksprogramma opgezet. Een onderdeel van dit onderzoeksprogramma is een monitoringsnetwerk voor gebouwtrillingen. In ongeveer 300 gebouwen is een trillingssensor geplaatst die continu de trillingen van het gebouw op funderingsniveau meet. Om inzicht te krijgen in de kwetsbaarheid van de gebouwen in Groningen voor bepaalde trillingsniveaus omvat dit monitoringsnetwerk ook een schade-inventarisatie. Door de schade aan deze gebouwen voor en na een aardbeving in kaart te brengen, kan een verband worden gevonden tussen de gebouwtrillingen als gevolg van een aardbeving en de schade aan het gebouw die door die aardbeving is veroorzaakt. Referentie [7.2] bevat een hiervan een rapportage.

TNO heeft dit monitoringsnetwerk voor gebouwtrillingen ontwikkeld en geïnstalleerd, inclusief een IT-infrastructuur voor het verwerken en analyseren van de gegevens (het Vibration Data Center). De opzet van dit monitoringsnetwerk is beschreven in [7.1]. Eind 2015 bestond het monitoringsnetwerk uit ongeveer 300 sensoren. De meeste van deze sensoren zijn geïnstalleerd in woningen. Ongeveer 30 sensoren zijn geïnstalleerd in andere gebouwen zoals gemeentehuizen, dorpshuizen en kantoren van lokale industrie. De in het monitoringsnetwerk opgenomen woningen zijn zo geselecteerd dat ze representatief zijn voor de meerderheid van de woningen in Groningen. Figuur 7.1 geeft een overzicht van de ruimtelijke spreiding van het operationele TNO sensornetwerk op basis van de registraties bij vijf recente bevingen [7.3]. De data van het TNO sensornetwerk zijn slechts gedeeltelijk publiek toegankelijk, via het NAM portal.



Figuur 7.1: Locatie van de operationele TNO sensoren bij vijf recente bevingen met $M > 2,5$, ontleend aan [7.3]



Figuur 7.2: Locaties van de KNMI en TNO sensoren, zoals gebruikt in [7.3].

TNO concludeert in [7.3] dat de registraties van de TNO en KNMI sensornetwerken in goede overeenstemming met elkaar zijn, zowel voor de trillingssnelheid als voor de versnelling. De data van het KNMI sensornetwerk zijn doorgaans binnen het 95 % betrouwbaarheidsinterval van de modelcurve op basis van de data van het TNO sensornetwerk (model T1.1) is bepaald. Geconstateerd wordt dat de KNMI meetwaarden lager liggen dan de TNO meetwaarden, deze afwijking is echter niet systematisch en varieert naar gelang de vergeleken locaties.

7.2.2. Modelmatige beschrijving

De modelmatige beschrijving van historische bevingen in Groningen was aanvankelijk gericht op kwantificeren van de gemeten trillingen in termen van seismologische modellen. Daartoe werden onder meer de gemeten trillingen in de drie hoofdrichtingen (2 horizontaal en 1 verticaal) samengevoegd tot zogenoemde geometrische gemiddelden.

De aandacht heeft zich tot nu toe sterk gericht op het bepalen van de bodemversnelling. Die is de belangrijkste input parameter waar het de beoordeling van de constructieve veiligheid van gebouwen en van infrastructuur betreft. De bodemversnelling vormt de basis voor constructieve analyses zoals omschreven in NPR9998. In de afgelopen periode over een groot aantal modelmatige beschrijvingen van de bodemversnelling opgesteld voor de sterkte van de trilling aan het aardoppervlak als functie van de afstand tot het epicentrum (de zogenaamde GMPE, Ground Motion Prediction Equation).

Met het beschikbaar komen van meer data uit de sensornetwerken en meer data over de invloed van de ondiepe ondergrond op de trillingen, is de statistische betrouwbaarheid van deze modellen verbeterd en kunnen gekwantificeerde uitspraken worden gedaan over de kans op het overschrijden van een bepaald versnellingsniveau gegeven de magnitude van de beving en gegeven een locatie ten opzichte van een epicentrum.

Een vergelijkbare kwalitatief goede analyse ontbrak tot nu toe nog gericht op de trillingssnelheid aan het aardoppervlak. In onderstaande twee studies is een goede aansluiting gemaakt tussen de gemeten data uit het sensornetwerk en de trillingsgrootheden die nodig zijn om schade aan gebouwen te beoordelen: de gemeten versnellingen zijn hiertoe omgerekend naar trillingssnelheid en bovendien zijn de werkelijk opgetreden topwaarden bepaald in plaats van de in de seismologie gebruikelijk geometrische gemiddelden. Hiermee kan voor gegeven bevingen een betere schatting worden gemaakt van de opgetreden trillingssnelheid op een willekeurige locatie nabij het Groningenveld, ook voor kleine overschrijdingskansen.

Voor bevingen met magnitude $M < 4$ wordt in de literatuur de volgende relatie gehanteerd tussen de sterkte van de respons (versnelling of snelheid op aardoppervlak), de magnitude en de afstand tot het epicentrum.

$$\ln(Sv) = c_1 + c_2 \cdot M + g(R)$$

Waarin:

- Sv is de responsgrootheid (snelheid of versnelling)
- M is de magnitude;
- R is de gemodificeerde afstand tot het epicentrum, in km;
- $g(R)$ is een afstandsafhankelijke component, zie onderstaande vergelijking;
- c_1, c_2 zijn modelparameters.

De functie $g(R)$ wordt beschreven door:

$$g(R) = c_4 \ln \sqrt{R^2 e_{pi} + \exp(c_5 M + c_6)^2}$$

Waarin R_{epi} de afstand is gemeten tot het epicentrum van de beving; c_4 , c_5 en c_6 zijn modelparameters.

Deze modelbeschrijving wordt zowel voor afzonderlijke componenten van snelheid of versnelling als voor de zogenaamde geometrische gemiddelde er van gehanteerd.

7.2.3 Modelanalyse TNO historische bevingen

Bij de modelanalyse door Pruiksmas en Rozsas zijn data gebruikt van het TNO sensornetwerk en het KNMI sensornetwerk. Voor 5 historische bevingen met magnitude groter of gelijk aan 2,5 zijn de grootste componenten van de topwaarden van de horizontale trillingssnelheid van zowel TNO als KNMI netwerk geordend naar afstand tot het epicentrum en is deze puntenverzameling per beving benaderd met een modelvergelijking (model T1.1):

$$\ln(Sv) = d_1 + g(R)$$

$$g(R) = d_2 \ln \sqrt{R^2 e_{pi} + d_3}$$

Hierin zijn d_1 , d_2 en d_3 de modelparameters.

Voor iedere beving zijn de toepasselijke coëfficiënten en de mate van spreiding vastgesteld. Omdat de analyse per beving is gemaakt, is de magnitude impliciet in de coëfficiënten verwerkt. Een vergelijkbare benadering is ook uitgevoerd per beving voor een groter aantal historische bevingen waarvan de data verder teruggaan in de tijd. Hiervoor is model V2 gehanteerd.

$$\ln(Sv) = d_1 + d_2 \cdot M + d_3 (M - 4,5)^2 + g(R)$$

$$\ln(Sv) = \ln(Sv) + \ln(AF)$$

Hierin zijn d_1 , d_2 en d_3 weer de modelparameters.

Met beide modelbenaderingen kunnen schattingen worden gemaakt van de trillingsterkte in termen van trillingssnelheid die op een willekeurige afstand van het epicentrum is opgetreden, voor willekeurige overschrijdingskansen.

Tabel 7.1: Overzicht van bevingen ($M > 2.5$) geanalyseerd in [7.3].

Datum en tijd	Mag.	Lat.	Long.	Locatie	Sensors ¹
2015-09-30T18:05:37	3.1	53.234	6.834	Hellum	247
2015-01-06T06:55:28	2.7	53.324	6.768	Wirdum	164 ²
2014-12-30T02:37:36	2.8	53.208	6.728	Scharmer	166
2014-11-05T01:12:34	2.9	53.374	6.678	Zandeweer	152
2014-09-30T11:42:03	2.8	53.258	6.655	Garmerwolde	136
¹ uitsluitend het aantal bruikbare sensoren					
² bij deze beving waren 2 sensoren niet operationeel					

Tabel 7.2: Overzicht van bevingen ($M > 2.5$) waarvan data van het KNMI sensor netwerk in [7.3] zijn geanalyseerd met aanduiding van het aantal operationele locaties (alleen maaiveldligging).

Datum en tijd	Mag.	Lat.	Long.	Locatie	Stations
2015-09-30T18:05:37	3.1	53.234	6.834	Hellum	45
2015-01-06T06:55:28	2.7	53.324	6.768	Wirdum	21
2014-12-30T02:37:36	2.8	53.208	6.728	Scharmer	20
2014-11-05T01:12:34	2.9	53.374	6.678	Zandeweer	18
2014-09-30T11:42:03	2.8	53.258	6.655	Garmerwolde	12
2014-09-01T07:17:42	2.6	53.194	6.787	Froombosch	9
2014-02-13T02:13:14	3	53.357	6.782	Het Zandt	10
2013-09-04T01:33:32	2.8	53.344	6.772	Zeerijp	1
2013-02-07T23:19:08	3.2	53.294	6.785	Zandeweer	3
2013-01-19T20:10:06	2.4	53.285	6.790	Overschild	3
2012-08-16T20:30:33	3.6	53.345	6.672	Huizinge	7
2011-06-27T15:48:09	3.2	53.303	6.787	Garrelsw eer	8
2011-01-19T19:39:31	2.4	53.319	6.645	Westerwij twerd	4
2009-05-08T05:23:11	3.0	53.354	6.762	Zeerijp	5
2008-10-30T05:54:29	3.2	53.337	6.720	Loppersum	6
2006-08-08T05:04:00	3.5	53.350	6.697	Westeremden	4

Voor de modelparameters per beving wordt verwezen naar [7.3]. Voor de spreiding van de trillingsnelheid rapporteert TNO waarden van tussen 0,46 en 0,87 per beving.

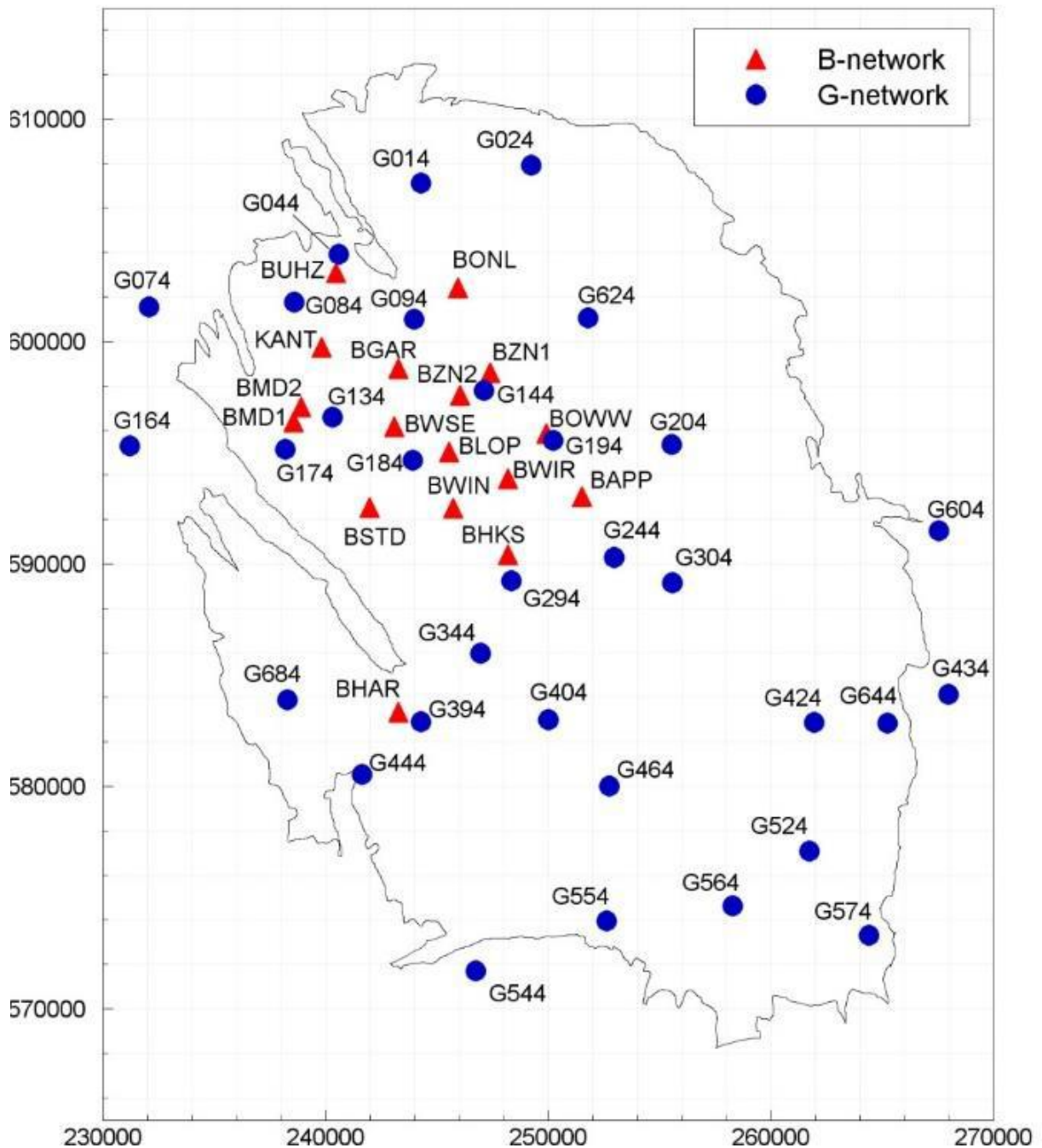
7.2.4 Modelanalyse Bommer et al. Historische bevingen

Op basis van de data van het KNMI sensor netwerk (zie figuur 7.3) hebben Bommer et al [7.4] een analyse uitgevoerd van de waarnemingen van 22 historische bevingen, zie tabel 7.3.

Bommer et al. hebben daarbij een geïntegreerde modelbenadering voor alle bevingen opgesteld, waarbij afhankelijk van de magnitude van de beving de trillingsnelheid op een willekeurige afstand van het epicentrum kan worden bepaald, voor willekeurige overschrijdingskansen. De invloed van de bodemcondities (met name de afschuifgolfsnelheid van de toplaag van de ondergrond) op de formulering van de trillingsnelheid bleek zeer gering.

Tabel 7.3: Geanalyseerde historische bevingen door Bommer et al. [7.4]

Datum en tijd	Mag.	Lat.	Long.	Locatie
2015-09-30T18:05:37	3.1	53.258	6.800	Hellum
2015-01-06T06:55:28	2.7	53.342	6.678	Wirdum
2014-12-30T02:37:36	2.8	53.208	6.728	Scharmer
2014-11-05T01:12:34	2.9	53.374	6.678	Zandeweer
2014-09-30T11:42:03	2.8	53.258	6.655	Garmerwolde
2014-09-01T07:17:42	2.6	53.194	6.787	Froombosch
2014-02-13T02:13:14	3.0	53.357	6.782	Het Zandt
2013-09-04T01:33:32	2.8	53.344	6.772	Zeerijp
2013-02-09T05:26:10	2.7	53.294	6.785	't Zandt
2013-02-07T23:19:08	3.2	53.389	6.667	Zandeweer
2013-02-07T23:19:08	3.2	53.389	6.667	Zandeweer
2012-08-16T20:30:33	3.6	53.345	6.672	Huizinge
2011-09-06T21:48:10	2,5	53.337	6.805	Oosterwijtwerd
2011-08-31T06:23:57	2,5	53.344	6.687	Uithuizen
2011-06-27T15:48:09	3.2	53.303	6.787	Garrelsweer
2010-08-14T07:43:20	2,5	53.403	6.703	Uithuizermeeden
2009-05-08T05:23:11	3.0	53.354	6.762	Zeerijp
2009-04-14T21:05:25	2,6	53.345	6.680	Huizinge
2008-10-30T05:54:29	3.2	53.337	6.720	Loppersum
2006-08-08T09:49:23	2,5	53.350	6.707	Westeremden
2006-08-08T05:04:00	3.5	53.350	6.697	Westeremden



Figuur 7.3: Gebruikte locaties van het KNMI sensornetwerk in de analyse van Bommer et al. [6.5]

In de analyse van Bommer et al [7.4] wordt gewerkt met een gemodificeerde afstand tot het epicentrum. Die gemodificeerde afstand wordt als volgt beschreven:

$$R = \sqrt{R_{\text{epi}}^2 + \exp(c_5 M + c_6)^2}$$

Met:

R is de gemodificeerde afstand tot het epicentrum, in km;

R_{epi} de afstand gemeten tot het epicentrum van de beving, in km.

$$c_5 = 0,4233$$

$$c_6 = -0,6083$$

De afstand afhankelijke component $g(\cdot)$ heeft bij Bommer et al de volgende vorm:

$$g(R) = c_4 \ln(R), \text{ indien } R < 6,32 \text{ km}$$

$$g(R) = c_4 \ln(6,32) + c_{4a} \ln\left(\frac{R}{6,32}\right), \text{ indien } 6,32 \text{ km} < R < 11,62 \text{ km}$$

$$g(R) = c_4 \ln(6,32) + c_{4a} \ln\left(\frac{11,62}{6,32}\right) + c_{4b} \ln\left(\frac{R}{11,62}\right), \text{ indien } R > 11,62 \text{ km}$$

Met c_4 , c_{4a} en c_{4b} als modelcoëfficiënten, zie tabel 7.4.

Bommer et al hebben de invloed onderzocht van het gebruik van verschillende formuleringen van de trillingssnelheid, waaronder de geometric mean value, de topwaarde per afzonderlijke horizontale component en de grootste vectoriele topwaarde. Voor elk van deze formuleringen zijn model coëfficiënten bepaald; onderstaand zijn de waarden gegeven voor de grootste horizontale component (max hor) en de maximale vectoriele waarde van de horizontale componenten (max rot) van de trillingssnelheid. De coëfficiënten hebben als basis een trillingssnelheid in cm/s.

Tabel 7.4: Overzicht van de coëfficiënten in de afstand/magnitude relatie volgens eerste model Bommer et al [7.4]

Coëfficiënt	Model max hor	Model max rot
c1	-4,8592	-4,7572
c2	2,2368	2,2472
c4	-2,0261	-2,0650
c4a	-1,1532	-1,1441
c4b	-2,2237	-2,2048

Voor de spreiding rapporteren Bommer et al waarden van 0,5 per beving en ongeveer gelijke waarde voor de spreidingen tussen de bevingen. De totale spreiding gecombineerd bedraagt bij model (max hor) 0,7066 en bij model (max rot) 0,7050. Het model van Bommer et al is bruikbaar voor magnitudes tussen 2 en 4 en voor afstanden tot circa 50 km tot het epicentrum.

In een update van het eerste model van Bommer [7.5] is het toepassingsbereik verschoven naar $M = 1,8$ tot $M = 3,6$. Nieuwe coëfficiënten en nieuwe waarden voor de spreiding zijn bepaald.

Tabel 7.4: Overzicht van de coëfficiënten in de afstand/magnitude relatie volgens update model Bommer et al [7.5]

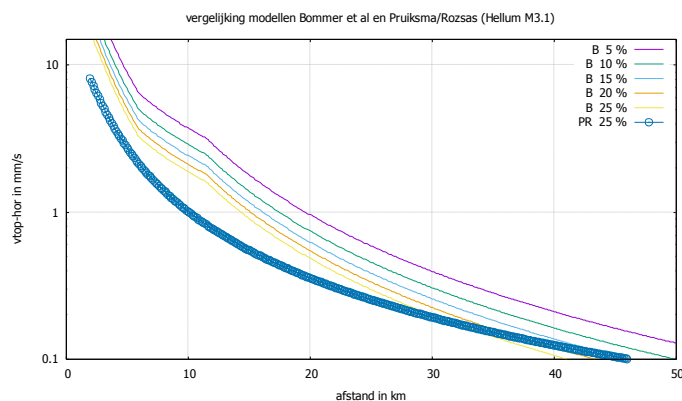
Coëfficiënt	Model max hor	Model max rot
c1	-5,6419	-5,4801
c2	2,4613	2,4509
c4	-2,0024	-2,0385
c4a	-1,2137	-1,1950
c4b	-1,7721	-1,7878

Voor de spreiding rapporteren Bommer et al waarden van 0,42 per beving en 0,52 voor de spreidingen tussen de bevingen. De totale spreiding gecombineerd bedraagt bij model (max hor)

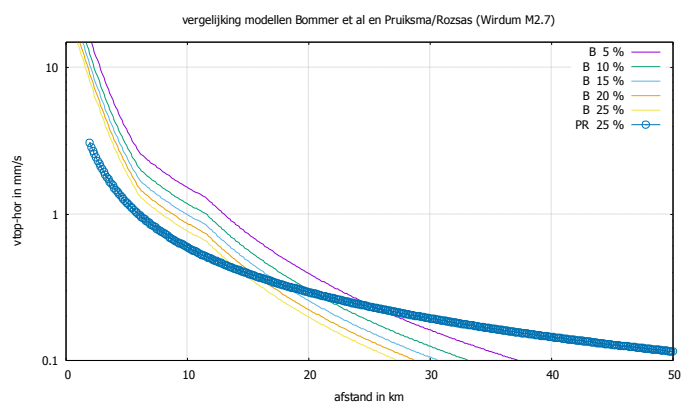
0,671 en bij model (max rot) 0,666. Zoals gemeld is deze update van het model van Bommer et al [7.5] bruikbaar voor magnitudes tussen 1,8 en 3,6 en voor afstanden tot circa 50 km tot het epicentrum.

7.2.5 Vergelijking van de resultaten van de beschikbare modellen

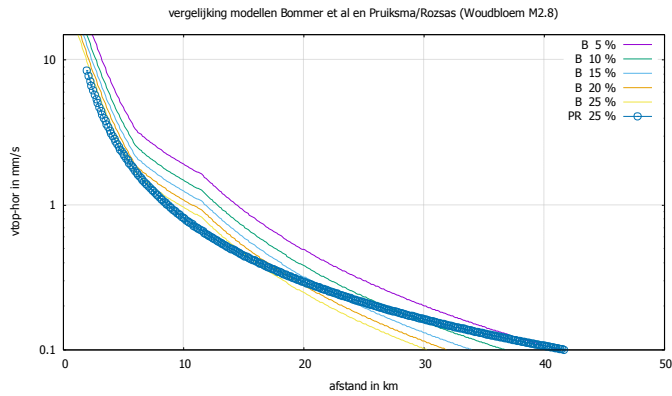
De locaties van de sensoren van de netwerken van TNO en KNMI verschillen fundamenteel. KNMI meet vooral in het vrije veld, aan het maaiveldoppervlak en op grotere diepte, terwijl de TNO sensoren in gebouwen staan opgesteld. Door deze verschillende plaatsing, zullen de registraties op een verschillende wijze zijn beïnvloed, bijvoorbeeld door de overdracht van de trillingen door de bodem op het gebouw. Uit de studie van TNO blijkt echter dat de verschillen in de topwaarden van de trillingssnelheid volgens het KNMI sensornetwerk en het TNO sensornetwerk desondanks vrij klein zijn. Dit biedt de gelegenheid de modelcurves uit de onderzoeken van TNO en Bommer et al. te vergelijken, zie figuren 7.4 tot en met 7.8. De verschillen lijnen bij het model Bommer (B in de figuur) geven verschillende overschrijdingskansen aan.



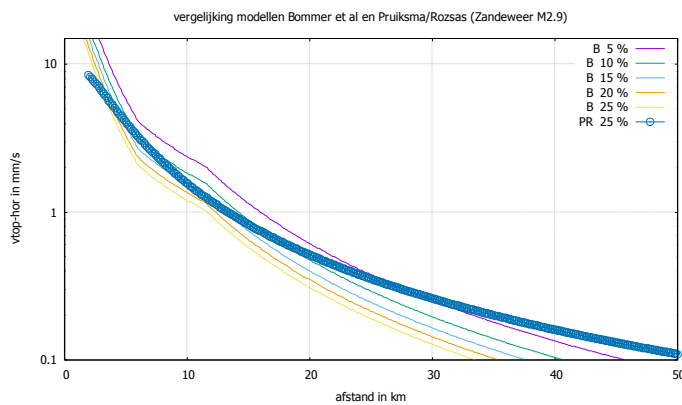
Figuur 7.4: vergelijking van de modellen van Bommer et al (aangeduid met B) en Pruiksm/Rozsas (aangeduid met PR) voor de beving Hellum (2015-09-30) met magnitude 3,1.



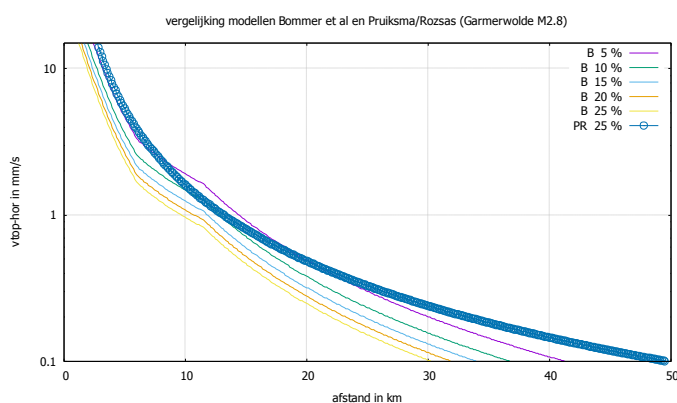
Figuur 7.5: vergelijking van de modellen van Bommer et al (aangeduid met B) en Pruiksm/Rozsas (aangeduid met PR) voor de beving Wirdum (2015-01-06) met magnitude 2,7.



Figuur 7.6: vergelijking van de modellen van Bommer et al (aangeduid met B) en Pruiksm/Rozsas (aangeduid met PR) voor de beving Woudbloem (2014-12-30) met magnitude 2,8.



Figuur 7.7: vergelijking van de modellen van Bommer et al (aangeduid met B) en Pruiksm/Rozsas (aangeduid met PR) voor de beving Zandeweer (2014-11-05) met magnitude 2,9.



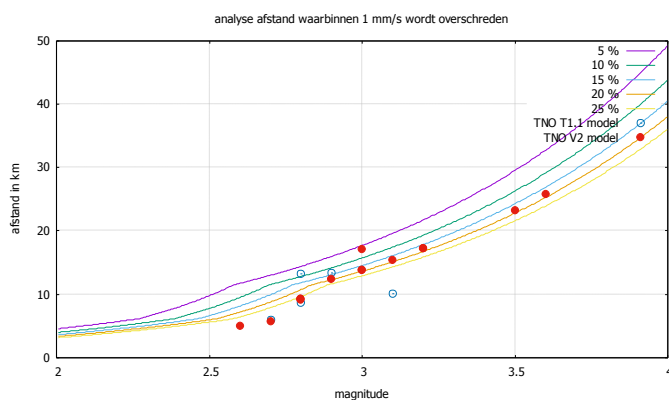
Figuur 7.8: vergelijking van de modellen van Bommer et al (aangeduid met B) en Pruiksm/Rozsas (aangeduid met PR) voor de beving Garmerwolde (2014-09-30) met magnitude 2,8.

Uit de vergelijking tussen beide modelbeschrijvingen blijkt dat Pruiksmas en Rozsas bij de laatste drie bevingen op basis van een groot aantal sensorregistraties in het TNO sensornetwerk, op een afstand van minder dan 20 km tot het epicentrum in het algemeen lagere waarden vinden dan Bommer et al.

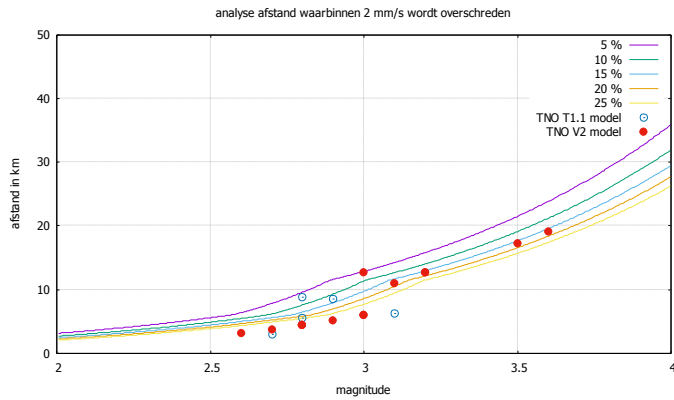
Voor grote afstanden levert de modelbeschrijving van Pruiksmas en Rozsas echter iets grotere waarden. Dit kan mogelijk verklaard worden uit het karakter van de meetpunten: in gebouwen zal altijd een zeker achtergrondtrillingsniveau aanwezig zijn, waardoor op grote afstanden de topwaarden van de snelheid in het model van Pruiksmas en Rozsas minder zullen afnemen. Op kortere afstand echter is mogelijk een gunstige invloed van de overdracht van trillingen van bodem naar gebouw waarneembaar. Het aantal vergelijkingsdata waarop we dit kunnen baseren is echter betrekkelijk gering. Bovendien tonen twee van de vijf door Pruiksmas en Rozsas geanalyseerde bevingen (met name Zandweer (2014-11-05) en Garmerwolde (2014-09030) op korte afstand tot het epicentrum een minder gunstig beeld.

De algemene indruk van de vergelijking van de twee modellen is dat zij qua trillingsterkte en afname met de afstand in redelijke overeenstemming zijn.

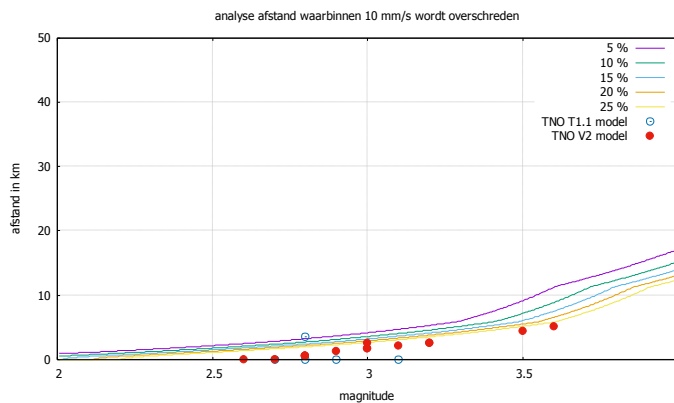
De resultaten van Pruiksmas/Rozsas en Bommer et al zijn ook op een andere wijze vergeleken. Met het oog op het beoordelen van de invloed van trillingen op een zeker afstand van het epicentrum, is voor 3 waarden van de trillingssnelheid nagegaan op welke afstand deze nog juist optreden. Dit is gedaan voor een overschrijdingskans van 25 % en bij de trillingssnelheid van 1 mm/s, 2 mm/s en 10 mm/s. In onderstaande figuren 7.9 tot en met 7.11 is aangegeven vanaf welke afstand tot het epicentrum deze waarden niet meer overschreden worden. De waarden 1 mm/s en 2 mm/s liggen op relatief grote afstand tot het epicentrum. Het model van Bommer geeft een beschrijving voor alle magnitudes en is weergegeven als een lijn in de figuur, de modellen van Pruiksmas en Rozsas geven resultaten per beving, aangeduid met de afzonderlijke punten in de figuur. De modelbeschrijving van Bommer et al. levert bij 1 mm/s en 2 mm/s afstanden in dezelfde orde van grootte als Pruiksmas en Rozsas, maar is niet altijd aan de conservatieve kant. Bij 10 mm/s zijn de modellen van Bommer et al echter wel duidelijk aan de voorzichtige kant, want er worden in de regel volgens het model van Bommer et al grotere afstanden gevonden dan in de analyse van Pruiksmas en Rozsas.



Figuur 7.9: Vergelijking van de afstanden, vanaf welke de topwaarde 1 mm/s niet meer wordt overschreden volgens Bommer et al (de getrokken lijnen) en Pruiksmas/Rozsas (de afzonderlijke punten volgens TNO T.1.1 model) en TNO V2 model)



Figuur 7.10: Vergelijking van de afstanden, waarbinnen de topwaarde 2 mm/s wordt overschreden volgens Bommer et al (de getrokken lijnen) en Pruiksmá/Rozsas (de afzonderlijke punten volgens TNO T.1.1 model) en TNO V2 model)



Figuur 7.11: Vergelijking van de afstanden, waarbinnen de topwaarde 10 mm/s wordt overschreden volgens Bommer et al (de getrokken lijnen) en Pruiksmá/Rozsas (de afzonderlijke punten volgens TNO T.1.1 model) en TNO V2 model)

TNO heeft ook een toets uitgevoerd op de geschiktheid van de update van het model van Bommer et al, door dit te vergelijken met de data uit het TNO sensor netwerk [7.8]. Hierbij moet bedacht worden dat de sensoren van het TNO sensor netwerk in gebouwen zijn geïnstalleerd, terwijl het model van Bommer is afgeleid voor trillingen op het vrije maaiveld. TNO concludeert dat de data uit het sensor netwerk en de modelcurven van Bommer et al [7.4, 7.5] in redelijke overeenstemming zijn. Bij de onderzochte bevingen in Helling, Wirdum en Scharmer vallen slechts enkele waarnemingen buiten het 95 % betrouwbaarheidsinterval op basis van het model van Bommer. Evenmin wordt een systematische onder- of overschatting van de gemeten trilling door het model waargenomen. Wel merkt TNO op dat bij kortere afstanden tot het epicentrum (afstand tot epicentrum kleiner dan 7 km), de gemiddelde waarde volgens het model van Bommer in de regel iets onder de door TNO waargenomen waarden ligt.

7.3 Achtergrondtrillingen

Het sensor netwerk van TNO biedt de mogelijkheid ook de trillingen te analyseren, die niet door bevingen worden veroorzaakt. Die trillingen kunnen ontstaan door een veelheid van bronnen, zowel

in als buiten het gebouw. We noemen die trillingen in deze studie 'achtergrondtrillingen'. Specifiek is in [7.3] en [7.7] onderzoek verricht naar de sterkte van de achtergrondtrillingen, die door het sensornetwerk van TNO in diverse gebouwen zijn gemeten. De analyse van deze achtergrondtrillingen geeft een goed beeld van de trillingsniveaus die in gebouwen door normaal gebruik of door veel voorkomende externe oorzaken optreden. Dit zijn trillingsniveaus die vaak voorkomen, een groot aantal verschillende andere oorzaken dan bevingen hebben, en waarbij de praktijk uitwijst dat gebouwen er – ook bij langdurige blootstelling - er geen schade van ondervinden.

Uit beide interpretaties [7.3] blijkt dat de grootste topwaarden over een tijdsinterval van een maand van veel voorkomende achtergrondtrillingen (mediaan) tussen 0,25 tot 1,36 mm/s liggen. De kansverdeling van de grootte van de grootste topwaarden per tijdseenheid (per uur, per dag, per maand of per jaar) laat zich redelijk benaderen met een lognormale verdeling. Volgens [6.7] bedraagt de verwachtingswaarde van de grootste top per jaar 0,6 mm/s voor vrijstaande woningen. Voor andere gebouwtypes liggen de waarden iets lager. De topwaarden van vaak voorkomende achtergrondtrillingen uit veel verschillende bronnen liggen doorgaans onder het niveau van 1 mm/s.

7.4 Overdracht van trillingen van bodem naar gebouw

Geconstateerd wordt dat de KNMI meetwaarden over de totale dataverzameling iets lager liggen dan de TNO meetwaarden, deze afwijking is echter niet systematisch en varieert naar gelang de vergeleken locaties. Oorzaken hiervoor kunnen zijn, op basis van [7.3]:

- Het systematische verschil kan ten dele worden veroorzaakt door trillingen die niet door de beving zijn veroorzaakt. Deze verschillen kunnen slechts ten dele verantwoordelijk zijn voor de waargenomen (kleine) verschillen.
- De TNO sensoren zijn aangebracht op funderingsniveau van gebouwen, terwijl de KNMI sensoren doorgaans zijn geïnstalleerd op funderingspunten op het maaiveld. Te verwachten is dat de TNO sensoren ten opzichte van de KNMI sensoren zijn beïnvloed door de gebouw specifieke respons op de aardbeving. Met andere woorden, zij bevatten ook de invloed van de overdrachtsverhouding van trillingen van bodem naar gebouw.

Voorts spelen ook nog een rol de onzekerheid in de bepaling door KNMI van de magnitude van de beving en de bepaling van de locatie van het epicentrum. Beide gegevens worden op basis van seismische waarnemingen vastgesteld. Gegevens over de nauwkeurigheid van deze bepaling zijn op dit moment niet voorhanden.

Bodemtrillingen worden niet één-op-één overgedragen op de gebouwen. De mate waarin de bodemtrillingen worden overgedragen op gebouwen wordt in de praktijk gekarakteriseerd met een frequentieafhankelijke overdrachtsverhouding of overdrachtsfunctie. De overdracht van trillingen is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de lokale bodemgesteldheid, het type fundering enzovoort. Om inzicht te krijgen in de overdracht van de trillingen kunnen de waarnemingen van TNO-trillingssensoren in gebouwen worden vergeleken met de bodemtrillingen die zijn gemeten door sensoren het KNMI-sensornetwerk, om zodoende de overdrachtsfuncties te kunnen bepalen. Een dergelijke studie is nog niet omvattend uitgevoerd. NAM voert op dit moment onderzoek uit naar de overdracht van trillingen van bodem naar gebouw. Resultaten van deze studie zijn nog niet beschikbaar. Echter, de resultaten van een analyse van sensoren in het TNO sensornetwerk [7.3] geven wel eerste indicaties over de verschillen in waarnemingen en dus over de grootste van de overdrachtsfuncties.

De modelcurven die in figuren 7.4 tot en met 7.8 (zie paragraaf 7.2) op basis van beide sensornetwerken zijn bepaald, geven een indruk van de verschillen en daarmee een indruk van de gemiddelde systematische afwijking, een indicatie van een gemiddelde overdrachtsverhouding. Op afstanden van minder dan 20 km tot het epicentrum vinden Pruiksmas en Rozsas in het algemeen lagere waarden dan Bommer et al. en voor grote afstanden levert de modelbeschrijving van Pruiksmas en Rozsas iets grotere waarden. Dit kan mogelijk verklaard worden uit het verschil in karakter tussen de TNO en KNMI meetpunten: TNO meet in gebouwen en in gebouwen zal altijd een zeker achtergrondtrillingsniveau aanwezig zijn. KNMI meet in het algemeen in vrije veldlocaties buiten de bebouwing. Hierdoor kunnen op grote afstanden de topwaarden van de snelheid in het model van Pruiksmas en Rozsas minder afnemen, omdat de waargenomen piekwaarden in het niveau van de achtergrondtrillingen in de gebouwen terecht komen. Op kortere afstand echter is mogelijk een gunstige invloed van de overdrachtsreductie van trillingen van bodem naar gebouw waarneembaar in de vergelijking tussen Pruiksmas en Rozsas enerzijds en Bommer et al. anderzijds. Het aantal vergelijkingsdata waarop we dit kunnen baseren is echter betrekkelijk gering.

Onze conclusie uit de vergelijking van de data van Pruiksmas en Rozsas en Bommer et al. is dat we hieruit geen heel duidelijke indicaties over de overdrachtsverhouding tussen trillingen gemeten in het vrije veld (KNMI) en trillingen gemeten in gebouwen (TNO) kunnen afleiden, versterkend noch reducerend. Voor zover waarneembaar, passen de gemeten registraties uit beide netwerken in hetzelfde patroon en zijn de gemiddelde verschillen klein. Om die reden wordt in deze studie geen rekening gehouden met overdrachtsverhoudingen tussen vrije veld en gebouwtrillingen. Hiermee treedt naar verwachting slechts een geringe onnauwkeurigheid op. Gericht onderzoek naar de overdracht van laagfrequente trillingen van maaiveld naar gebouwen kan dit nader onderbouwen.

7.5 Objectgerichte bepaling van trillingen als gevolg van alle historische bevingen

Nu de hiervoor gepresenteerde modelbeschrijving van Bommer et al. beschikbaar is en deze in goede overeenstemming is met de modelbeschrijving uit het TNO sensornetwerk, biedt dit de mogelijkheid voor willekeurige locaties de opgetreden sterkte van de trillingssnelheid aan het aardoppervlak met behulp van deze modellen te schatten. In deze studie is verder alleen gewerkt met het model van Bommer.

Voor een willekeurige locatie in de provincie Groningen kan per beving de afstand tot het epicentrum worden bepaald. In combinatie met de gegevens over de magnitude van die beving kan vervolgens worden bepaald welke trillingssnelheid op die locatie aan het maaiveld is opgetreden. Het resultaat is een kansverdeling van de trillingssnelheid. In deze studie wordt gewerkt met een overschrijdingskans van 25%, om aansluiting te vinden bij de interpretatie van de SBR Richtlijn A.

Voor de data van de geïnduceerde bevingen in termen van datum en tijdstip, magnitude, diepte en locatie van het epicentrum is gebruik gemaakt van de publiek beschikbare overzicht van de geïnduceerde bevingen in Nederland op de KNMI website [7.6]. Dit overzicht – zie bijlage D – bevat ruim 1400 geïnduceerde bevingen sinds 1986.

De modelbeschrijving van Bommer et al. is toegepast op deze volledige dataset van KNMI. Dit betekent in een aantal gevallen dat de modelbeschrijving ook buiten het toepassingsgebied van de magnitude (met name kleiner dan 1,8) en buiten het toepassingsgebied voor de afstand (met name groter dan 50 km) is gebruikt. Omdat in die gevallen de berekende trillingssterkte volgens het model

van Bommer toch al zeer klein zijn is afgezien van een verdere selectie van de bevingen in het overzicht: deze kleine bevingen of bevingen of grotere afstand vallen in termen van de berekende trillingssterkte al vanzelf in een zeer lage categorie.

Bijlage C bevat bij wijze van voorbeeld de berekende trillingsnelheid voor alle bevingen op een afzonderlijke locatie in de negen gebieden die in dit onderzoek zijn gehanteerd.

Per onderzoeksobject is over de tijdperiode 1986 tot en met 2017 *per beving* een overzicht bepaalde van de naar schatting opgetreden sterkste trillingen met een overschrijdingskans van 25 %. De objecten in de onderzoeksgebieden Bedum, 't Zandt en Slochteren tonen relatief grote topwaarden (tot in de orde van 10 or 20 mm/s), de onderzoeksgebieden Ulrum, Grijpskerk, Groningen, Veendam, Winschoten en Wolderdorp tonen over het algemeen lagere waarden (in de orde van 2 tot 6 mm/s). Bij het citeren van deze waarden moet steeds bedacht worden dat de werkelijke trillingen op locatie groter of kleiner kunnen zijn geweest, de geciteerde waarden hebben immers een overschrijdingskans van 25 %. Hoewel de invloed niet groot zal zijn, moet ook bedacht wordend dat dit trillingen op maaiveld betreft en niet op funderingsniveau van het gebouw.

Tevens is per onderzoeksobject de kans van overschrijden van een bepaalde trillingssterkte berekend op basis van alle historische geïnduceerde bevingen gezamenlijk. Hiermee kan de sterkte van de historisch opgetreden trillingen door bevingen gerepresenteerd worden in één getal.

8 Kwantificering van langzame bodembewegingen

8.1 Scope

De grootte en omvang van de langzame bodembewegingen, met name bodemdaling, als gevolg van gaswinning en andere mijnbouwactiviteiten wordt bepaald door middel van geodetische metingen. In het verleden betroffen dit met name peilmerkmetingen (waterpasbouten), waarbij de hoogte van deze peilmerken ten opzichte van NAP op basis van optische waterpassing werd bepaald. Deze metingen worden ten minste eenmaal per 5 jaar uitgevoerd. Het afgelopen decennium zijn meettechnieken gebaseerd op satellieten een goede aanvulling gebleken op deze waterpassingen. Er worden twee technieken toegepast: (1) radarinterferometrie en (2) Global Navigation Satellite Systems (GNSS), zoals GPS. Radarinterferometrie is een 'vlakdekkende' techniek die zich goed leent voor toepassing over grote gebieden, en met een wekelijkse herhalingsperiode. Voor GNSS dient een antenne geplaatst te worden, waardoor de bodemdaling in specifieke punten continu kan worden bepaald.

De langzame bodembewegingen worden op locaties van peilmerken met grote intervallen of voor een groot gebied bepaald, onder meer door waterpassing, maar niet specifiek voor panden die nu onderdeel vormen van deze studie. In deze studie specifiek gekeken naar de effecten van bewegingen die op of nabij de afzonderlijke onderzoeksobjecten kunnen worden gemeten. Hiervoor is satelliet radar interferometrie (InSAR) gebruikt. Om die reden wordt aan deze meetmethode hier aandacht besteed.

8.2 InSAR "Interferometrische Synthetische Apertuur Radar"

InSAR is een vlakdekkende meettechniek die gebruik maakt van radarbeelden die door satellieten worden opgenomen. Vanuit verschillende 'kijkrichtingen' worden tijdseries beelden verzameld. Vanuit elke afzonderlijke kijkrichting gebeurt dit met een specifieke satelliet om de 11 dagen, waarbij de data vanaf 2009 worden verzameld. Door de faseverschillen van de waarnemingen over verschillende tijdseries te vergelijken, kan een beeld worden gevormd van de deformatie. Bij de InSAR-methode worden uit van een satelliet opgenomen radarbeelden de bewegingen van coherente 'reflectoren', zogenaamde Persistent Scatterers (PS), op het aardoppervlak bepaald. Een tijdserie van beelden is nodig om deze Persistent Scatterers (PS) te identificeren; zij corresponderen veelal met de bebouwing en andere objecten. De techniek maakt het dan ook mogelijk om zettingen en zettingssnelheden te bepalen.

Alhoewel de gegevens 'vlakdekkend' worden opgenomen, is de locatie en dichtheid van de PS afhankelijk van de vorm en oriëntatie van de objecten, zoals huizen. Daardoor is de dichtheid van punten verschillend. Op en naast het ene huis kunnen tientallen PS meetpunten gevonden worden, terwijl er bij een ander huis mogelijk geen enkel meetpunt gevonden wordt. Typisch worden bij een stedelijk gebied enkele duizenden meetpunten gevonden per vierkante kilometer, maar in het

landelijk gebied is dit sterk afhankelijk van het aantal objecten (huizen, infrastructuur). Typisch zullen akkers en weiden nauwelijks significante meetpunten opleveren.

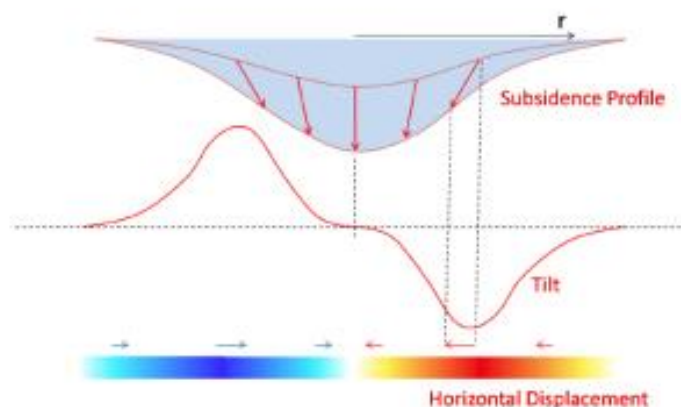
Omdat voor elke PS niet alleen de beweging, maar ook de hoogteligging wordt geschat, is het mogelijk om een onderscheid te maken tussen PS meetpunten op (het dak van) een gebouw, en PS op het maaiveld naast een gebouw. Daarmee worden twee verschillende datasets gegenereerd:

1. *Low*: Betreft een dataset met het deformatiegedrag van in de tijd coherente reflectiepunten. De geschatte hoogte van deze punten verschilt minder dan 3 meter van de lokale hoogte die volgt uit het actueel hoogte bestand Nederland (AHN) (lage reflectie punten, 'low').⁵
2. *High*: Betreft een dataset met het deformatiegedrag van in de tijd coherente reflectiepunten. De geschatte hoogte is meer dan 3 meter hoger dan de lokale hoogte die volgt uit het actueel hoogte bestand Nederland (hoge reflectie punten, 'high').

De interpretatie van interferometrische radarmetingen vereist een behoorlijk begrip van de aard van de meettechniek. Omdat er miljoenen meetpunten worden gevonden, elk met hun eigen karakteristieken, is het niet eenvoudig om een eenduidige interpretatie te doen, zonder tussenkomst van een geodetisch expert. Toch is er in dit project voor gekozen om een eenvoudige volautomatische analyse uit te voeren. Hierbij wordt op basis van een enkel pand (adres) een 'dashboard' gegenereerd met verschillende gegevens die uit de metingen volgen. Dit geeft de mogelijkheid om zeer snel de relevante gegevens naar voren te halen, en daarmee een eerste grove interpretatie te kunnen uitvoeren. Indien de gegevens daartoe aanleiding geven, is het echter belangrijk om bij de interpretatie assistentie te vragen van een geodetisch expert.

8.3 Kernmerken van de bodemdaling aan het aardoppervlak

Bij bodemdeformatie als gevolg van mijnbouwactiviteiten gaat de bodemdaling in de regel gepaard met zowel verticale als horizontale deformatie van het maaiveld, alhoewel de verticale deformatie dominant is. De bodemdaling verloopt in de regel komvormig, waardoor het maaiveld in eerste instantie een helling (trend) vertoont, en in tweede instantie een (licht-positieve en licht-negatieve) kromming. De helling is uit de verschillen in verticale deformatie af te leiden.



Figuur 8.1: Zakking, horizontale verplaatsing en hoekverdraaiing aan het bodemoppervlak

⁵ Doordat alle metingen behept zijn met meetfouten, is deze klassificatie tussen 'lage' en 'hoge' punten altijd gevoelig voor misklassificatie, wanneer de analyse vol-automatisch wordt gedaan, dus zonder tussenkomst van een expert. Dit soort detail analyse is dan ook een vereiste, wanneer de automatisch gegenereerde gegevens daar aanleiding toe geven.

Daarnaast zal in de bodem en aan het maaiveld, in de richting van de maximale deformatie, een horizontale lengteverandering of horizontale rek optreden. De grootte van de optredende bodemrek kan worden geschat uit de kromming van het maaiveld.

De mate van horizontale deformatie is groter, naarmate de verhouding tussen de diepte waarop de bodemdaling zich voordoet en de horizontale afmeting van het invloedgebied groot is. De grootste horizontale deformaties treden daardoor op bij lokale winning en lokale bodemdaling, zoals bijvoorbeeld nabij Veendam en Heiligerlee. Zij zijn daarentegen relatief klein bij grootschalige bodemdaling, zoals ten gevolge van de winning in het Groningenveld. In [8.4], [8.10] en [8.11] zijn methodieken gegeven om de horizontale deformatie, krommingen en rekken te schatten uit de waargenomen verticale bodemdeformatie.

8.4 Statusrapporten bodemdaling door aardgaswinning NAM Gasvelden

NAM rapporteert eens in de vijf jaar over haar bodemdalingsverwachtingen, rekening houdend met resultaten van actuele metingen en specifiek onderzoek. De meest recente prognose dateert uit 2015, die daarvoor uit 2010 [8.1, 8.2]. De bodemdalingsmetingen tonen aan dat de drukvariatie in de westelijke en noordwestelijke aquifers groter is dan eerder aangenomen. Deze variatie resulteert ook voor de toekomst in meer ruimtelijke verschillen in de gemodelleerde bodemdaling. Sinds 2010 zijn er een beperkt aantal nieuwe gasvelden in de winningsvergunningen Groningen, Noord-Friesland en Drenthe in ontwikkeling gebracht. De bodemdaling ten gevolge van de productie van deze velden is in de modellering meegenomen. Volgens verwachting zal de bodemdaling in het centrum van de schotel in het jaar 2080 ongeveer 47 cm bedragen. Voor 2050 wordt een maximale bodemdaling van 45 cm verwacht, vergelijkbaar met de voorspelling voor het jaar 2050 gedaan in 2010. Men verwacht een maximale bodemdaling van 50-65 cm aan het eind van de winningsperiode.

In 2013 is in Noord-Nederland een grote waterpassing uitgevoerd in combinatie met “Interferometrische Synthetische Apertuur Radar” (InSAR) metingen. Hiermee is de opgetreden bodemdaling door gaswinning bepaald. Gebleken is dat de bodemdaling die tot 2013 in het centrum van de schotel boven het gasveld Groningen is opgetreden circa 33 cm bedraagt.

In het statusrapport 2010 is reeds geconstateerd, dat InSAR een goede overeenkomst laat zien ten opzichte van waterpassing en beschouwd kan worden als complementaire techniek voor het monitoren van bodemdaling. Om de in het verleden door waterpassing opgebouwde tijdseries van metingen te kunnen voortzetten, worden de waargenomen PS bewegingen naar de locaties van de fysieke peilmerken van de waterpassing omgerekend. De gemiddelde beweging van alle PS in de onmiddellijke nabijheid van ieder peilmerk wordt dus als beweging van het peilmerk zelf beschouwd. Doordat meestal meerdere PS in de omgeving beschikbaar zijn, is het resultaat minder gevoelig voor uitschieters dan de waterpassing. In het meetregister 2014 heeft InSAR als primaire inwinningstechniek gefungeerd met waterpassingen ter validatie.

Boven het Groningenveld zijn in 2013 en 2014 11 permanente GPS stations geplaatst. Daarnaast wordt het reeds bestaande (referentie)station van Veendam nu ook als monitoringsstation gebruikt. Ook boven de ondergrondse gasopslag installaties Grijpskerk en Norg zijn permanente GPS stations opgesteld in 2014.

8.5 Monitoringsrapportage bodemdaling NEDMAG Borgercompagnie

De bodemdaling in het zoutwingsgebied van Nedmag wordt iedere twee jaar gemeten. Via een

optische waterpassing wordt van een zeer groot aantal meetpunten bepaald hoeveel deze gezakt zijn. De meetpunten zijn meestal aan goed gefundeerde gebouwen gevestigd of op speciaal aangebrachte betonpalen geplaatst. Door de daling van alle meetpunten te meten is een contourkaart van de daling gemaakt. Contouren zijn in dit geval lijnen met gelijke daling. Zo'n lijn verbindt bijvoorbeeld alle punten met een zakking van 20 mm. Het geheel van contourlijnen maakt de bodemdaling inzichtelijk op een kaart. Hierover is gerapporteerd in [8.3, 8.4]. Bijlage 8.1 geeft het resultaat van de waterpassing uit 2014 [8.4]. Het diepste deel van het bodemdalingsgebied in de figuur is ongeveer 36 cm gedaald (gerekend vanaf 1993).

8.6 Onderzoek bodemdaling Zuidwending

In opdracht van Gasunie heeft Antea Group een geodetisch onderzoek uitgevoerd naar de bodembeweging in de periode 2010 - 2015 in de aardgasbuffer [8.5, 8.6]. Dit geodetisch onderzoek bestaat uit een vergelijking van de meetresultaten voortkomend uit de ingezette meettechnieken; Global Navigation Satellite System (GNSS), radarinterferometrie (InSAR) en optische waterpassing. Dit onderzoek is een aanvulling op de studie naar historische bodembeweging (2003 – 2014) zoals gerapporteerd in [8.7]. Het doel van deze vergelijkende studie was om via gegevensvergelijking de verschillen en overeenkomsten in ruimte en tijd, als wel de voor- en nadelen van de meettechnieken, te bepalen.

Op basis van de uitgevoerde secundaire optische waterpasmetingen uitgevoerd in 2011 en 2016 zijn de differenties per gemeten peilmerk bepaald, zie ook het meetregister meetnet Zuidwending 2016 [8.6]. De peilmerkdaling in de periode januari 2011 – januari 2016 is in de vorm van contourlijnen (isolijnen) bepaald. De contourlijnen zijn indicatief en gebaseerd op een lineaire interpolatie methode. Op basis van deze interpolatie is het diepste punt bepaald als gevolg van de bodemdaling in de periode januari 2011 – januari 2016 met 24 mm daling, bij een lineaire dalingsnelheid van ca. 4.8 mm/jaar. Fysieke peilmerken tonen in de periode januari 2011 – januari 2016 een daling van gemiddeld ca. 22 mm, dus gemiddeld ca. 4.4 mm/jaar. Deze bodemdaling treedt gelijkmatig op.

8.7 Indicatie bodemdaling Heiligerlee

Referentie [8.8] bevat indicatieve gegevens van de lokale bodemdaling Heiligerlee. Andere openbare bronnen met bodemdalingsgegevens als gevolg van de zoutwinning en gasopslag te Heiligerlee zijn niet aangetroffen.

8.8 Objectgerichte data op basis van gerapporteerde bodemdalingen

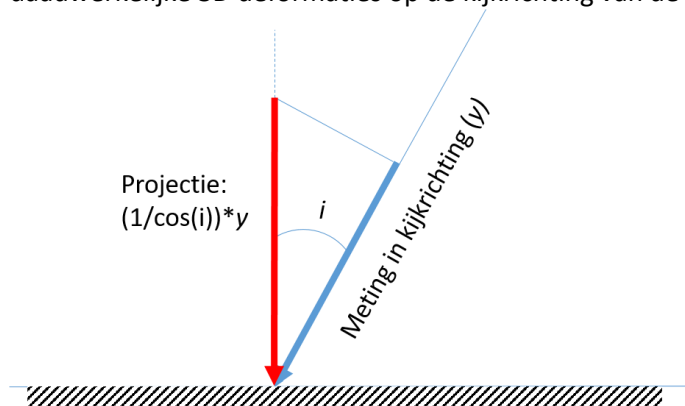
Per onderzoeksobject is op basis van bovenstaande informatie per pand een schatting gemaakt van de invloed van de diepe bodemdaling in termen van daling en dalingsnelheid, de scheefstand (helling), kromming (verandering van de helling over de afstand) en relatieve hoekverdraaiing. Deze schattingen zijn gemaakt op basis van de onderlinge afstand van de vier contourlijnen, twee ter weerszijden van het object. Indien minder contourlijnen beschikbaar zijn, kunnen sommige indicatoren niet worden berekend.

8.9 Objectgerichte data met behulp van InSAR

Voor de onderzoeksobjecten zijn in [8.9] twee InSAR datasets gemaakt op basis van data van het BAG register en van de Algemene Hoogtekaart Nederland (AHN), met hoge meetpunten (hoger dan 3 meter boven maaiveld) en lage meetpunten. Hierbij is gekeken naar alle meetpunten gevonden binnen een buffer van 10 m rondom het object. Het aantal persistente reflectoren is afhankelijk van de lokale situatie en bedraagt in een gunstig geval enkele tientallen.

Er zijn drie verschillende datasets voor het Groningse gebied beschikbaar, zie tabel 8.1. Deze verschillen in het punt vanuit de ruimte van waaruit naar de objecten gekeken wordt. Twee daarvan zijn opgenomen vanuit een ‘dalende’ baan; de satelliet bewoog van noord naar zuid, en keek ongeveer vanuit het oosten naar het gebied. De andere is opgenomen vanuit een ‘klimmende’ baan: de satelliet bewoog van zuid naar noord, en keek ongeveer vanuit het westen naar het gebied. De dalende en klimmende banen zien dus ook een ‘andere kant’ van het object. De meetpunten kunnen dan ook op compleet verschillende plekken liggen: ze zijn onafhankelijk van elkaar. Hierdoor wordt de betrouwbaarheid van de informatie vergroot.

De gegevens vanuit de drie verschillende datasets zijn gegeven in de specifieke ‘kijkrichting’ van de satelliet. Naast de bovengenoemde horizontale richting van waaruit gekeken wordt, is er ook een verticale richting, zie tabel 8.1. De gemeten deformaties zijn hierdoor de projecties van de daadwerkelijke 3D deformaties op de kijkrichting van de satelliet.



Figuur 8.2: Schets van de projectie vanuit de kijkrichting van de satelliet naar de verticaal. Hiervoor dient de meting vermenigvuldigd te worden met een projectiefactor, zie tabel 8.1

Tot slot verschilt voor elke dataset de hoeveelheid data. De gegevens zijn opgenomen vanaf een bepaalde startdatum, en worden vanaf 2013 elke 11 dagen herhaald.

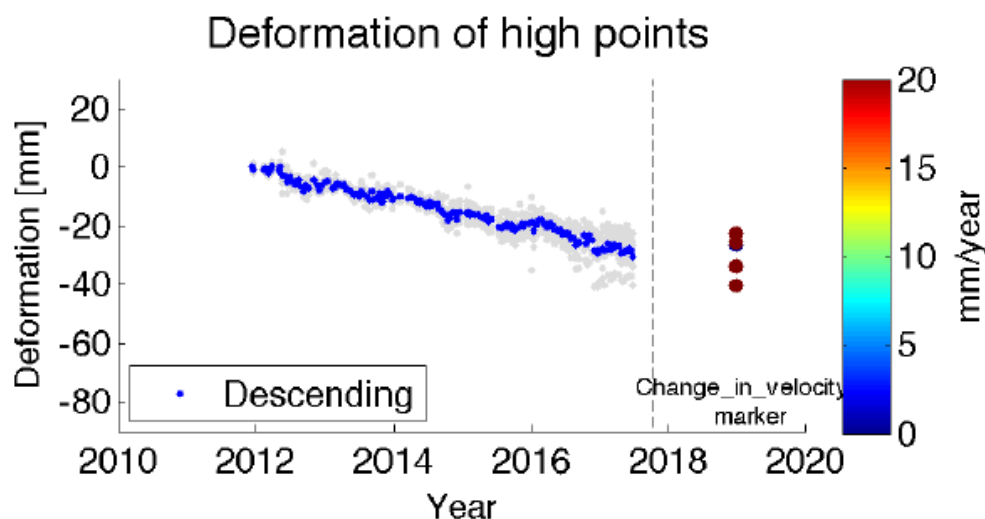
Tabel 8.1: Eigenschappen van de verschillende datasets

Dataset/passage	Dalend-1	Dalend-2	Klimmend
Tijdvak	jun-2013 – nu	dec-2011 – nu	jun-2013 – nu
Tijdsinterval (dagen)	11	11	11
Aantal beelden	127	156	117
Verticale kijkhoek i (graden)	26.5 (vanaf verticaal)	37.4 (vanaf verticaal)	31.1 (vanaf verticaal)
Projectiefactor $1/\cos(i)$	1.12	1.26	1.17
Horizontale kijkhoek (graden)	102 (vanuit OZO)	101 (vanuit OZO)	259 (vanuit WZW)

Per dataset is de gemiddelde dalingsnelheid bepaald voor zowel de hoge als de lage punten. Tevens is het gemiddelde hiervan bepaald over alle hoge punten en alle lage punten. Hiermee is een indicatie beschikbaar van de snelheid van de meetpunten (i) op het object en (ii) de meetpunten in de directe omgeving. De variatie rondom de gemiddelde snelheid van alle meetpunten is in beide datasets per meetpunt aangegeven met een kleurcode. Hiermee kan *een indicatie* worden verkregen van punten met een grotere of minder grote bewegingssnelheid. De bepaling van het gemiddelde over een groot aantal punten geeft tevens een indicatie van de spreiding in de snelheid. Ook deze is bepaald in de vorm van een marge, afgeleid uit de verdeling van de snelheden van de groep meetpunten.

Het gemiddelde verschil in snelheid van de lage punten en de hoge punten is bepaald. Daarmee is er een indicatie of de snelheid van het gebouw structureel afwijkt van de snelheid van de bodem.

Per meetpunt is nagegaan of, en in welke mate, snelheidsvariaties over de beschouwde tijdsperiode zijn opgetreden. Dit kan een indicatie zijn voor wijzigingen in omstandigheden. Hiertoe is de tijdregistraties opgesplitst in stukken van 20 waarnemingen, is per deelserie de snelheid bepaald en zijn de grootste verschillen in snelheid geregistreerd. De mate van verschil is aangegeven met een kleurcode. Snelheidsverschillen kunnen bijvoorbeeld gerelateerd zijn aan variaties in grondwaterstand maar ook aan uitzettingsverschillen in een gebouw als gevolg van temperatuur (zomer-wintervariaties).



Figuur 8.3: Indicatie van de optredende snelheidsverschillen

Voor alle meetpunten op het maaiveld (de lage punten) is tenslotte een schatting gemaakt van de verandering van kromming van het aardoppervlak gedurende de meetperiode door een tweedegraads polynoom zo goed mogelijk door alle lage punten te passen:

$$z(x, y) = a + by + cy^2 + dx + ex^2 + fxy$$

Specifiek wordt hier nog ingegaan op verschillen tussen de snelheden van de drie satellietbanen ten gevolge van de kijkrichting van de satelliet, dat wil zeggen de horizontale en verticale kijkhoek, zie tabel 8.1.

Bij een verticale kijkhoek, i , tussen de 26 en 37 graden, dient bij een puur verticale beweging de gemeten beweging (of bewegingssnelheid) vermenigvuldigd te worden met de projectiefactor $1/\cos(i)$, zie de waarden in tabel 8.1. Voor een horizontale component in de 3D deformatievector is

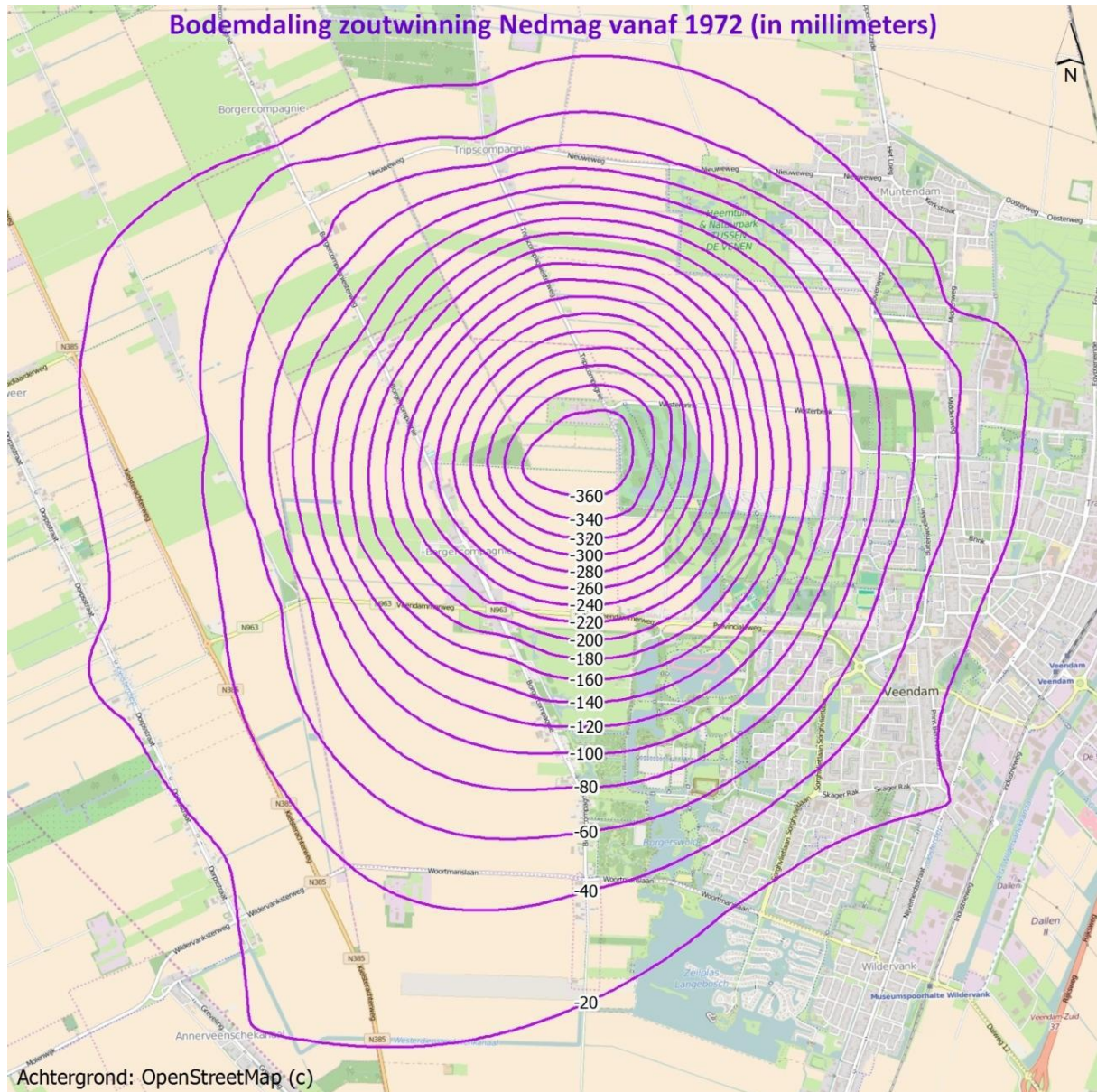
het afhankelijk van zowel de horizontale kijkhoek als de verticale kijkhoek welke geprojecteerde deformatie wordt gemeten.

Vanwege (i) de verschillende verticale kijkhoeken, en (ii) de verschillende horizontale kijkhoeken (voornamelijk dalende versus klimmende banen), zullen de numerieke waarden van de verschillende satelliet datasets verschillen, ongeacht of de werkelijke deformatie alleen verticaal of ook horizontaal is.

Afwijkingen tussen de berekende verticale deformaties van verschillende datasets kunnen een indicatie zijn van horizontale deformaties, zie bijvoorbeeld [8.10].

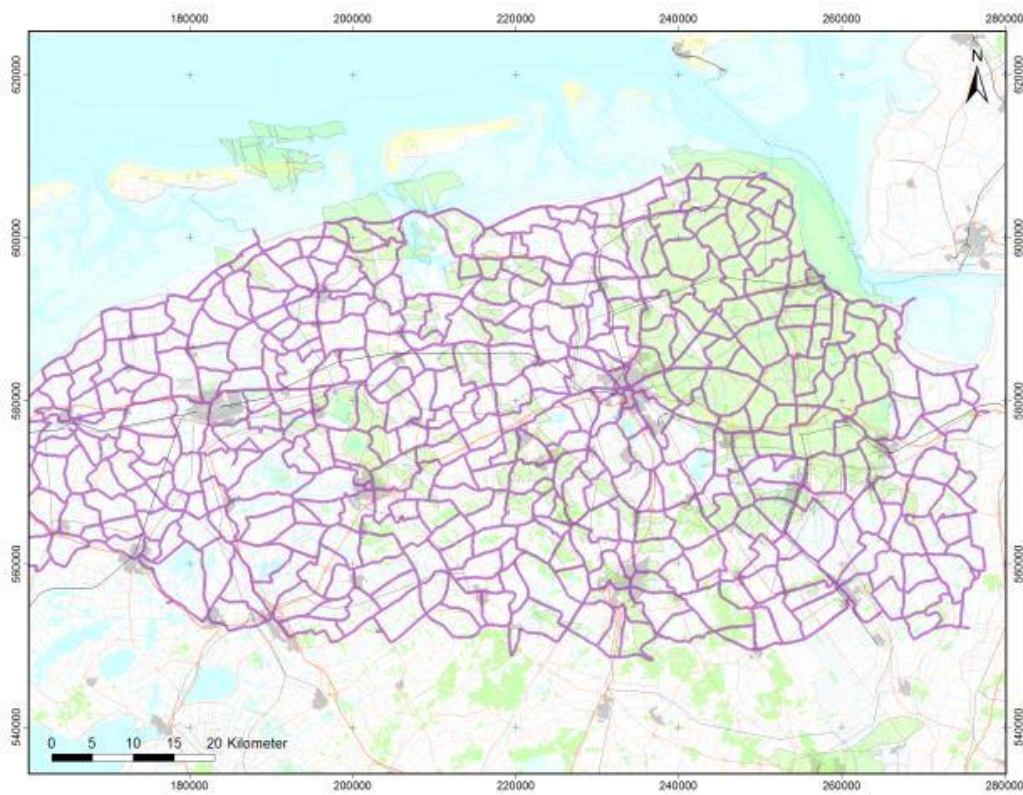
De InSAR data is beschikbaar voor 63 van de 69 objecten in het onderzoek. Dit heeft te maken met de baan en kijkrichting van de satelliet. Data is niet volledig beschikbaar voor het onderzoeksgebied De Marne, en eveneens niet beschikbaar voor twee objecten in het onderzoeksgebied Zuidhorn en voor één object in het onderzoeksgebied Woldendorp e.o.

Bijlage 8.1



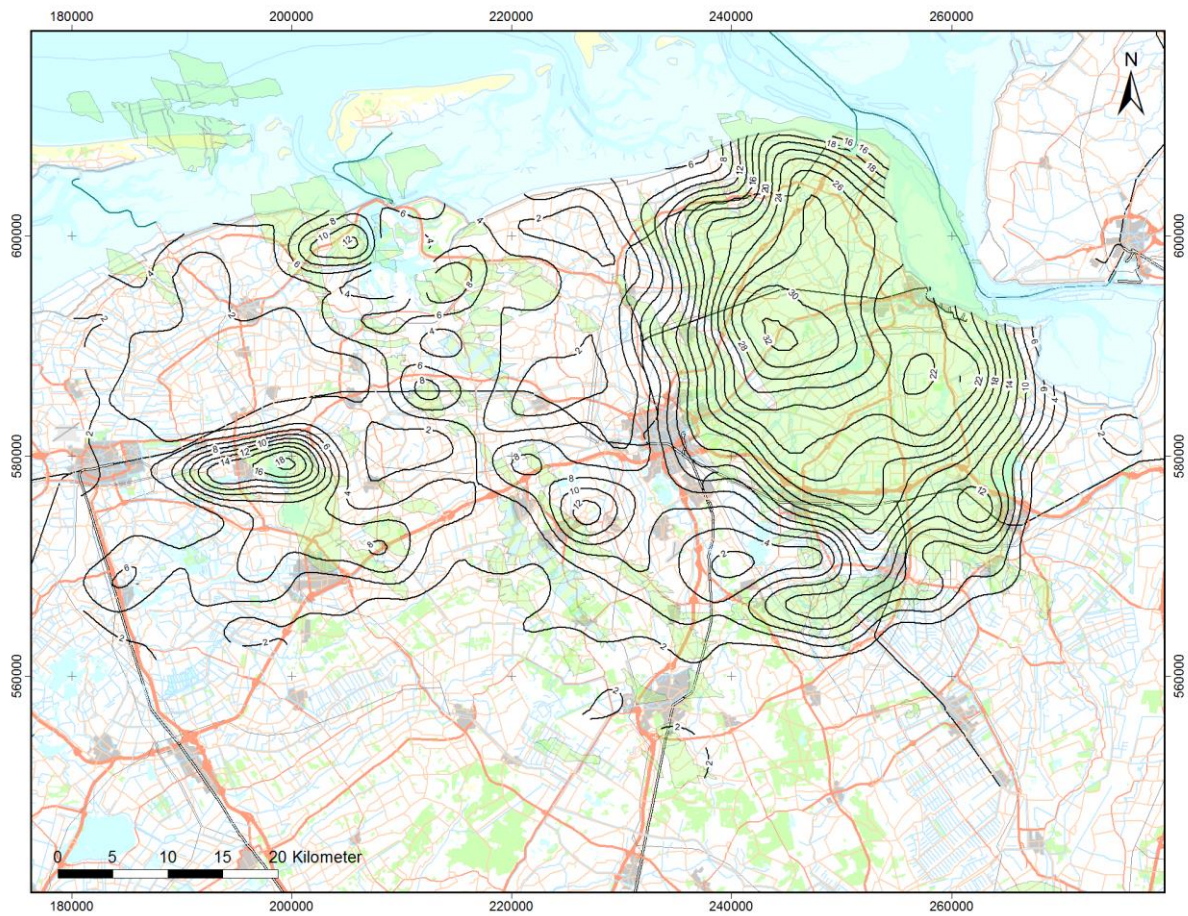
Gemeten bodemdaling als gevolg van zoutwinning Nedmag Borgercompagnie, ontleend aan [8.4]

Bijlage 8.2



Waterpastraject voor bodemdalingsrapportage, ontleend aan [8.1]

Bijlage 8.3



Contourkaart voor bodemdaling door gaswinning, opgetreden tussen start van de productie en de waterpassing in 2013 op basis van ruimte-tijd analyse van waterpasdata (cm). Ontleend aan [8.1]

9. Kwantificering van wijzigingen in de waterhuishouding

9.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat een overzicht van de uitgevoerde studies naar de invloed van de wijzigingen op de waterhuishouding als gevolg van de diepe bodemdaling of als gevolg van andere aanpassingen in de waterhuishouding.

9.2 Aanpassingen van de oppervlaktepeilen door waterschappen

9.2.1 Inleiding

Oppervlaktewaterpeilen zijn doorgaans over grotere gebieden bekend en worden over grotere gebieden gereguleerd. Aanpassing van de oppervlaktewaterpeilen is onderhevig aan formele besluitvorming bij de waterschappen. De waterschappen zijn verantwoordelijk voor het peilbeheer. Het beheergebied van een waterschap is verdeeld in zogenoemde peilvakken, ook wel peilgebieden genoemd. Per peilvak wordt een waterpeil vastgesteld. Dit gebeurt met een peilbesluit. Voor elk peilvak is er, naast een referentiepeil, een hoogste en een laagste peil die worden vastgelegd in het peilbesluit. Om gevolgen van bodemdaling door mijnbouwactiviteiten te compenseren kan het nodig zijn waterpeilen aan te passen, het peil te verlagen. Indien er geen peilcorrecties worden uitgevoerd resulteert dit bij bodemdaling in een (relatieve) stijging van de grondwaterstand.

Voor analyse van het oppervlaktewaterpeil zijn peilgegevens van de betreffende waterschappen (Hunze en Aa's en Noorderzijlvest) geraadpleegd. Grote peilaanpassingen die verband houden met de grootschalige bodemdaling in Groningen betreffen de differentiatie in waterpeilen in de Electraboezem, door deze op te knippen in een eerste, tweede en derde schil. Ook in de Oldambtboezem en de Duurswoldboezem zijn peilen aangepast als gevolg van de bodemdaling. In deze paragraaf bespreken we de grote aanpassingen in de boezempeilen.

9.2.2. Electraboezem

De Electraboezem in het noordelijk deel van Groningen is met het oog op de bodemdaling in Groningen opgeknipt in drie peilgebieden, de zgn. eerste, tweede en derde schil. Het peil van de meest westelijk gelegen derde schil is niet aangepast en bedraagt sinds 1969 (sluiting Lauwerszee) peil -0,93 m NAP. Het boezempeil in de derde schil van de Electraboezem is relevant voor objecten in de onderzoeksgebieden Zuidhorn e.o., De Marne e.o. en ook in het boezemgebied Westerkwartier (Groningen).

In de binnenste eerste schil is in 1985 een tijdelijke bemaling gekomen met peilverlaging van 10 cm naar -1,03 m NAP. In 1992-1994 werd het gemaal Den Deel gesticht waarbij het peil -1,10 m NAP werd. In 2000 is -1,16 m NAP ingesteld tot op heden. Dit boezempeil is van belang voor enkele objecten nabij Bedum

In de tweede schil is sinds 2008 een peil van NAP – 1,07 m ingesteld. Dit boezempeil is van belang voor een aantal objecten in het gebied Bedum e.o. (met name Onderdendam). Bovenstaande informatie is aangeleverd door het Waterschap Noorderzijlvest [9.16]

9.2.3 Fivelingoboezem

In 1989 is door waterschap Noorderzijlvest een peilbesluit genomen, waarin het bodemdalingseffect is verwerkt. Hierbij is het winterpeil is aangepast van NAP -1.20 m naar NAP -1.33 m NAP en het zomerpeil naar NAP -1.20 m. [8.16]

9.2.4 Duurswoldboezem

De Duurswoldboezem [9.11] is het relevant boezempeil voor onderzoeksgebied Slochteren e.o. Het peil is de afgelopen 30 jaar tweemaal aangepast, namelijk in 1986 en 2014. Het voorlaatste peilbesluit voor de Duurswoldboezem dateerde uit 1986 en het peil bedraagt sindsdien in de zomer NAP -1,07 m en in de winter NAP -1,12 m. Nadien is de bodem met circa 10 cm gedaald ten gevolge van de aardgaswinning. De bodemdaling heeft gevolgen voor de waterhuishouding. In 2014 is besloten het tegennatuurlijke peilregime te wijzigen in een meer natuurlijk peilbeheer dat in het voorjaar uitzakt naar het zomerpeil van minimaal 1,22 m – NAP. In het winterhalfjaar zal het zomerpeil geleidelijk stijgen van 1,22 – NAP in september tot 1,02 m – NAP in maart. Ter compensatie van de geprognosticeerde, voortgaande bodemdaling door de gaswinning zal in 2019 het streefpeil met 5 cm worden aangepast naar een zomerpeil van minimaal 1,27 m – NAP oplopend naar een maximum van 1,07 m – NAP aan het einde van de winter.

9.2.5 Oldambtboezem

De Oldambtboezem [9.12] is relevant voor het oostelijk deel van de provincie, met name de onderzoeksgebieden Woldendorp. Het voorlaatste peilbesluit voor de Oldambtboezem dateert uit 1989. Toen is een peil van -1,36 m. NAP vastgesteld. Daarvóór was het peil -1,28 m. NAP. Sinds die 1989 is de bodem in het Oldambtgebied gemiddeld circa 10 cm gedaald, ten gevolge van de aardgaswinning. De bodemdaling heeft gevolgen voor de waterhuishouding. Door het boezempeil te verlagen en zodoende de bodemdaling te volgen wordt in principe de oude situatie hersteld. In 2015 is het peilbesluit genomen om het peil in de Oldambtboezem met 10 cm te verlagen tot NAP -1,46 m.

9.2.6 Winschoten en Blauwestad

In 2017 is voor Winschoten en omgeving een nieuw peilbesluit vastgesteld [9.13]. Bij alle zeventien peilgebieden wordt voorgesteld het huidige winter- en zomerpeil te handhaven. Dit peilbesluit is relevant van onderzoeksobjecten in het gebied Winschoten e.o.

In 2015 is voor Blauwestad een peilbesluit vastgesteld [9.14], waarbij een aantal zomer en winterpeilen zijn aangepast. Dit peilbesluit is relevant voor onderzoeksobjecten in het gebied Winschoten e.o.

9.2.7 Veendam-Muntendam

In 2016 is voor het gebied Veendam-Muntendam een peilbesluit vastgesteld [9.15], waarbij een aantal zomer en winterpeilen zijn aangepast. Dit peilbesluit is relevant voor onderzoeksobjecten in het gebied Veendam e.o.

9.3 Invloed gaswinning onder de Waddenzee op Electraboezem (3^e schil)

Een studie van Zoetendal e.a. [9.1] beschrijft de invloed van de gaswinningen onder de Waddenzee vanaf de bestaande locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen op de waterhuishouding (grond- en oppervlaktewatersysteem). Hierbij is ook de invloed van de bodemdaling op de Electraboezem (3^e schil) bepaald en op de westelijke polders van het onderzoeksgebied 'De Marne' en 'Zuidhorn'.

9.4 Effectonderzoek peilaanpassingen Electraboezem 2^e schil op grondwaterstand

In een studie van Ebbers [9.3] zijn in opdracht van het waterschap een hydrologisch meetnet met tien meetraaien ingericht in de zes woonkernen binnen de 2e schil: Winsum, Baflo, Mensingeweer, Warffum, Eenrum en Den Andel. Hierbij zijn peilbuizen geplaatst in zowel het freatische als het diepe grondwater, naast meetpunten van het oppervlaktewaterpeil. Het hydrologische meetnet is ingesteld om de effecten van de verlaging van het streefpeil van de Electraboezem 2e schil te monitoren.

In een studie van Von Asmuth [9.4] na het doorvoeren van de peilaanpassing in de Electraboezem 2^e schil is vervolgens nagegaan of er (via tijdreeksanalyse) effecten van de boezempeilverlaging vast te stellen zijn in de inmiddels verzamelde stijghoogtegegevens, en zo ja hoe groot en betrouwbaar deze zijn. Voorts is nagegaan wat het effect van de bodemdaling op zowel de werkelijke hydrologische situatie als de meetgegevens, en in hoeverre deze interfereren die met de effectenanalyse.

In de onderzochte situatie doorsnijdt de boezem de deklaag niet volledig, waardoor de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket hoger is dan het boezempeil. Ook de grondwaterstanden in de deklaag zijn doorgaans hoger dan het boezempeil, zodat de deklaag afwatert richting boezem binnen het invloedgebied daarvan. Op verdere afstand van de boezem draineert de deklaag in hoofdzaak naar de onderliggende zandlagen c.q. het onderliggende watervoerende pakket. Vanwege de ondiepe grondwaterspiegel en de ligging in stedelijk gebied kunnen daarnaast de processen in de onverzadigde zone, droogvallende drainage (al dan niet in de vorm van lekkende riolering of zandlagen) en die aan het (verharde) maaiveld een merkbare invloed hebben op de grondwaterdynamiek. Deze processen kunnen ervoor zorgen dat het grondwatersysteem c.q. de grondwaterspiegel in technische termen 'niet lineair' reageert op neerslag en verdamping. Uit de studie blijkt dat onder deze omstandigheden de reikwijdte van het effect van de peilaanpassing in de regel beperkt is tot circa 35 m vanaf het open water.

Verder wordt geconstateerd dat de geschatte effecten over het algemeen goed overeen met de door Bijngte e.a., [9.2] voorspelde hydrologische effecten. De reikwijdte van het effect lijkt in enkele meetraaien weliswaar groter te zijn dan de 25 meter die in [9.2] als maximum aangehouden wordt, maar de precieze reikwijdte is hier niet goed te bepalen omdat het effect in dat geval verder reikt dan de verste peilbuis. In de meeste meetraaien is een duidelijke afname van de doorwerking te zien met de afstand tot de boezem, wat gezien de geohydrologische situatie ook de verwachting is. De mate waarin boezempeilverlaging doorwerkt wordt gelijk verondersteld aan de mate waarin het boezempeil zelf doorwerkt, omdat we het aannemelijk is dat de boezempeilverlaging het gedrag van het grondwatersysteem niet grootschalig of significant beïnvloedt.

9.5 Hydrologie van wierden

Referentie [9.7] bevat een hydrologisch onderzoek op en rondom de wierden Fransum, Bes werd en Ken werd. In de wierde zijn sporen, verkleuringen en organische resten zoals hout, lederwaren en

textiel aanwezig die onder vochtige omstandigheden goed bewaard blijven. Een van de bedreigingen voor deze archeologische waarden is verdroging. Als de grondwaterstand zakt kan zuurstof toetreden en worden de archeologische waarden door oxidatie aangetast. Met het oog op bescherming van deze waarden wordt een geo-hydrologisch onderzoek dan ook van belang geacht. De studie richt zich op de volgende onderzoeksvragen (1) Hoe functioneert de lokale waterhuishouding van de wierden Fransum, Beswerd en Kenwerd, (2) Wat is de relatie tussen de lokale waterhuishouding en regionale waterhuishouding en (3) wat zijn mogelijke oorzaken van verdroging of kan in de toekomst nog verdere verdroging optreden.

Een wierde is een verhoogde woonplaats die is opgebouwd uit kwelderzoden en organisch materiaal. Referentie [9.8] beschrijft de opbouw en uitgevoerd onderzoek naar opbouw en samenstelling van wierden. Aan de onderzijde wordt de wierde afgesloten door een holocene deklaag. Zowel de holocene deklaag als het ophoogmateriaal van de wierde is slechtdoor-latend voor grondwater. Hierdoor kan het grondwater onder de wierde moeilijk afstromen en zal onder de wierde in het algemeen (iets) hoger staan dan in de omgeving. Door de (eventuele) opbolling van het grondwater onder de wierde worden de archeologische waarden behouden voor verdroging. In principe zijn een drietal verdrogingsoorzaken aan te wijzen (1) Afname van de voeding van bovenaf; (2) zijdelingse afstroming; (3) infiltratie naar het diepere watervoerend pakket.

Het onderzoek is gebaseerd op een aantal peilbuiswaarnemingen gedurende langere tijd. Uit de waarnemingen wordt afgeleid dat de correlatie tussen de ondiepe en diepe grondwaterstanden groter is dan de tussen de ondiepe onderling. Deze resultaten duiden erop dat de grondwaterstand in de ondiepe peilbuizen sterk afhankelijk is van grondwaterstand in de diepe peilbuizen. In één geval blijken maatregelen die betrekking hebben op de ontwateringssloot direct naast de wierde geen significant effect te hebben op de opbolling van de grondwaterstand onder de wierde. De effecten blijven zeer lokaal en nabij de sloot. Verlaging van de regionale grondwaterstand heeft het sterkste effect op de grondwaterstand onder de wierde. Een verlaging van het polderpeil in de omgeving en daarmee de regionale grondwaterstand heeft een vergelijkbare verlaging van de grondwaterstand onder de wierde tot gevolg.

Op basis van de modelstudie en de data-analyse is naar voren gekomen dat de grondwaterstand onder de wierde sterk samenhangt met de waterstand van het diepe watervoerend pakket. Voor de hydrologische situatie van een wierde is derhalve de belangrijkste vraag hoe de regionale grondwaterstand zich in de loop der jaren heeft gedragen. Dit geeft inzicht in de mate van verdroging die reeds is opgetreden.

9.6 Hydrologisch onderzoek Borgercompagnie

Voor het winningsgebied van Nedmag is in 2013 een uitgebreid hydrologisch onderzoek uitgevoerd door Arcadis [9.9] in opdracht van het Waterschap Hunze en Aa. De vraagstelling in dit onderzoek richt zich op de historie aan hydrologische ingrepen binnen het bodemdalingsgebied en omgeving, de samenhang van hydrologie en gebouwschade, de aanwezigheid van zetting- en oxidatiegevoelige lagen en op welke diepte bevinden deze zich ten opzichte van de grondwaterstand, het grondwaterstandverloop, indicaties voor stijghoogteveranderingen vanaf 1993, wijzigingen in het peilbeheer en de effecten op de grondwaterstand en tenslotte op andere invloedfactoren.

Voor de oppervlaktewaterhydrologie is in deze studie met van de bronnen bestaand uit waterstaatskaarten en beschikbare herinrichtingsplannen van 1970-1974, 1990-1993 een tijdbalk gecreëerd van de waterhuishoudkundige geschiedenis. De historie van grondwaterstandsverloop is geanalyseerd aan de hand van grondwaterstandsreeksen beschikbaar in de DINO database. In het

gebied is een aantal ingrepen in het hydrologische systeem die effecten op de grondwaterstijghoogten hebben gehad. Het gaat hier om:

- Demping, graven en verondiepen van de kanalen (Borgercompagniesterdiep).
- Riolaanleg.
- Grond- en oppervlaktewaterbeheersing rond afvalverwerking Veendam (Borgercompagnie).
- Onttrekkingen.
- Maatregelen waterhuishouding voor de bodemdaling door zoutwinning.

De studie concludeert op basis van waterstaatskaarten dat er in de loop van de tijd diverse aanpassingen in peilbeheer hebben plaatsgehad, tot de herinrichting Veenkoloniën in de jaren '90. De peilen en de peilgrenzen uit de waterstaatkaart van 1979 zijn met de toenmalige rayonbeheerder besproken en geactualiseerd naar het werkelijk gevoerde peil voor herinrichting. Dit leidt tot het volgende beeld.

Voor 1970

Het peil in het Borgercompagniesterdiep ten zuiden van het Borgercompagniesterverlaat en het Tripscompagniesterdiep was het zogenaamde Winschoterpeil van NAP + 0,62 m. Dit peil is relevant voor het zuidelijk deel van Borgercompagnie, aan beide zijden. Het peil in het Waterschap Borgercompagnie Oostkant is NAP + 0,47 m. Het gebied ten noordwesten van Langeleegte heeft een historisch peil van NAP + 0,65 m.

Voor 1990

Voor de herinrichting zijn waterstaatskaarten beschikbaar met daarop de peilen. De meest representatieve beschikbare peilenkaart voor die periode is de waterstaatskaart van 1978. Hieruit blijkt dat het peil aan de oostzijde van Borgercompagnie, juist ten noorden van de Veendammerweg, nog steeds een peil heeft van NAP + 0,62 m en aan de westzijde, in een smalle strook juist ten noorden van de Veendammerweg, een peil van NAP + 0,90 m. Dit peil is in de periode voor 1990 dus met 0,28 m verhoogd. Ten noorden daarvan is het peil NAP + 0,60 m, dus ongeveer op historisch niveau. Het gebied langs de Langeleegte heeft voor 1990 een peil van NAP + 0,30 is daarmee tussen 1970 en 1990 met 0,35 m verlaagd.

1990

Bij de herinrichting omstreeks 1990 zijn de af- en ontwatering aangepast naar de wensen van het landbouwkundig Grootste verschil met de vroegere situatie is dat de zomer- en winterpeilen verlaagd zijn maar de zomerpeilen door wateraanvoer wel beheersbaar zijn geworden. Van de herinrichting Veenkoloniën zijn kaarten beschikbaar waar op het niveau van duiker en watergang is aangegeven hoe het waterhuishoudkundige systeem eruit ziet.

2001

In de situatie 2001 is het peil aan de oostzijde van Borgercompagnie, juist ten noorden van de Veendammerweg, nog steeds een peil heeft van NAP + 0,45 m en aan de westzijde, juist ten noorden van de Veendammerweg, een peil van NAP + 0,60 m. Het peil aan de westzijde is hiermee weer terug op historisch niveau, aan de oostzijde is een verlaging van 0,15 m doorgevoerd. Langs de Langeleegte is een peil gehandhaafd van NAP + 0,30 m, met uitzondering van een stukje ten noorden van de weg, juist westelijk van de rotonde, waar NAP + 0,45 m is ingesteld. Dit gedeelte is ten opzichte van 1990 dus weer 0,15 m natter geworden.

In het onderzoek is ook de maaiveld daling door veenoxidatie bepaald, om een schatting te maken van de effectieve drooglegging, dat is de afstand tussen maaiveld en oppervlaktewaterpeil. Daarmee is de verandering in drooglegging bepaald sinds 1990 (het rapport vermeldt abusievelijk 1973), exclusief de invloed van bodemdaling door zoutwinning.

In de studie is tevens een historische tijdreeksanalyse gemaakt van de grondwaterpeilbuizen. Op basis hiervan zijn de gemiddelde hoogste en laagste grondwaterstanden bepaald. Voor de potentiële zetting- of oxidatiegevoeligheid is het relevant om te weten of de veenlaag zich boven of beneden de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) bevindt. Wanneer deze boven de GLG zoals opgenomen in de bodemkaart van voor 1993 gelegen is dan is deze van nature4 ontwaterd, losstaand van de hydrologische ingrepen. De GLG in de bodemkaart is gebaseerd op waarnemingen daterend rond 1972 (de verschijningsdatum van de bodemkaart). Dit zijn gegevens daterend van voor de herinrichtingen waarmee de plannen in de periode 1970-1974 zijn gemaakt. Ook is eventuele beïnvloeding door bodemdaling of invloed van peilaanpassing hierop niet in de GLG aanwezig.

Bij de studie is op basis van een groot aantal boringen specifiek nagegaan waar veen wordt aangetroffen boven de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand. Deze veenlagen zijn gevoelig voor zetting door oxidatie. Daarnaast is in kaart gebracht waar veenlagen juist onder de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand aanwezig is. Op deze locatie is de bodem potentieel zettingsgevoelig in het geval van verlaging van de grondwaterstand.

Tenslotte zijn in deze studie de grondwateronttrekkingen in het verleden in de omgeving van Veendam geïnventariseerd. Door de provincie zijn daartoe de geregistreerde hoeveelheden grondwateronttrekking aangeleverd. De onttrekkingen liggen buiten het directe gebied van de zoutwinning. De invloedgebieden van de onttrekkingen in het landelijk gebied liggen buiten het onderzoeksgebied. Deze onttrekkingen zijn alle in of voor 2009 beëindigd.

9.7 Hydrologisch onderzoek Zuidwending

Door Arcadis [9.10] is in 2005 een verkennend onderzoek naar de waterhuishouding uitgevoerd, dat als onderbouwing voor het bestemmingsplan dient. Hierbij is rekening gehouden met een bodemdalingsscenario. Dit is de bodemdaling ten gevolge van de zoutwinning door Akzo Nobel, de gasopslag in cavernes voor fase 1 en 2 van de ontwikkeling van de buffer en de min of meer autonome bodemdaling door natuurlijke zetting en NAM aardgaswinning. Op basis hiervan is voor verschillende peilvakken de ontwikkeling van de drooglegging bepaald, dat is het verschil tussen maaiveld en oppervlaktepeil. Voor diverse peilvakken zijn adviezen gegeven voor aanpassing van het oppervlaktewaterpeil afhankelijk van de optredende bodemdaling.

9.9 Lange termijn en grootschalig hydrologisch onderzoek door Deltares

Door Deltares [9.17] is in opdracht van de TCBB een hydrologisch onderzoek uitgevoerd, dat tot doel heeft voor grote gebieden in Nederland en over een langere termijn in kaart te brengen in welke mate de klimaatvariaties in de periode 1950-2014 invloed hebben gehad op de freatische grondwaterstand en daarmee een relatie kunnen hebben met gebouwschade. Voor dit onderzoek zijn door Deltares freatische grondwaterstanden geanalyseerd die zijn berekend in het kader van een langjarige modelstudie met het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI-LHM). De analyse is voor heel Nederland uitgevoerd, met specifieke aandacht voor Oost-Groningen en oostelijk Zuid-Limburg, twee gebieden die relatief veel aandacht hebben van de Technische Commissie Bodembeweging (Tcbb). De modellering laat processen als bodemdaling, peilaanpassingen en stijgend mijnwater bewust buiten beschouwing, juist om klimatologische effecten op de grondwaterstand, eventueel doorwerkend naar gebouwschade, te kunnen isoleren. Op basis van de langjarige modelreeksen zijn landsdekkende kaarten gegenereerd van langjarige trends en jaren met de laagste en hoogste eenjarige en meerjarige grondwaterstanden. Deze grondwaterstatistieken worden door Deltares beschouwd als acceptabele benaderingen van de complexe relatie tussen

grondwaterstanden en verschillende typen gebouwschade. Op basis van de analyse wordt in [9.17] geconcludeerd, dat verlaagde grondwaterstanden als gevolg van klimaatvariaties uitgesloten kunnen worden als op zichzelf staande oorzaak van gebouwschade in de laatste decennia. Dit geldt voor zowel hydrologisch trage als snelle gebieden. Wel constateert Deltares in [9.17] dat als gevolg van veranderingen in andere randvoorwaarden aan het grondwatersysteem (grondwateronttrekkingen, landgebruik, peilbeheer, grondverzet) een recent droog jaar wel 'de druppel' kan zijn geweest die heeft geleid tot gebouwschade.

Verder wordt in [9.17] geconstateerd dat er wel sprake is van stijgende grondwaterstanden onder invloed van klimaatvariaties. In zowel hydrologisch snelle als trage gebieden worden de hoogste grondwaterstanden in de laatste 20 tot 30 jaar berekend. Zo zijn in grote delen van Nederland, maar niet overal, de natste jaren geconcentreerd in de periode 1993 - 2002. Hieruit volgt, dat verhoogde grondwaterstanden als gevolg van klimaatvariaties wel een (mede-)oorzaak kunnen zijn van gebouwschade als gevolg van grondwateroverlast in de laatste decennia. Dit geldt voor zowel hydrologisch trage als snelle gebieden. De vraag blijft in deze studie van Deltares overigens onbeantwoord in hoeverre hogere grondwaterstanden een rol spelen bij zakkingen.

9.10 Object gerelateerde gegevens inzake hydrologische situatie

Op basis van bovenstaande meer algemene informatie en studies naar de hydrologische aanpassingen is voor alle onderzoeksobjecten afzonderlijk nagegaan in welk peilgebied zij gelegen zijn en welke van bovenstaande, of andere, wijzigingen in het oppervlaktewater relevant zijn geweest.

Belangrijke aandachtspunten bij de grondwaterstanden per object zijn:

- Oppervlaktewaterpeilaanpassingen leiden niet noodzakelijk tot aanpassing van de ontwateringsdiepte of van de gemiddeld laagste grondwaterstand. Dit komt doordat op grotere afstand tot waterlopen de grondwaterstand sterk bepaald kan worden door de grondwaterstanden in diepere lagen. Het is daardoor mogelijk dat bodemdaling leidt tot afname van de ontwateringsdiepte, ook als oppervlaktewaterpeilen aan de bodemdaling zijn aangepast.
- Grondwaterstanden zijn in de regel sterk afhankelijk van de neerslag- en verdampingsoverschotten in de diverse jaren. De gemiddeld laagste grondwaterstand kan daardoor ook wijzigingen vertonen.
- Grondwaterstanden en het vochtgehalte in de bodem kunnen, afhankelijk van de lokale situatie, sterk bepaald worden door de aanwezigheid van bomen.

Voor de relatie met schade aan gebouwen is uiteindelijk de (relatieve) grondwaterstand bepalend. Die is voor de meeste onderzoeksobjecten ter plaatse vastgesteld. Voorts zijn in het DINO loket gegevens van de nabij gelegen peilbuizen geraadpleegd. Gedetailleerde (modelmatige) grondwaterstudies om het historisch verloop per pand vast te stellen zijn evenwel in het kader van dit onderzoek niet uitgevoerd.

Ten aanzien van de lokale grondwaterstand resteert een grote onzekerheid over het historisch verloop ter plaatse van de afzonderlijke onderzoeksobjecten. Die onzekerheid zou verminderd kunnen worden door per locatie een specifieke modellering van het lokale geohydrologisch systeem te maken (ondergrond en geohydrologische eigenschappen en randvoorwaarden) en dit te confronteren met het historisch verloop van neerslag en verdamping en eventuele ingrepen in het geohydrologisch systeem. Dergelijke locatie specifieke studies zijn in het kader van dit onderzoek niet uitgevoerd.

10 Effecten van trillingen door bevingen

10.1 Normen en richtlijn m.b.t schade aan gebouwen door trillingen

Gebouwen kunnen schade oplopen onder invloed van trillingen via de bodem, doordat onderdelen van gebouwen worden blootgesteld aan opgelegde vervormingen in de bodem, aan opgelegde verplaatsingen, snelheden of versnellingen als gevolg van trillingen of doordat in onderdelen van gebouwen door resonantie-effecten de uiterste spanning wordt overschreden.

In Nederland is er geen specifiek normenkader om de invloed van trillingen door geïnduceerde bevingen op gebouwen te beoordelen. Wel is in 1991 de SBR Richtlijn 1 gepubliceerd, die tot doel had de schadelijke invloed van trillingen op gebouwen te beoordelen. Deze richtlijn vatte de toen beschikbare kennis samen op het gebied van de schadelijke invloed van trillingen voor bouwwerken en gebouwen. De SBR Richtlijn 1 was gebaseerd op de Duitse norm DIN 4150 deel 3, aangevuld met specifieke inzichten en ervaringen uit de Nederlandse praktijk. Die praktijk werd vooral gevormd door ervaringen met trillingen door bouwwerkzaamheden en trillingen door verkeer. Achtergronden van de richtlijn zijn verzameld in [10.2]. SBR Richtlijn 1 is in 2003 hernoemd in SBR Richtlijn A en in een aangepaste versie [10.3] verschenen.

De SBR Richtlijn formuleert ondergrenzen voor de sterkte van een trilling in relatie tot het ontstaan van schade. De richtlijn zelf spreekt over minder dan 1 % kans op schade aan een object bij aanhouden van de gegeven grenzen.

De afgelopen 20 jaar is de SBR Richtlijn in Nederland op grote schaal toegepast in de praktijk bij het beoordelen van trillingen door bouwwerkzaamheden en als gevolg van verkeer. De richtlijn is in 2017 door een SBR commissie geëvalueerd en deze nieuwe versie is inmiddels verschenen [10.31]. De indruk bestaat dat de grenswaarden die de SBR Richtlijn geeft in de gebruikspraktijk voldoende veilig en goed hanteerbaar blijken te zijn. Gevallen waarbij schade is geconstateerd, terwijl de trillingen onder de grenswaarden van de SBR Richtlijn liggen, zijn bijzonder schaars.

Sinds het ontstaan van de geïnduceerde bevingen in Noord Nederland, medio jaren 90 van de vorige eeuw zijn onderbouwende en aanvullende studies uitgevoerd met het oog op de onderbouwing van de SBR Richtlijn en zijn toepassing, onder meer door Waarts [10.6], Raaijmakers [10.5] en Van Staalduinen & Geurts [10.7]. Ook zijn diverse studies gedaan naar de schadelijke invloed van trillingen als gevolg van geïnduceerde bevingen op bouwwerken. Daarbij is ook de relatie gelegd met de criteria uit de SBR Richtlijn 1.

Hieronder is een samenvatting gegeven van de belangrijkste inzichten met betrekking tot de kans op schade als gevolg van trillingen bij toepassing van de SBR Richtlijn en specifiek als gevolg van geïnduceerde bevingen.

De belangrijkste elementen uit SBR Richtlijn 1, oorspronkelijke uitgave 1993 waren:

- De beoordelingsgrootte voor trillingen is de snelheid van de trilling (trillingsnelheid)

- Er zijn twee bouwwerkcategorieën voor bouwwerken in metselwerk in termen van, respectievelijk een categorie (C2) in goede staat verkerend⁶ en categorie (C3) in slechte staat verkerend of monumentaal⁷.
- De gegeven grenswaarden liggen voor normale bouwwerken in metselwerk op een niveau van 5 mm/s en 3 mm/s voor gevoelige bouwwerken
- Deze grenswaarden zijn toepasbaar in het frequentiegebied van de aardbevingstrillingen, omstreeks of lager dan 10 Hz.
- De grenswaarden zijn toepasbaar voor kortdurende trillingen. Voor herhaald kortdurende trillingen en continue trillingen worden extra onzekerheidsmarges toegepast, leidend tot lagere grenswaarden.

De richtlijn zelf laat zich niet uit over kans op schade bij aanhouden van de grenswaarden. Volgens de achtergronddocumentatie [10.2] wordt deze ingeschat op minder dan 1 % per object.

De afgelopen periode is in de aanloop naar de 3^e versie van de SBR Richtlijn A (2017) onderzoek verricht om de praktijkervaringen in termen van het al dan niet ontstaan van schade in relatie tot de sterkte van de trillingen. Uit de onderbouwende onderzoeken voor deze herziening [10.26-10.28] blijkt:

- Er zijn nauwelijks gevallen bekend waarin bij overschrijding van de thans gehanteerde grenswaarden aanwijsbaar schade door trillingen is ontstaan. De ervaring uit de praktijk wijst dus in de richting van een bevestiging van deze geringe schadekans.
- Bij overschrijden van de criteria blijkt de kans op schade toe te nemen. De beschikbare cases duiden op een kans op schade van 10% bij het overschrijden van de criteria met een factor 2 en van 30 % bij het overschrijden van de criteria met een factor 3.
- Een onderzoek in de recente buitenlandse literatuur op dit terrein leidt niet tot aanvullende inzichten.

Hoewel de SBR richtlijn A niet specifiek is geschreven voor de beoordeling van de effecten van trillingen als gevolg van geïnduceerde bevingen, werd de richtlijn daarvoor, bij het ontbreken van een andere beoordelingsrichtlijn, daar toch voor gebruikt. In de laatste druk van SBR Richtlijn A van november 2017 [10.31] is daar nadrukkelijk rekening mee gehouden, getuige de volgende toevoeging: 'Tijdens het proces van herziening heeft vanwege de gaswinning en de daarmee gepaard gaande aardbevingen het onderwerp schade door trillingen nadrukkelijk aan belang gewonnen. Hoewel de richtlijn niet expliciet voor geïnduceerde aardbevingen is geschreven, is deze toepassing niet uitgesloten.'

10.2 Invloed van trillingen op bodem en funderingsgrondslag

10.2.1 Zettingen door verdichting van verdichtingsgevoelige lagen als gevolg van trillingen

Onder invloed van trillingen en het bijbehorende wisselend belaste van de bodem, kunnen bepaalde grondsoorten onder bepaalde omstandigheden zettingen vertonen. De trillingen zorgen voor een herschikking van het korrelpakket in de grond en daarmee tot een afname van het volume. In recente rapporten van Deltares [10.18, 10.19] is verslag gedaan naar een onderzoek voor het opstellen van een criterium voor verdichting als gevolg van trillingen.

De SBR-richtlijn A – Schade aan gebouwen (2017) bevat ook grenswaarde voor schade aan gebouwen ten gevolge van verdichting van de funderingsgrondslag. De achtergrond van dit criterium is te

⁶ In SBR Richtlijn A (2017) vervangen door de categorie normale bouwwerken

⁷ In SBR Richtlijn A (2017) vervangen door de categorie gevoelige bouwwerken

vinden in Das [10.20]. Hierin wordt gemeld dat onder een versnelling gelijk 1 g weinig verdichting plaatsvindt, terwijl er onder de 0,1 g nauwelijks data beschikbaar zijn. De grenswaarde 0,1 g leek daarmee destijds ten behoeve van de SBR Richtlijn A een veilige ondergrens. De gebruikte formules zijn dus gebaseerd op een toelaatbare versnelling in het pand. Om de beoordeling consistent te maken met de richtlijn is deze toelaatbare versnelling herleid tot een toelaatbare trillingssnelheid als grenswaarde op basis van een omrekening voor een zuiver harmonisch signaal. Dit is niet volledig eenduidig voor niet harmonische signalen zoals bij kortdurende trillingen, bijvoorbeeld door trillingen door verkeer, heiwerkzaamheden of aardbevingen [10.20] en het bijbehorende wisselend belasten van de bodemen het bijbehorende wisselend belasten van de bodem

De evaluatie en herziening van SBR Richtlijn A in 2017 was aanleiding tot de studie van Deltares. In [10.18] is de nu beschikbare literatuur, waaronder twee relatief recente proefschriften, onderzocht en besproken. Verdichting is van een groot aantal invloedfactoren afhankelijk. Te noemen zijn de frequentie van de spanningswisseling, de amplitude, het aantal wisselingen dan wel de tijdsduur waarover de wisselingen werkzaam zijn. Daarnaast is de spanningssituatie in de grond van belang en de mate waarin de grond al verdicht is. Op basis van een aantal overwegingen wordt in [10.18] een nieuw criterium voorgesteld, dat in tegenstelling tot SBR Richtlijn A in termen van de maximale trillingssnelheid is geformuleerd. De waarde is indicatief aangegeven en ligt in de orde van 10 à 15 mm/s.

In de tweede rapportage [10.19] is vervolgens modelmatig onderzoek verricht om tot een advies over het aan te houden criterium te komen. Hiertoe is een rekenmodel voor de verdichting gehanteerd waarin drie invloedfactoren zijn beschouwd, te weten de initiële dichtheid van de grond, de amplitude en aantal cycli van de trilling. Met dit rekenmodel is een probabilistische studie uitgevoerd waarbij een trillingscriterium is afgeleid op basis van de uiteindelijke effecten van de zettingen op een gebouw in termen van scheefstand en hoekvervorming. Daarbij is als grens een maximale scheefstand 1:300 en een maximale hoekvervorming van 1:900 aangehouden. Hierbij is aangesloten op het criterium 'very slight damage' van Burland et al. [10.21].

Het resultaat van de probabilistische analyses blijkt goed aan te sluiten bij de in [10.18] gememoreerde bestaande inzichten dat bij een beperking van de afschuifrek tot 10^{-4} geen verdichtingseffecten te verwachten zijn. De conclusie in [10.19] is dat ook bij grote laagdikten met verdichtingsgevoelige grondslag, de kans op verdichting zeer klein is (zeer veel kleiner dan 1 %) bij topwaarden van de trillingssnelheid kleiner dan (orde) 4 mm/s.

10.2.2 Zettingen door verweking als gevolg van trillingen

De horizontale versnellingen in de grond tijdens een aardbeving leiden tot extra schuifspanning. Vooral los gepakt zand zal hierdoor willen verdichten. Voor verdichting moet het water tussen de korrels eerst (gedeeltelijk) uitstromen, maar hier is tijdens de aardbeving onvoldoende tijd voor, zodat wateroverspanningen optreden. Deze leiden tot tijdelijke vermindering van korrelspanningen en daarmee mogelijk tot tijdelijke vermindering van sterkte en stijfheid van het zand. Als de trilling sterk is kan het zand zijn sterkte en stijfheid zelfs compleet verliezen: dit wordt verweking of liquefaction genoemd. De inzichten in het ontstaan van het verschijnsel verweking zijn beschreven in Korff et al [10.22]. Het onderstaande is grotendeels aan deze referentie ontleend.

Er zijn twee typen verweking: cyclische verweking en statische verweking. Cyclische verweking betreft de cumulatieve opbouw van waterspanningen bij meerdere belastingwisselingen. Statische verweking betreft de opbouw van wateroverspanningen door het ineenstorten van het losgepakte korrelskelet. Hiervoor is in principe maar één voldoende

grote belastingverandering, initiator, nodig. Naast de grootte van de extra schuifspanning is dus ook het aantal schuifspanningswisselingen van invloed. Andere voorwaarden zijn dat het zand voldoende los gepakt en waterverzadigd is.

Er zijn twee typen verweking: cyclische verweking en statische verweking. Cyclische verweking betreft de cumulatieve opbouw van waterspanningen bij meerdere belastingwisselingen. Statische verweking betreft de opbouw van wateroverspanningen door het ineensinken van het losgepakte korrel skelet. Hiervoor is in principe maar één voldoende grote belastingverandering nodig. Naast de grootte van de extra schuifspanning is dus ook het aantal schuifspanningswisselingen van invloed. Andere voorwaarden zijn dat het zand los gepakt en waterverzadigd is.

De belangrijkste basis grondeigenschappen in relatie tot verwekingsgevoeligheid zijn de grondsoort en de pakkingsdichtheid. Cohesieve grondsoorten als klei en veen zijn niet verwekingsgevoelig. De volgende grondsoorten (met korrelgrootte) zijn wel gevoelig voor verweking:

- Leem/silt, ($2 < 63 \mu\text{meter}$).
- Fijn zand, ($63 < 150 \mu\text{meter}$).
- Matig fijn tot matig grof zand, ($150 < 300 \mu\text{meter}$).
- Grof zand en grind, ($> 300 \mu\text{meter}$).

Bij de tot op heden opgetreden aardbevingen (met een piek grondversnelling in de orde van 0,1 g) in Groningen zijn geen locaties vastgesteld waar verweking is opgetreden. Bij een aardbeving met een bodemversnelling vanaf ongeveer 0,2 g neemt de kans op verweking volgens de huidige inzichten sterk toe. Dit aspect is beperkt tot gebieden waar (los gepakt tot matig gepakt) zand voorkomt. Dichter gepakt zand kan verweken als de versnelling toeneemt tot boven de 0,35 g.

Voor klei en veenlagen is bij een trillingsbelasting geen sprake van een verdichting, maar kan er wel een afname plaatsvinden van de sterkte en stijfheid (cyclic softening). Volgens [10.30] wordt de sterkte van klei en silt onder invloed van cyclische belastingen beïnvloed door het cyclische schuifspanningsniveau, de frequentie, het aantal belastingswisselingen, de uitgangsspanningstoestand, de stijfheid en mate van overconsolidatie. De afname van de stijfheid is vooral afhankelijk van de Plasticiteitsindex, ofwel het verschil in watergehalte tussen de vloeibare en vaste vorm van de grond. De rode draad is daarbij wel dat het aantal belastingswisselingen en de schuifrek in belangrijke mate de softening bepalen. Indien het aantal wisselingen kleiner is dan 10 en de afschuifrekken kleiner zijn dan 10^{-4} [10.29] is het effect van cyclic softening zeer gering. In 1998 is een studie uitgevoerd naar het effect van ondiepe aardbevingen op verweking van zand [10.23]. Voor de studie is gekeken naar een combinatie van (ongunstige) omstandigheden zoals die zich in Noord-Nederland zou kunnen voordoen met een aardbevingsbelasting afgeleid van de (toen) sterkste in Noord-Nederland gemeten aardbevingsignalen (Roswinkel, 16 februari 1997, topwaarde van de versnelling 0,3 g) en een opbouw van de ondergrond met onder andere een 11 meter dik pakket los gepakt zand gelegen op een slappe laag.

De berekeningen met een piekversnelling van 0,125 g leverden in die studie nauwelijks een verhoging van de waterspanning op. De berekeningen met 0,2 g leverden wel significante wateroverspanningen op, mede afhankelijk van de aangenomen stijfheid van de slappe laag onder het zand leidend tot volledige verweking van de bovenste meters van het onderwatertalud. In [10.23] staat verder een interessante verwijzing naar de literatuur over de opbouw van wateroverspanning bij explosies, waarvan genoemd wordt dat waterspanningen zich bij piekversnellingswaarden vanaf 0,1 g kunnen gaan opbouwen. Deze waarde komt overeen met wat uit studies naar opgetreden verweking bij aardbevingen naar voren komt. De nadere analyses van

Deltares [10.23] in het kader van de quick scan ondersteunen bovenstaande inzichten. Voor los gepakt zand en versnellingen kleiner dan 0,1 g wordt geen verweking verwacht. Voor versnellingen groter dan 0,15 g kan dit verschijnsel wel optreden.

Er kan dus geconcludeerd worden dat zetting door verweking als gevolg van bevingen niet te verwachten is bij topwaarden van de bodemversnelling tot een niveau van 1 m/s^2 (0,1 g). Er zijn geen aanwijzingen dat herhaald optreden van bodemtrillingen onder dit niveau met een beperkt aantal cycli tot verweking aanleiding zou kunnen geven. Bij geïnduceerde bevingen met dominante frequenties tussen 2 en 5 Hz betreft dit een trillingsnelheid in de orde van 30 mm/s.

10.3 Invloed van herhaald voorkomende kortdurende trillingen

Over de invloed van kortdurende trillingen die herhaald, dat wil zeggen een groot aantal malen achter elkaar optreden, op de ontwikkeling van schade aan gebouwen met metselwerk is weinig bekend. De beschikbare literatuur is zeer beperkt en voor zover beschikbaar concentreert deze zich op de invloed van herhaalde dynamische belastingen op gemetselde spoorviaducten. Dit betreft uitsluitend situaties waarbij het metselwerk op drukspanningen wordt belast. Schade aan gebouwen in metselwerk onder invloed van trillingen door bevingen manifesteert zich doorgaans door scheuren als gevolg van trekspanningen.

De beschikbare literatuur geeft geen indicaties dat metselwerk onder invloed van een groot aantal trillingen bij laag spanningsniveau zal scheuren. Dit verschijnsel – ook wel vermoeiing genoemd – doet zich wel voor in staalconstructies, waarbij de breuksterkte onder invloed van een groot aantal belastingwisselingen daadwerkelijk geringer is dan onder een beperkt aantal belastingwisselingen. Het gaat dan in de regel over tienduizenden tot honderdduizenden belastingwisselingen (zogenaamde high cycle fatigue). Metselwerk kenmerkt zich door een bros breukgedrag, dat in principe goed vergelijkbaar is met het breukgedrag van beton. Onderzoek naar de vermindering van de treksterkte van beton onder herhaalde trekspanningen is ook relatief schaars, zie Cornelissen, [10.25].

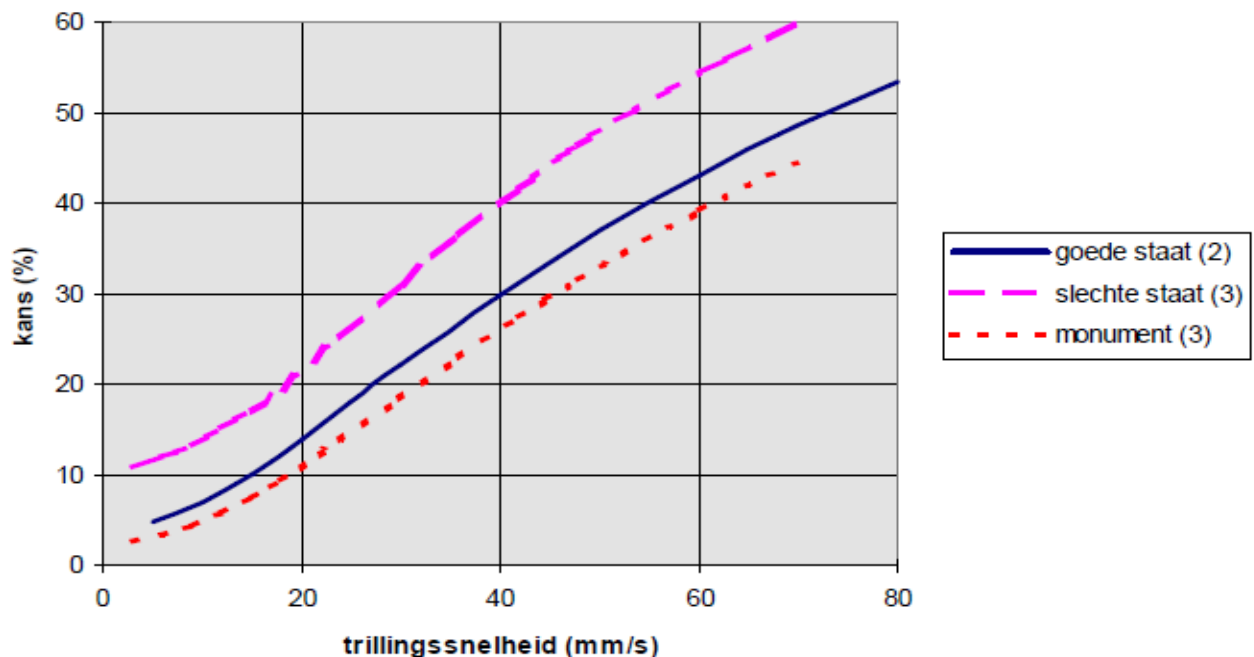
Duidelijk is dat *vermoeiing* in brosse steenachtige materialen samenhangt met microscheurvorming in het materiaal en/of op grensvlakken van bijvoorbeeld cement en toeslagmateriaal (zand of grind). Er zijn nog geen indicaties dat dit verschijnsel een rol speelt. Bovendien kan per gebouw worden beoordeeld aan hoeveel trillingscycli het als gevolg van geïnduceerde bevingen is blootgesteld. In de regel betreft dit minder dan 100 cycli.

Denkbaar en waarneembaar is wel dat bij wisselende spanningen reeds gevormde scheurvlakken vervuild kunnen raken door (micro)gruis. Dit belemmert een volledige scheurdichting en kan daardoor aanleiding geven tot verdere uitbreiding van reeds aanwezige scheuren. Dit kan een *degradatieverschijnsel* worden genoemd. Op dit moment ontbreken echter concrete wetenschappelijk gefundeerde inzichten in de invloed van herhaald optredende wisselende trekspanningen op metselwerk en relatie tot de toelaatbare spanning in het metselwerk. Onderzoek naar de invloed van dynamische belastingen op metselwerk en op de invloed hiervan op het ontstaan van scheurvorming bij TU Delft is op dit moment nog gaande.

In SBR Richtlijn A (2017) is een reductiefactor toegepast voor de toelaatbaarheid van herhaald voorkomende trillingen waarbij rekening is gehouden effecten van vermoeiing, cumulatie van schade of degradatie-effecten. De hiervoor gehanteerde partiele veiligheidsfactor bedraagt voor de constructie 1,5 en voor de fundering (kans op zettingen) 1,6. Voor de motivatie van deze factoren wordt verwezen naar de SBR Richtlijn A (2017).

10.4 Modelstudies voor de beoordeling van schade door trillingen

In 1997 en 1998 zijn modelstudies uitgevoerd door Raaijmakers [10.5], Waarts [10.6] en Van Staalduinen & Geurts [10.7] met het doel een statistische onderbouwing te leveren voor de kans op schade bij verschillende trillingssterkten. Referentie [10.5] en [10.6] bieden hiervoor het basismateriaal. In Referentie [10.7] is dit specifiek toegepast op de trillingen van geïnduceerde bevingen, gebaseerd op bevingen in Roswinkel van 1997 of eerder. Deze studies bieden een kwantificering van de kans op schade, waarbij de kans op schade toeneemt met de trillingssterkte. Echter ook bij zeer lage trillingssterkten blijkt uit [10.5, 10.6] dat een kans op schade blijft; de kans op schade gaat niet volledig naar nul, ook niet bij extreem lage waarden van de trillingssterkte, zie figuur 10.1. Het gaat hier over modelstudies gebaseerd op sterk vereenvoudigde rekenmodellen van bouwwerken en met zeer algemene aannames ten aanzien van de materiaalparameters.



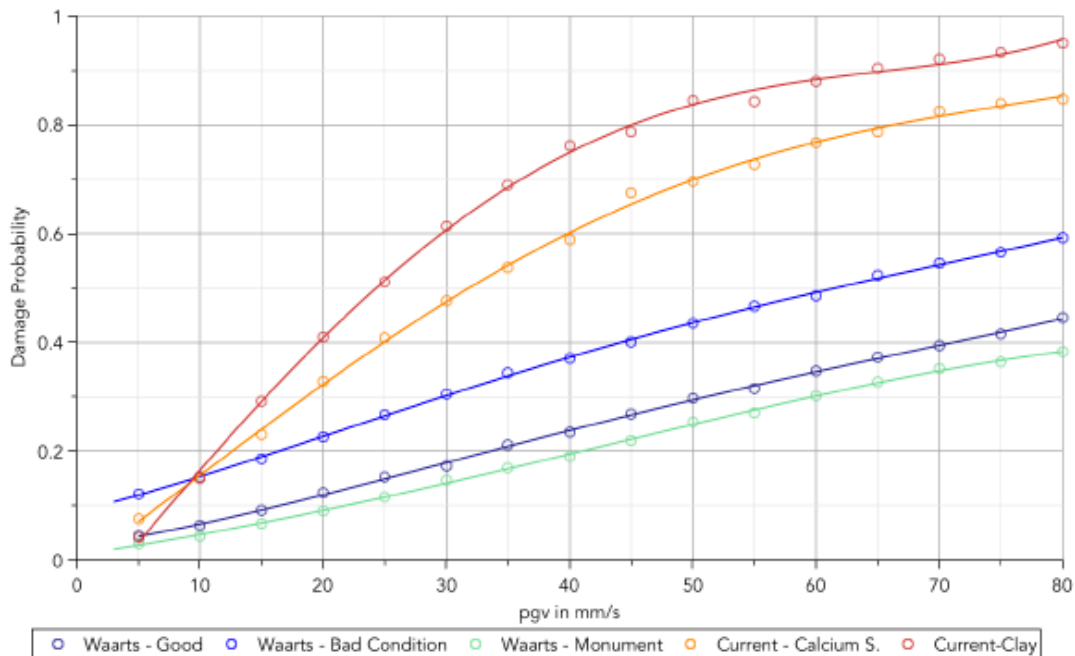
Figuur 10.1 – kans op schade afhankelijk van de topwaarde van de trillingsnelheid. Resultaten modelstudie van Waarts [10.6]

Het algemene beeld uit deze eerste model studies [10.6, 10.7] is:

- Onder de criteria van SBR Richtlijn A is de kans op schade voor in goede staat verkerende gebouwen in metselwerk in de orde 5 %, bijna ongeacht de sterkte van de trilling.
- Bij overschrijden van de criteria met een factor 2 resp. 3 neemt de schadekans *langzaam* toe naar resp. 8 % en 10 %.

De afgelopen jaren is door diverse partijen een vervolg gegeven aan deze modelstudies (zie onder meer [10.8, 10.9, 10.10, 10.11, 10.12, 10.13]), met als doel kansverdelingen op te stellen voor de kans op schade of zogenaamde fragility curves op te stellen voor gebouwen in metselwerk. Kenmerk van fragility curves is dat zij de kans op schade van een bepaalde klasse of mate van schade berekenen, specifiek voor een bepaalde schadeklasse of damage state (DS). De modelstudies zijn waar mogelijk ook gekalibreerd aan waarnemingen in de provincie Groningen [10.8, 10.9, 10.10]. Aan deze kalibratie is hierna een aparte paragraaf gewijd.

Recent onderzoek [10.13] geeft aan dat een betere overeenstemming tussen de praktijkervaring met SBR Richtlijn A en de oorspronkelijke modellering van Raaijmakers en Waarts [10.5, 10.6] kan worden bereikt, indien beter gedefinieerde waarden van de materiaalparameters van het metselwerk worden gehanteerd. Dit laat het nadeel van de relatief simplistische modellen onverlet.



Figuur 10.2 – Heranalyse van modelstudie [10.6], aangevuld met resultaten voor actuele gegevens van sterkte van baksteen en kalkzandsteen [10.13] voor overschrijden buigtreksterkte

Opmerkenswaard is dat door verschillende onderzoekers grote verschillen worden gerapporteerd m.b.t. analyses specifiek voor de Nederlandse situatie [10.12, 10.13] en analyses die betrekking hebben op ervaringen met trillingschade als gevolg van aardbevingen wereldwijd [10.11].

Het beeld uit de meer recente modelstudies [10.12, 10.13] voor de Nederlandse situatie is:

- De kansen op schade nemen toe bij toenemende topwaarden. [10.13] presenteert voor de kans op schade met een lognormale kansdichtheidfunctie (met parameters voor metselwerk in baksteen: $\mu = 3,17$ en $\sigma = 0,86$ (in het interval van 0 mm/s tot 20 mm/s)
- Indien aan de criteria van SBR Richtlijn A wordt voldaan (zonder aanvullende veiligheidsmarges) ligt volgens deze modelstudies de kans op schade in de orde van enkele procenten.
- Bij overschrijden van de criteria neemt op basis van [10.12] de kans op schade *relatief snel* toe, dit in tegenstelling tot het beeld van de studie in [10.6]. Bij tweemaal het criterium (10 mm/s) bedraagt deze kans in de orde van 15 % en bij drie maal het criterium (15 mm/s) in de orde van 25 %.

De kansen op schade die volgen uit de SBR Richtlijn A, en de modelstudies en kalibratiestudies [10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 10.10], wijken sterk af van de kansen die volgen uit de DS1 curves die zijn gebaseerd op internationale ervaringen, zoals gepresenteerd in [10.11] en [10.12]. Bij vergelijkbare topwaarden van de bodemtrillingen, met name bij lage trillingsniveaus, is de bijbehorende kans op optreden van schade volgens de Nederlandse studies een orde hoger [10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 10.10] ten opzichte van de internationale studies, zie onder meer [10.11]. Dit blijft een punt van aandacht. Mogelijke oorzaken van deze grote verschillen liggen in de toegepaste bouwmethoden (met name de zeer slanke

Nederlandse metselwerkconstructies), de toegepaste funderingswijzen in combinatie met de weinig draagkrachtige ondergrond, en mogelijk in andere bevingskarakteristieken.

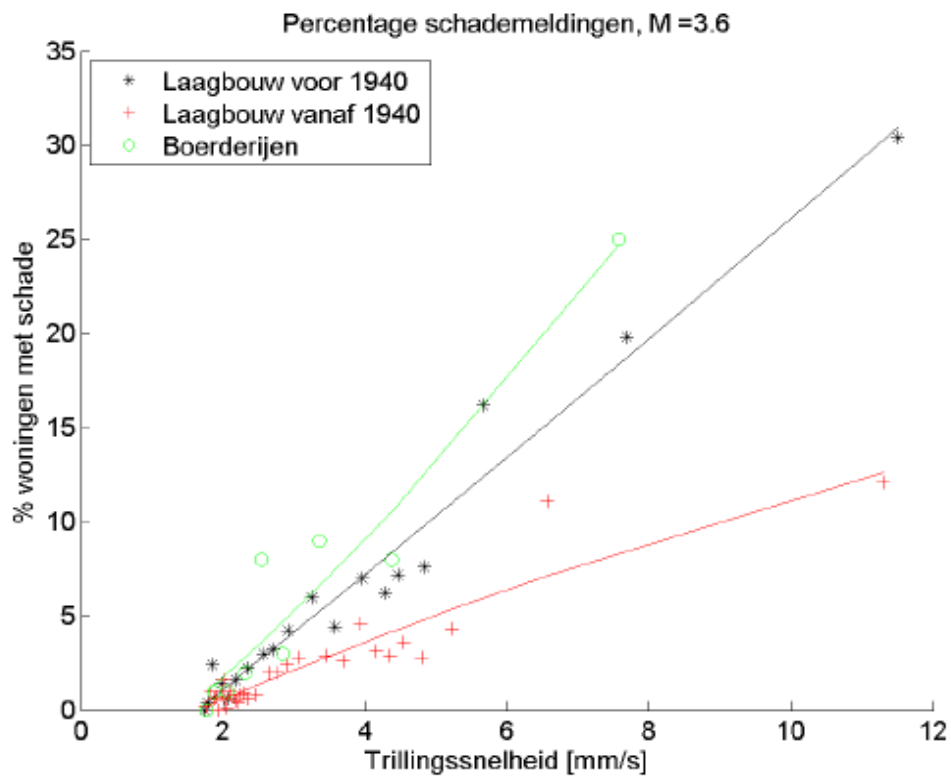
10.5 Kalibratiestudies en veldonderzoek in Groningen

In Groningen zijn verschillende kalibratiestudies uitgevoerd. In de eerste plaats een studie [10.8] in 2009 op basis van vijf bevingen, waarvan 3 in Roswinkel. Hierbij is de schade na de bevingen gerelateerd aan de opgetreden trillingssterkte ter plaatse en aan de schade in de populatie gebouwen. Een vergelijkbare kalibratiestudie is in 2013 uitgevoerd op basis van de beving in Huizinge [10.10]. Dit is gebaseerd op de toegekende schade, die volgen uit inspecties ter plaatse die zijn uitgevoerd in de eerste vier maanden na de beving (dus tot december 2012). De informatie over opgetreden trillingen bij deze bevingen is gebaseerd op de toen beschikbare sensorregistraties van KNMI. De afgelopen jaren is naast het sensornetwerk van KNMI ook een meetnet met gebouwsensoren aangelegd en aanzienlijk uitgebreid. TNO voert op dit moment een doorlopend systematisch onderzoek uit naar de ontwikkeling van schade in de gebouwen, die van sensoren zijn voorzien; [10.14] bevat hiervan de rapportage over de jaren 2014 en 2015. Het beeld uit de eerste kalibratiestudie [10.8] is weergegeven in tabel 10.1.

Categorie	Trillingsnelheid bij kans op schade 1% (vtop in mm/s)	Trillingsnelheid bij kans op schade 5 % (vtop in mm/s)	Trillingsnelheid bij kans op schade 10 % (vtop in mm/s)
Boerderij	2,4	3,4	6,0
Laagbouwwoning voor 1940	6,0	6,9	15,7
Laagbouwwoning na 1940	9,6	10,2	26,0

Tabel 10.1: Overzicht van topwaarden en kans op schade bij 3 bouwwerk categorieën op basis van de eerste kalibratiestudie uit 2009 [10.8]

In het onderzoek naar de schade als gevolg van de beving Huizinge [10.10] is in ringen rondom het epicentrum een analyse gedaan naar het aantal gemelde schades als aandeel op de totale populatie gebouwen. Bij een steekproef van 320 van de totaal 1866 gemelde schades binnen 15 km tot het epicentrum zijn de schades opgenomen en beoordeeld. Hiervan zijn slechts 4 schades afgewezen. In navolging van de eerdere kalibratiestudie [10.8] zijn de resultaten onderverdeeld naar drie categorieën bouwwerken te weten boerderijen, laagbouw voor 1940 en laagbouw na 1940. Figuur 10.3 geeft het percentage gebouwen met schade ten opzichte van het totaal aantal gebouwen afhankelijk van de topwaarde van de trillingsnelheid.



Figuur 10.3: topwaarden trillingsnelheid (volgens de verwachtingswaarde van de destijds gehanteerde attenuation curve) en percentages gebouwen met schade, beving Huizinge (2012) [10.10]

Bij figuur 10.3 moet bedacht worden dat de werkelijk gemeten topwaarden op korte afstand tot het epicentrum bij Huizinge ongeveer 60 % boven de toen gehanteerde gemiddelde *attenuation curve* liggen.

Verder moet bedacht worden dat het in de kalibratiestudie in Huizinge [10.10] erkende schades van schademeldingen betreft en dat de aard en mate van schade niet is geclassificeerd of gecategoriseerd zoals in de onderhavige studie is gedaan. Over de feitelijke schades is dus weinig bekend.

De kalibratiestudie in Huizinge [10.10] levert het volgende beeld:

Indicatief kunnen uit deze drie benaderingen van de waarnemingen in Huizinge de schadekansen voor willekeurige topwaarden van de trillingssnelheid worden berekend. Tabel 10.2 geeft een overzicht.

v_top (mm/s)	Gebouwtype		
	boerderij	laagbouw voor 1940	laagbouw na 1940
< 3	2,5 %	2 %	1 %
5	7,5 %	6 %	2 %
10	20 %	16 %	6 %
15	32,5 %	26 %	10 %
20	45 %	36 %	14 %
25	57,5 %	46 %	17 %

Tabel 10.2: indicatieve kans op schade aan gebouwen in metselwerk op basis van beving Huizinge [10.10]. De gepresenteerde kans op schade heeft betrekking op het aantal objecten in de populatie waar schade wordt aangetroffen.

- Voor zover nu kan worden overzien is [10.10] nog één van meest uitgebreid gedocumenteerde kwantitatieve studies over de kans op schade bij een populatie gebouwen in Groningen bij een sterkte aardbeving, die op dit moment beschikbaar is.
- Wat verder opvalt, is dat de schadekansen uit de kalibratie in Huizinge [10.10] voor de categorie laagbouw (zowel voor 1940 als na 1940) duidelijk hoger liggen dan in de eerste kalibratiestudie [10.8] werd afgeleid. Het verschil is ongeveer een tweemaal hogere kans bij eenzelfde topwaarde van de trilling.
- Verder blijkt de kans op schade voor de klasse laagbouw voor 1940 uit [10.10] redelijk goed overeen te komen met de kans op schade, die volgt uit de modelanalyse van Korswagen [10.13] waarbij is gefocust op het frequentiegebied tot 20 Hz, zie tabel 10.3.

v_top (mm/s)	Kans op schade voor laagbouw voor 1940	
	Studie Huizinge [10.10]	Modelstudie [10.13]
3	2 %	2 %
5	6 %	3 %
10	16 %	15 %
15	26 %	30 %
20	36 %	42 %
25	46 %	52 %

Tabel 10.3: Vergelijking schadekansen waargenomen in Huizinge [10.10] vergeleken met modelstudie [10.13]

Zoals gemeld voert TNO een doorlopend onderzoek uit naar de ontwikkeling van schade aan de gebouwen die van een zogenaamde gebouwsensor zijn voorzien [10.14, 10.24]. Een kwantificering in termen van een kans op schade bij een bepaald trillingsniveau blijkt op basis van de gegevens uit deze doorlopende studie [10.14] (nog) niet goed mogelijk.

10.6 Toetsgrootheid voor trillingen

Bij het hanteren van criteria voor de maximaal toelaatbare trillingssterkte, zoals bijvoorbeeld de SBR Richtlijn A, wordt er naar gestreefd om de kans op schade beperkt te houden tot een acceptabel klein niveau.

De kans dat in een gebouw schade ontstaat door trillingen is afhankelijk van de sterkte van de trilling. Dit wordt het best benaderd met een lognormale kansverdeling. Het kenmerk van deze verdeling is dat ook bij zeer kleine trillingen is er al een (kleine) kans op schade is en dat bij zeer grote trillingen is de kans op schade nog steeds geen 100 % is. De feitelijke optredende sterkte van de trillingen door bevingen is in hoofdstuk 7 op een vergelijkbare manier in de vorm van een lognormale kansverdeling beschreven.

De kans op schade door trillingen bij een beving volgt rekenkundig uit de combinatie van beide kansverdelingen. Dit is echter zeer bewerkelijk en daardoor voor een praktische beoordeling minder geschikt. Een oplossing hiervoor is het werken met een toetsgrootte of karakteristieke waarde.

In plaats van het hanteren van de complete kansverdeling voor de kans op schade aan gebouwen wordt één waarde vastgesteld. Deze aanpak is ook in SBR Richtlijn A gehanteerd. De kansverdeling reduceren we hierdoor tot één criterium of toetswaarde voor de trillingsnelheid, een niveau in mm/s.

Voor de beving bepalen we op een vergelijkbare wijze een zogenaamde karakteristieke waarde, dat is de sterkte van de beving met zodanige overschrijdingskans, dat de kans op schade als gevolg van de beving aansluit bij het acceptabel geachte kleine schadekans (bijv. < 1 % of 1 promille). De beperkt beschikbare rekenmodellen [10.13] in combinatie met de beschikbare data van bevingen uit het sensornetwerk [10.16, 10.17], geven als indicatie dat een karakteristieke waarde van de trillingsnelheid met een overschrijdingskans van 25 % per beving een goede aansluiting biedt als toetswaarde.

10.7 Beoordeling van aandeel van trillingen in scenario's

Op basis van bovenstaande inzichten zal een oordeel gevormd moeten worden over de mogelijke invloed van trillingen in scenario's voor het ontstaan van schade in gebouwen.

De beoordeling van de invloed van trillingen op schade in gebouwen in metselwerk kan meestal slechts indicatief gebeuren. Dit wordt veroorzaakt door een aantal omstandigheden:

- De fysische mechanismen waarlangs schade aan gebouwen door trillingen kunnen ontstaan zijn bijzonder complex. Het gaat over een combinatie van kortdurende horizontale en verticale dynamische effecten op een pand, in combinatie met vanuit de bodem opgelegde additionele spanningen als gevolg van horizontale rekken en buigrekken in de bodem.
- Schade door trillingen moet – met name bij relatief lage trillingsniveaus - altijd in samenhang gezien worden met een reeds bestaande spanningssituatie in de constructie, die niet alleen door ontwerp, eigen gewicht en rustende belasting is veroorzaakt, maar ook door andere verschijnselen die in de tijd zijn opgetreden (zoals krimp, zettingen), door verschijnselen die afhankelijk zijn van tijd op de dag en tijd in het seizoen en door de interactie van het gebouw met de funderingsgrondslag en de eigenschappen van die funderingsgrondslag.
- Er zijn geen typische schadebeelden voor 'schade veroorzaakt door trillingen, bij lage trillingsniveaus'; dit betreft in de regel schadebeelden waarvan de oorzaak door andere fenomenen wordt gedomineerd, waarbij de trilling de functie van trigger heeft (is de druppel geweest waardoor de schade ontstaat) of een verergering of vergroting van de schade zou hebben kunnen veroorzaken. Dit mechanisme is in hoofdstuk 11 aan de hand van modelberekeningen nader onderzocht.

- Alleen bij hoge trillingsniveaus, op korte afstanden van epicentra van bevingen en bij sterke bevingen, zullen de dynamische belastingen zodanig hoog kunnen zijn, dat schademechanismen aan de orde zijn en een schadebeeld ontstaat, waarbij de trillingen een dominante invloed hebben.

Het samenspel van deze factoren bemoeilijkt een volstrekt objectieve en eenduidige beoordeling.

Niettemin kunnen de inzichten uit het bovenstaande worden gebruikt bij het formuleren van criteria voor het beoordelen van de invloed van trillingen door bevingen in scenario's voor schade, dus voor de technische toerekenbaarheid.

We onderscheiden drie omstandigheden, afhankelijk van de opgetreden trillingssterkte:

- I. Trillingen zijn zodanig laag dat deze geen enkele aantoonbare invloed hebben
- II. Trillingen van zodanige sterkte, dat deze alleen in combinatie met andere fysische belastingen tot schade aanleiding kunnen geven (triggerwerking)
- III. Trillingen van zodanige sterkte, dat deze al dan niet in combinatie met andere fysische belastingen zelfstandig tot schade aanleiding kunnen geven.

Deze situaties zijn hieronder toegelicht.

Situatie I: Geen enkele aanwijsbare invloed

Wij hanteren hiervoor een indicatieve grens van 0,5 mm/s. De motivering hiervoor is als volgt:

- De sterkte van deze trillingen ligt ver (orde een factor 4 tot 10) onder de criteria van de SBR Richtlijn A (2017) en diverse veel voorkomende andere bronnen van dynamische belastingen binnen of buiten en gebouwen veroorzaken trillingen van een vergelijkbare grootte. Alle huidige indicaties zijn zodanig dat trillingen bij deze lage sterkten geen aanleiding geven tot schade. In gebouwen komen door normaal gebruik (belopen van vloeren, sluiten van deuren) en door niet ongebruikelijke omgevingsomstandigheden (bijvoorbeeld de invloed van regulier verkeer) trillingen van geringe grootte vaak voor. Deze trillingen zijn soms wel en soms niet voelbaar. De voelbaarheidsgrens voor kortdurende trillingen ligt indicatief tussen 0,2 en 0,3 mm/s. Uit [10.15] en [10.17] blijkt dat in gebouwen kortdurende trillingen voorkomen, die niet aan bevingen zijn gerelateerd, met een sterkte (piekwaarden) in de orde van 0,5 tot 1,5 mm/s. Uiteraard zijn deze trillingssterkten zeer afhankelijk van de situatie (ligging en gebruik van een gebouw).
- Effecten zoals *verdichting of verweking* van de ondergrond zijn bij deze lage waarden geheel niet aan de orde.
- Ten opzichte van *het aantal* van deze vaak voorkomende trillingen in gebouwen door andere omstandigheden dan bevingen, is het aantal trillingen door bevingen, ook als dit relatief lichte bevingen betreft, relatief gering. Uit het overzicht van de historische bevingen blijkt dat dit per objectlocatie hooguit enkele tientallen lichte of zeer lichte bevingen betreft. Op basis van het aantal van de bevingen en de sterkte van de lichte of zeer lichte bevingen kan worden aangenomen dat de invloed van hun trillingen niet aanwijsbaar en onderscheidbaar is ten opzichte van trillingen uit andere bronnen, binnen of buiten het gebouw.

Trillingen door bevingen zullen dus geen invloed hebben ten opzichte van andere vaak aanwezige bronnen op het ontstaan van schade, om welke reden trillingen met een sterkte kleiner dan 0,5 mm/s niet in scenario's voor het ontstaan van schade worden opgenomen. De waarde van 0,5 mm/s dient daarmee tevens als falsificatiegrens.

Situatie II: Trillingen zijn mogelijk van invloed, maar waarschijnlijk niet als zelfstandige oorzaak

De praktijkervaringen met de toepassing van de SBR Richtlijn A in Nederland tot nu toe geven aanleiding om zeer kleine kansen op schade te verwachten, indien aan de criteria van de SBR Richtlijn wordt voldaan. Die kleine kansen kunnen niet eenduidig en scherp worden gekwantificeerd, maar liggen vrijwel zeker onder de orde van 1 % per object of veel lager. We komen dan in aansluiting op SBR Richtlijn A voor de meest kwetsbare gebouwcategorie uit op waarden van ongeveer 2,0 mm/s. Deze ervaringen worden bevestigd door de uitgevoerde kalibratiestudies naar kansen op schade als gevolg van aardbevingen, met name [10.8] en [10.10]. Bij trillingen met een sterkte onder 2,0 mm/s wordt de kans op schade (in DS1 of hoger) – volgens de huidige inzichten en ervaringen - ruim kleiner dan 1 % ingeschat.

Maar ook zo'n kleine kans betekent dat er onder deze grens toch ook schade zal kunnen ontstaan.

In hoofdstuk 11 is nagegaan wat de invloed is van andere spanningssituaties in gebouwdelen op het ontstaan van scheuren in metselwerk door zeer lichte trillingen. Lichte trillingen kunnen een rol spelen bij het zichtbaar laten worden van schade (een zogenaamde *trigger*) waar ook een ander onderliggend mechanisme werkzaam is. Daarbij blijkt dat de invloed van de spanningssituatie in gebouwdelen een essentiële omstandigheid is voor het ontstaan van schade.

Deze triggerwerking is ook relevant bij het ontstaan van schade in niet constructieve afwerkingen in gebouwen, zoals het openen van naden in aansluitingen van niet-constructieve onderdelen. Deze naden en aansluitingen hebben meestal geen constructief verband en een zeer geringe sterkte.

Situatie III - Trillingen zijn van invloed als zelfstandige oorzaak

Uit kalibratiestudies [10.8], [10.10] en de beperkt beschikbare rekenmodellen [10.13] blijkt dat de kans op schade bij panden van de meest kwetsbare categorie (SBR Bouwwerkklasse 'Gevoelige Bouwwerken') in de orde van 50 % bedraagt bij topwaarden van de trillingssterkte groter dan circa 25 mm/s.

Het is niet eenvoudig aan te geven waar trillingen een bepalende invloed op het ontstaan of vergroten van schade krijgen, bepalend wordt in die zin dat de invloed van de trilling dominant is ten opzichte van de invloed van andere belastingen (zoals krimp, zetting, eigen gewicht en rustende belasting). Gelet op de scherp toenemende schadekansen die volgen uit de besproken modelberekeningen en evaluatiestudies, mag worden verwacht dat bij 'gevoelige bouwwerken' en een trillingssterkte groter dan 20 à 30 mm/s van zo'n situatie sprake zal zijn. Voor gebouwen behorende tot SBR bouwwerkklasse 'Normale bouwwerken' liggen de overeenkomstige trillingssterkten naar verwachting in de orde van een factor 2,5 hoger. Er is op dit moment weinig concreet en kwantitatief materiaal om scherper afgebakende grenzen aan te geven.

Toerekenbaarheid van een aandeel in de schade

De technische toerekenbaarheid die in dit onderzoek wordt gehanteerd, is het aandeel van een oorzaak in het overschrijden van een kritische grens van de spanningen of rekken in een bouwdeel, waardoor schade ontstaat. De toerekenbaarheid is daarmee niet vergelijkbaar met een kans op schade.

Toch mag verwacht worden dat de toerekenbaarheid een enigszins vergelijkbare relatie zal hebben met de geschetste kansen op schade als gevolg van trillingen. De trillingssterkte is direct gerelateerd aan de mate van rekken en spanningen die door de trillingen *additioneel* in een bouwdeel ontstaan.

Verondersteld mag worden dat bij zeer groot aantal bouwdelen (N) met een navenant groot aantal verschillende geometrieën en spanningssituaties (als gevolg van eigen gewicht, rustende belasting, opgelegde of verhinderde vervormingssituaties, zettingsverschillen et cetera), de bijdrage van een lichte trilling maar in enkele gevallen (n) zal leiden tot overschrijden van de kritische spanning en daarmee tot het ontstaan van schade. De verhouding n/N kan worden beschouwd als de kans op schade.

Zou dit experiment herhaald worden met een steeds toenemende trillingssterkte, dan zal in een steeds groter aantal gevallen de sterkte worden overschreden. Bij een grotere trillingssterkte wordt dus een grotere n als uitkomst verwacht, en dus een grotere kans op schade.

De op deze wijze bepaalde kans op schade als functie van de trillingssterkte wordt dus bepaald door twee factoren:

- De resterende spanningscapaciteit in het bouwdeel
- De sterkte (de opneembare spanning) in het bouwdeel

Over de mate waarin bouwdelen door diverse andere belastingcondities al zijn belast, en dus over de resterende spanningscapaciteit in het bouwdeel, valt weinig concreets te zeggen. Aangenomen zou kunnen worden dat de kans op een restcapaciteit tussen 0 % en 100 % uniform (dus volledig gelijk) verdeeld is. De sterkte van het materiaal in een bouwdeel is indicatief beter bekend op basis van diverse onderzoeken naar de sterkte van bijvoorbeeld nieuw metselwerk en metselwerk in bestaande gebouwen. Vaak hebben deze sterktes een lognormale kansverdeling.

Met die uitgangspunten mag verwacht worden dat de gevonden relatie n/N ook een lognormaal verband met de trillingssterkte zal hebben. De in dit hoofdstuk gepresenteerde relaties bevestigen dit.

Met deze overwegingen en bij gebrek aan andere goede aanknopingspunten is het realistisch de technische toerekenbaarheid indicatief te relateren aan de opneembare spanning in het bouwdeel, welke op zijn beurt kan worden afgeleid uit de schadecurves, zoals gepresenteerd in figuur 10.2 en tabellen 10.1 tot en met 10.3.

Dit betekent dat voor metselwerk in gevoelige gebouwen de toerekenbaarheid evenredig is met de trillingssnelheid en 50 % bedraagt bij circa 25 mm/s, en dus *zeer indicatief* circa 2 % per mm/s. Voor normale gebouwen ligt de toerekenbaarheid ongeveer een factor 2,5 lager, indicatief circa 0,5 % à 1 % per mm/s. Hierbij wordt opgemerkt dat met het hanteren hiervan bij iedere te beschouwen schade oordeelkundig moet worden omgegaan en dat dus alle aspecten de schade mede moeten worden beschouwd.

Hoofdstuk 13 gaat – mede op basis van bovenstaande inzichten - nader in op de wijze waarop de toerekenbaarheid van schade aan de oorzaak trillingen in de beoordelingen is gehanteerd.

11 Simulatieberekeningen naar de effecten van trillingen

11.1 Inleiding

Het doel van het uitvoeren van de simulatieberekeningen naar de schadegevoeligheid van gebouwen als gevolg van bodembewegingen is tweeledig. In de eerste plaats dienen de berekeningen om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van metselwerk voor de initiatie van de eerste scheuren onder diverse omstandigheden, inclusief de invloed van bodembewegingen (translaties en vervormingen). Een tweede doel is om inzicht te krijgen in de uitbreiding van reeds bestaande scheuren onder invloed van bodembewegingen. Daarmee ontstaat meer duidelijkheid over de oorzakelijke relatie tussen bepaalde invloedfactoren en het ontstaan van schade, en biedt het een basis voor uitspraken over oorzakelijkheid en toerekenbaarheid.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Paragraaf 11.2 behandelt de gehanteerde modelleringstechnieken om uitspraken te kunnen doen over het spanningsbeeld in gebouwen en onderdelen van gebouwen. Paragraaf 11.3 besteedt aandacht aan de bepaling van het spanning- en vervormingsbeeld in de bodem bij dynamische belastingen uit de diepe ondergrond, zoals aardbevingen. In paragraaf 11.4 is beschreven welke verschillende bodemtypen voor de situatie in Groningen zijn beschouwd. Paragraaf 11.5 gaat in op de modellen van gebouwen die in de studie voor de situatie in Groningen zijn onderzocht. Paragraaf 11.6 bevat een overzicht van de verschillende belastingen waarvan de effecten samen met een dynamische belasting uit de diepe ondergrond zijn gesimuleerd. Paragraaf 11.7 gaat in op de wijze waarop de resultaten van de analyses zijn verwerkt en geïnterpreteerd. Een overzicht van de resultaten van de simulaties wordt gegeven in 11.8 en de resultaten worden besproken in 11.9. Paragraaf 11.10 tenslotte bevat de conclusies van de simulatieberekeningen, waarbij een verbinding wordt gelegd met de begrippen oorzakelijkheid en toerekenbaarheid van schade.

11.2 Modelling van spanningen in gebouwen en bouwconstructies

Spanningen in gebouwen, onderdelen van gebouwen, en bouwconstructies onder invloed van op een gebouw inwerkende belastingen kunnen worden bepaald door simulatieberekeningen aan de hand van gebouwmodellen en modellen voor de belastingen. De eindige-elementenmethode is een veel gebruikte en krachtige techniek om op de schaal van een heel gebouw of onderdelen daarvan inzicht te krijgen in de optredende spanningen, rekken en vervormingen. De eigenschappen van de toegepaste materialen kunnen in deze modellen nauwkeurig worden meegenomen, waaronder ook niet-lineaire verschijnselen zoals het ontstaan van scheuren in brosse, steenachtige materialen als gevolg van het overschrijden van de uiterst opneembare treksterkte. Belastingen die op een gebouw inwerken kunnen in grootte, plaats en functie van de tijd worden gevarieerd, zodat ook inzicht verkregen kan worden in het patroon en ontstaan van scheurvorming tijdens wisselende belastingen, zoals een aardbeving en ook bij combinaties van verschillende belastingen.

De afgelopen jaren zijn veel studies uitgevoerd, waarbij aan de hand van berekeningen met de eindige-elementenmethode is nagegaan hoe gebouwen en bouwconstructies zich gedragen onder extreme aardbevingsbelastingen. Dit zijn aardbevingen met een zeer geringe kans van optreden en dus een grote magnitude en grote piek-grondversnellingen. Deze extreme omstandigheden worden aangeduid als uiterste grenstoestanden en die zijn van belang om de veiligheid (dat wil zeggen de kans op een situatie van net niet bezwijken, 'near collapse') te controleren. Deze extreme omstandigheden gaan gepaard met grote scheurvorming en grote verplaatsingen van onderdelen van een pand. Daartoe is ook veel onderzoek verricht om vast te stellen wat de eigenschappen zijn van het metselwerk dat in Groningen in diverse bouwperioden is toegepast. Onder meer zijn laboratoriumtesten uitgevoerd op onderdelen van metselwerk afkomstig uit bestaande panden in de provincie Groningen.

Voor de simulaties naar de veiligheid van constructies worden aannamen en vereenvoudigingen gedaan bij de modellering van het gebouw en ook bij de modellering van de bodembeweging. Zo is het gebruikelijk de bodembeweging bij een uiterste-grenstoestandanalyse te beschrijven in termen van horizontale en verticale bodemversnellingen die uniform over de afmeting van de fundering optreden. Bij berekeningen voor het eerste ontstaan van schade, veelal kleine scheuren in brosse steenachtige materialen, te onderzoeken moet echter veel nauwkeuriger worden gekeken naar de complete beschrijving van het spanningsveld en vervormingsveld dat bij een bodemtrilling vanuit de bodem op een gebouw wordt overgedragen. Met name de horizontale rekken van de bodem (extensie) en de kromming dienen te worden meegenomen en de aanstoting is dan niet langer uniform over de afmeting van de fundering. Een dergelijke nauwkeuriger en completere beschrijving is in deze studie toegepast, specifiek voor aardbevingen. Voor zover in de literatuur is nagegaan, is zo'n complete beschouwing van het spanningsveld in de bodem nog niet eerder bestudeerd in relatie tot de initiatie van scheuren in gebouwen door geïnduceerde aardbevingen.

11.3 Modellering van een dynamische belasting uit de diepe ondergrond

Bij een modellering van een dynamische belasting door aardbevingen in een uiterste-grenstoestandanalyse wordt de aardbevingsbelasting op een gebouw in de regel vereenvoudigd tot slechts de horizontale en verticale component van de optredende bodemversnelling. De optredende bodemversnelling volgt bijvoorbeeld uit normen en richtlijnen of wordt gebaseerd op gemeten bodemversnellingen bij aardbevingen van een representatieve sterkte. Indien de ondiepe bodem een versterkend effect heeft op de uiteindelijke bodemversnelling – hetgeen vaak het geval is bij relatief slappe toplagen – wordt deze versterking in de berekening aanvullend in rekening gebracht, ofwel door een analyse van de dynamische versterking van de toplagen of door het toepassen van toeslagfactoren op de bodemversnelling. De recent verschenen Nederlandse norm NPR 9998 [11.5] bevat een overzicht van de modellering- en berekeningstechnieken voor het vaststellen van de veiligheid van gebouwen bij geïnduceerde aardbevingen.

Andere eindige-elementen modelstudies, die tot doel hadden de invloed van ondiepe bodemtrillingen op gebouwen te kwantificeren, maken gebruik van de complete interactie tussen de bodem en het gebouw. Daarbij wordt niet alleen de verticale en horizontale versnelling op het grensvlak van bodem en gebouw beschreven, maar ook de volledige interactie tussen gebouw en bodem en de optredende horizontale en verticale bodemrekken, eventuele krommingen etc. Voorbeelden van deze studies zijn onder meer [11.1] en [11.2].

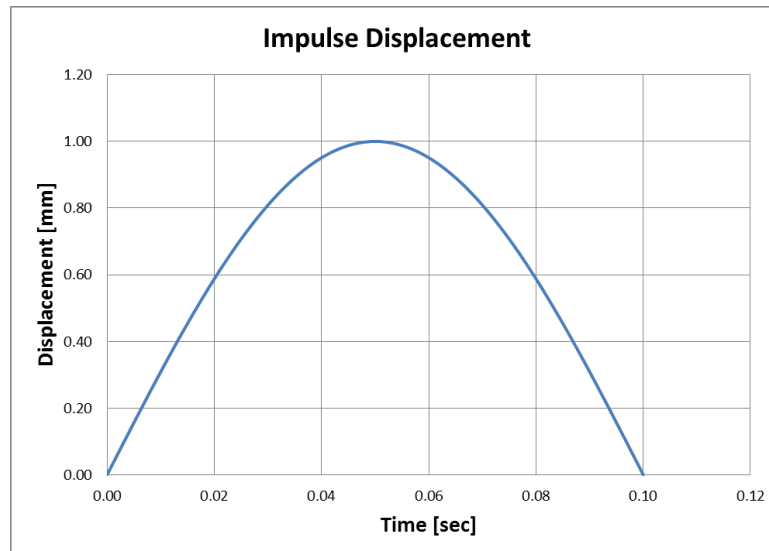
De centrale hypothese in de nu voorliggende studie is dat deze complete interactie tussen ondiepe bodem en gebouw een belangrijke element vormt bij het op een correcte wijze beschrijven van de spanningen in een gebouw als gevolg van aardbevingen en derhalve van groot belang is voor de kwalificering en kwantificering van de effecten van bodemtrillingen op gebouwen, zoals het eerste ontstaan van scheuren in metselwerk.

De bodemmodellen die in deze studie zijn gehanteerd, zijn zodanig ontworpen dat het complete spannings- en vervormingsbeeld wordt beschreven, dat ontstaat door het voortplanten van de trillingsgolven vanuit de diepe bodem naar de oppervlakte. Hiertoe zijn in aanvulling op elkaar verschillende eindige-elementenmodellen gebruikt die steeds verder inzoomen. Het eerste model beschrijft de diepe bodem als een halfruimte. Dit model wordt verder aangeduid als het *diepe bodemmodel*. De gehanteerde afmeting van het desbetreffende eindige-elementenmodel is 8 km breed en 3 km diep. De elastische mechanische eigenschappen van de bodemlagen van 3 km diepte tot aan het aardoppervlak zijn gemodelleerd. Dit bodemmodel kan de spanningsgolven als gevolg van aardbevingen in het frequentie gebied van 0 tot circa 10 Hz beschrijven. Figuur 11.1 toont het gehanteerde diepe bodemmodel. Meer informatie over de gehanteerde modellen is gegeven in bijlage F.

De toegepaste belasting om een aardbeving te beschrijven is een verticale verplaatsingspuls met een duur van 0,1 seconde op 3000 m onder het aardoppervlak, zie figuur 11.2. De overweging hierbij is dat een dergelijke kortdurende belasting alle frequenties in het domein tot 10 Hz bevat. De verticale richting van de belasting is gekozen omdat deze het best bij de symmetrie van het model past. Bovendien is de ervaring bij dergelijke berekening dat op enige afstand van de bron de horizontale en verticale trillingen aan het oppervlak niet veel zullen verschillen qua sterkte, ongeacht de richting van de aanstoting.

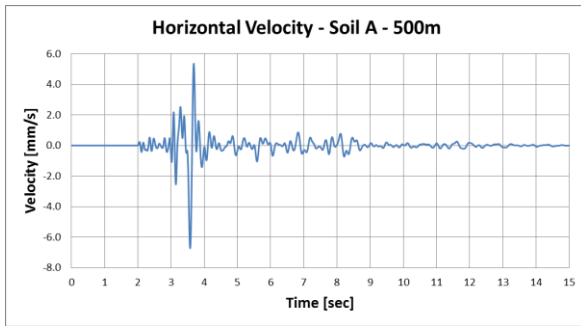


Figuur 11.1: Eindige-elementenmodel van het diepe bodemmodel. De onderscheiden grondlagen zijn schematisch aangegeven.

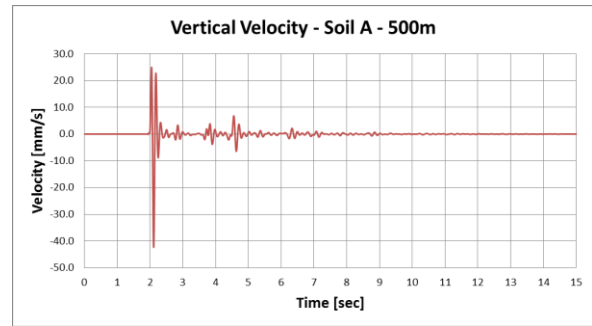


Figuur 11.2: Tijdfunctie van de impulsvormige verplaatsingsverstoring die op 3 km diepte aan het model is opgelegd.

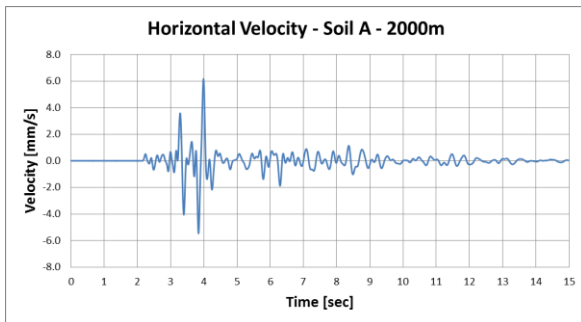
Na enige tijd treedt door een complexe interactie van golven vanuit de diepe bodemlagen naar de ondiepe bodemlagen een respons aan het aardoppervlak op. Figuur 11.3 toont de trillingssnelheid op drie verschillende afstanden tot het epicentrum. Uit de figuren blijkt een duidelijke tijdvertraging. De horizontale en verticale trillingssnelheid zijn op grotere afstand tot het epicentrum van dezelfde orde van grootte. Figuur 11.4 geeft de spectra van deze tijdregistraties, waaruit blijkt dat de dominante frequenties in de respons aan het aardoppervlak binnen het domein van 0 tot 10 Hz liggen.



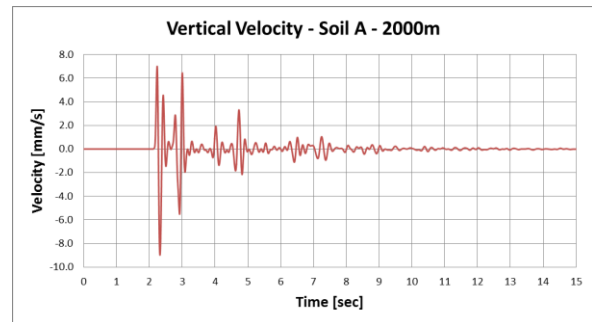
(a)



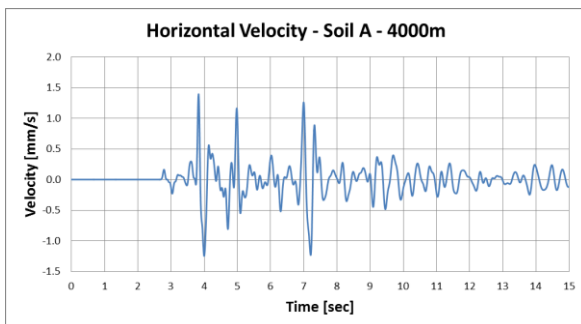
(b)



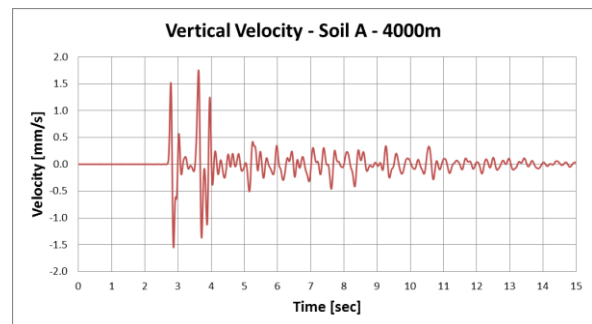
(c)



(d)

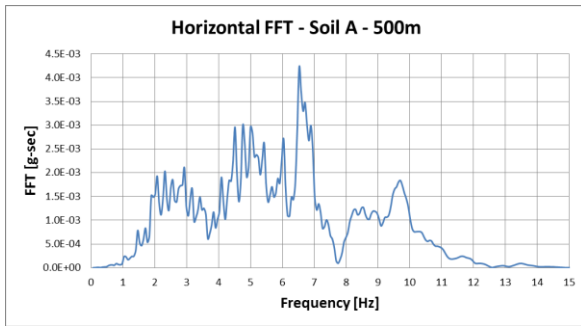


(e)

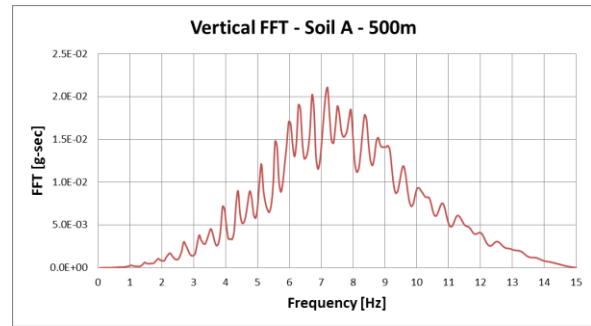


(f)

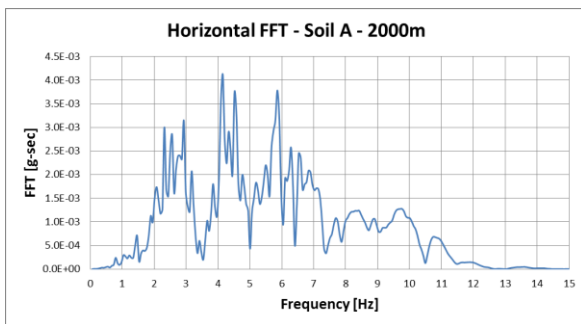
Figuur 11.3: Tijdfuncties van de gesimuleerde horizontale en verticale trillingsnelheid aan het aardoppervlak op een afstand van (a) 500 m (c) 2000 m (e) 4000 m tot het epicentrum.



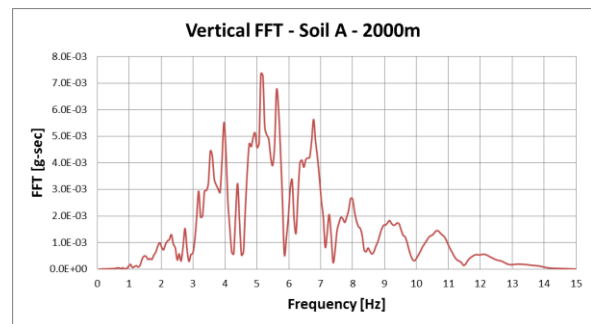
(a)



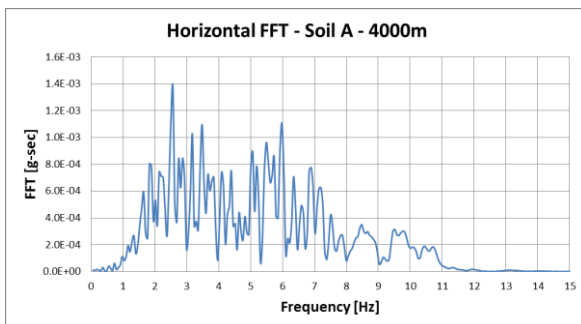
(b)



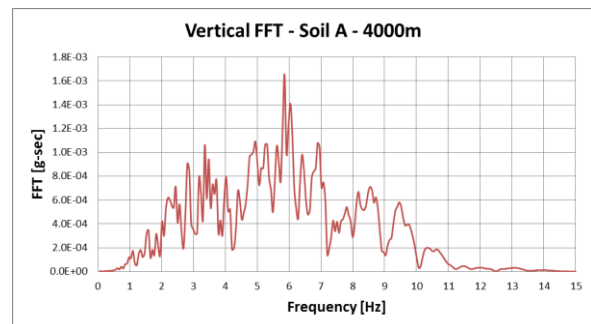
(c)



(d)



(e)



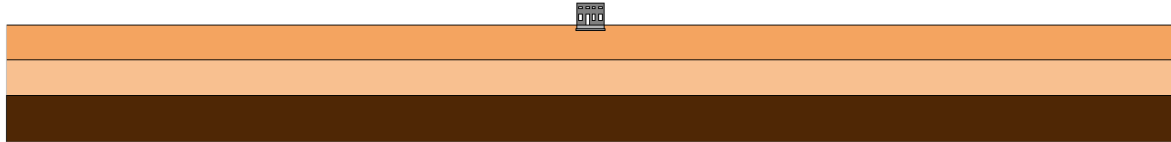
(f)

Figuur 11.4: Spectra van de gesimuleerde horizontale en verticale trillingsnelheid aan het aardoppervlak op een afstand van 500 m, 2000 m en 4000 m.

De sterkte van de bevingen is zodanig opgeschaald, dat effecten van de trillingen in een interval van horizontale trillingsnelheid tussen 2 en 16 mm/s kan worden onderzocht. Nabij het epicentrum heeft de verticale trillingsnelheid een waarde die 6 keer hoger ligt dan de horizontale component, op 4 km afstand is de verticale trillingsnelheid dezelfde orde van grootte als de horizontale trillingsnelheid.

Ten einde een nauwkeuriger beschrijving te realiseren van het spannings- en vervormingsveld aan het aardoppervlak dat met de bodemtrillingen gepaard gaat, is een tweede, meer verfijnd model gebruikt dat alleen de bovenste lagen van de bodem beschrijft tot een diepte van 30 m en waarbij de lagen 300 m in de breedte uitstrekken. Dit model wordt verder aangeduid als het *ondiepe bodemmodel*. Dit model is op de randen gevoed met het vervormingsbeeld van het hiervoor

beschreven grotere diepe bodem model. Op het ondiepe bodemmodel kunnen onderdelen van gebouwen (zoals bijv. de gevels inclusief de fundering) worden gemodelleerd. Figuur 11.5 toont het gehanteerde ondiepe bodemmodel met daarop een gebouwmodel. Directe opname van het gebouwmodel op het grote diepe bodemmodel is qua rekentijd en computercapaciteit niet haalbaar.



Figuur 11.5: Deelmodel van de ondiepe bodem, met daaraan gekoppeld het model van een gevel.

De laatste vereenvoudiging betreft het vervangen van het ondiepe bodemmodel door een vereenvoudigde beschrijving van de stijfheidseigenschappen van de funderingsgrondslag onder het gebouw, in de vorm van ontkoppelde veren en dempers. Dit is in het vervolg aangeduid als het *gebouwmodel*. Aan het gebouwmodel wordt het spannings- en vervormingsbeeld op de overgang van de fundering van het gebouw op basis van het ondiepe bodemmodel aan het gebouwmodel opgelegd en kunnen de spanningen in het gebouwmodel worden berekend.

Noot: het bodemmodel is beschreven in de situatie van vlakke rektoestand, waarmee de spannings- en vervormingssituatie in de bodem onder een vlakke of bolvorming uitbreidende spanningsgolf het meest realistisch kan worden beschreven. Het gebouwmodel daarentegen is beschreven in een situatie van een vlakke spanningstoestand. Deze beschrijving is voor het gebouwdeel realistisch. Tussen beide beschrijvingsvormen is in het rekenmodel een koppeling gemaakt.

11.4 Modelparameters voor bodem en funderingsgrondslag

Voor de keuze van representatieve bodemomstandigheden in Groningen is teruggesproken op een eerdere studie van Deltares [11.3]. Daarin zijn zeven karakteristieke en sterk verschillende, voor Groningen representatieve situaties van de ondiepe ondergrond (tot ca. 50 m diepte) gepresenteerd. In de nu voorliggende studie is gebruik gemaakt van twee van deze representatieve bodemsituaties: een ondergrondsituatie met een relatief grote stijfheid van de bovenste lagen en een ondiepe ondergrondsituatie met een relatief geringe stijfheid van de bovenste lagen. Dit betreft de ondergrondprofielen overeenkomend met F6 en F7 in de studie van Deltares [11.3] enerzijds (bodemtype A in dit onderzoek) en met F8 in de studie van Deltares [11.3] anderzijds (bodemtype B in dit onderzoek). Daarmee wordt aangesloten bij de onderzoeksgebieden met een relatief stijve en een relatief slappe bodem.

Het gebruik van diepe bodemmodellen, ondiepe bodemmodellen en gebouwmodellen, zoals beschreven in de vorige paragraaf, is onderzocht op een betrouwbare beschrijving van het spanning- en vervormingsbeeld ook na ont koppeling van de modellen. Ook is nagegaan of de aanwezigheid van een gebouwmodel een grote verstoring van het invallend spanning- en vervormingsbeeld in het ondiepe bodemmodel oplevert. Aangezien gebleken is dat de invloed hiervan gering is, is in het vervolg van de studie gebruik gemaakt van het invallende spanning- en vervormingsbeeld van de ondiepe bodem, als ware er geen gebouw aanwezig.

11.5 Gebouwmodellen

Ook de eindige-elementenmodellen van de gebouwen zijn vereenvoudigingen van de werkelijke situatie. Omdat bij bodembewegingen met geringe grootte de belangrijkste spanningseffecten worden verwacht in het vlak van dragende wanden, zijn alleen de gevelvlakken van gebouwen gemodelleerd en is alleen de krachtswerking in het vlak van de gevelvlakken onderzocht.

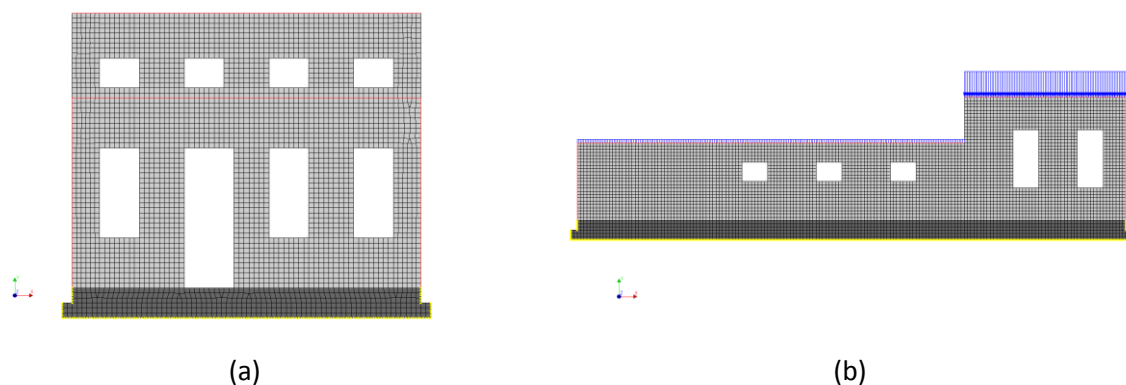
Bij een belasting haaks op de gevelvlakken zullen uiteraard ook spanningen in de gevel ontstaan. De kromming en extensie in de bodem, die gepaard gaan met de bodemtrilling, zullen echter een veel geringer effect hebben loodrecht op de gevelvlakken. Daarbij zijn de horizontale versnellingen bij de hier te simuleren bodemtrillingen ook nog gering, waardoor nauwelijks belasting door traagheidseffecten haaks op een gevelvlak ontstaan.

Er zijn modellen gemaakt van een voorgevel en zijgevel van een boerderij (woonhuis annex schuur), bouwjaar voor of rond 1900 en van een voorgevel en zijgevel van een vrijstaande woning uit de jaren 30. Het betreft dus tweedimensionale modellen die uitsluitend de spanningen en vervorming in het vlak van de wanden beschrijven.

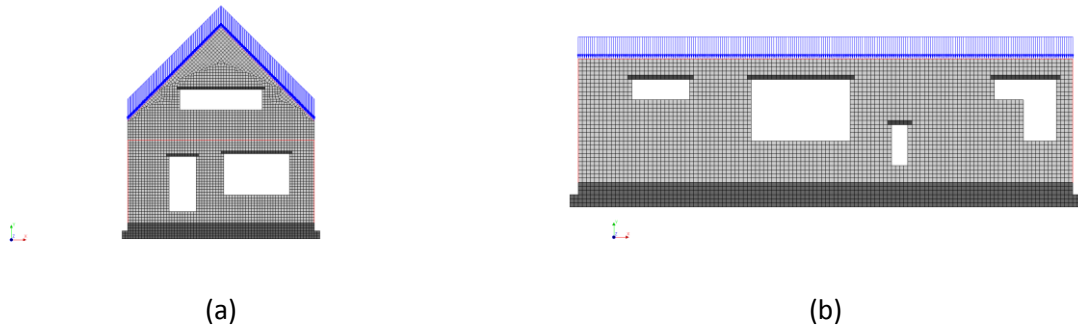
De volgende modelleringsuitgangspunten zijn gehanteerd:

- Er is steens en halfsteens metselwerk in baksteen gemodelleerd.
- De opening van ramen en deuren bevatten aan de bovenzijde geen lateibalken
- De invloed van rustende belasting (bijvoorbeeld balklagen die op de muren dragen) is meegenomen in de vorm van toegevoegde massa
- De invloed van aansluitende wanden, bijvoorbeeld bij het geveleinde, is meegenomen in de vorm van toegevoegde massa.
- Er is onderscheid gemaakt in metselwerk van normale gemiddelde kwaliteit en metselwerk van lage kwaliteit

Figuur 11.6 en 11.7 tonen de gehanteerde schematisatie van de twee bouwtypen.



Figuur 11.6: Eindig-elementenmodel van de voorgevel van een boerderij (a) en van de zijgevel van een boerderij (b)



Figuur 11.7: Eindig-elementenmodel van de voorgevel (a) en zijgevel (b) van een vrijstaande woning

De gegevens over de toegepaste eindige elementen, over de materiaalparameters, de modellen die de sterkte en scheurvorming in het metselwerk beschrijven zijn te vinden in bijlage F. In de materiaalparameters en gehanteerde modellen zijn de recente inzichten met betrekking tot sterkte en scheurvorming in metselwerk in de Groningse situatie verwerkt.

11.6 Belastingomstandigheden en uitgevoerde analyses

De volgende omstandigheden met betrekking tot de op het gebouwmodel werkende belastingen zijn gemodelleerd:

- a) Belasting door eigen gewicht en rustende belasting
- b) Een ongelijkmatige zetting op de gevel, aangebracht in de vorm van een opbuigende kromming ('hogging')
- c) Dynamische belasting uit de diepe ondergrond op verschillende afstanden (c_1 , c_2) tot het epicentrum bij ondiepe bodem type A
- d) Dynamische belasting uit de diepe ondergrond op verschillende afstanden (d_1 , d_2) tot het epicentrum bij ondiepe bodem type B

De dynamische belasting uit de diepe ondergrond is aan het aardoppervlak gevarieerd in de vorm van een horizontale trillingssnelheid in vier stappen 2, 4, 8, 16 mm/s. Dit is aangegeven met c_1 -1, c_1 -2, c_1 -3 etc.

De belastingcondities zijn afzonderlijk en vervolgens in samenhang onderzocht:

- Belasting door eigen gewicht (a) afzonderlijk
- Belasting door eigen gewicht (a) gecombineerd met (b)
- Belasting door eigen gewicht (a) gecombineerd met (c) in vier verschillende stappen
- Belasting door eigen gewicht (a) gecombineerd met (d) in vier verschillende stappen
- Belasting door eigen gewicht (a) gecombineerd met (b) in een mate dat lichte scheurvorming optreedt. Vervolgens is deze situatie gecombineerd met (c) en (d) in vier verschillende stappen.

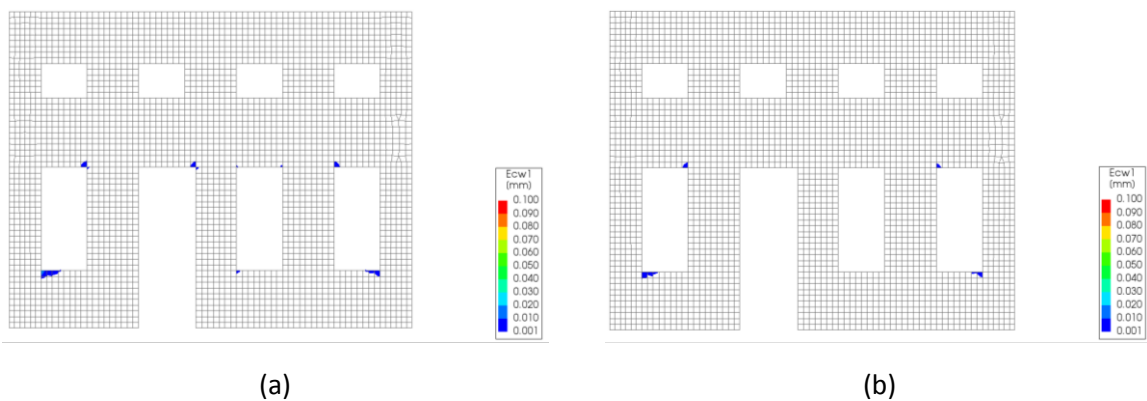
De analyses zijn uitgevoerd met het gefaseerd aanbrengen van de diverse belastingen. De gehanteerde constitutieve modellen zijn niet-lineair, dat wil zeggen ze beschrijven niet alleen de elastische stijfheid maar ook de sterkte en de taaiheid/brosheid (na-piek 'softening' gedrag) van het metselwerk. We concentreren ons daarbij op het gedrag onder trek, omdat bij lichte bevingen het scheurgedrag onder trek dominant is. Niet-lineair gedrag onder afschuiving en druk zijn pas relevant bij grote, extreme bevingen. De initiële belastingen zijn statisch aangebracht. De ongelijkmatige zettingen zijn aangebracht in de vorm van een opbuigende Gauss-kromme (Gaussian hogging curve),

op een wijze analoog aan het aanbrengen van zettingen bij een experimentele analyse [11.6]. De effecten van de trillingen zijn berekend door middel van dynamisch niet-lineaire berekeningen in het tijdsdomein.

11.7 Verwerking en interpretatie van de resultaten

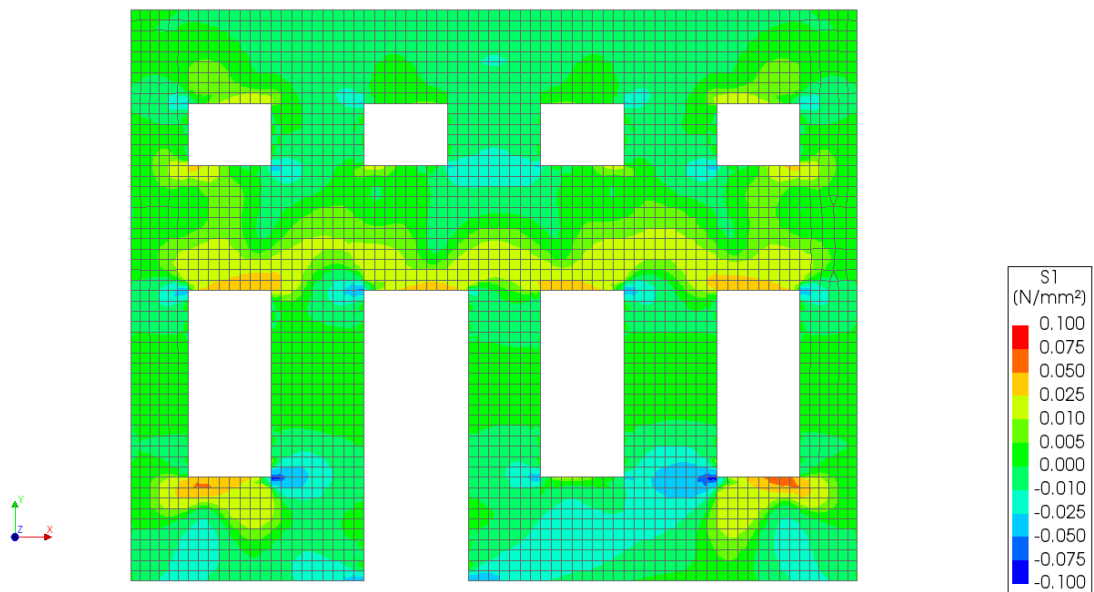
De resultaten van de uitgevoerde berekeningen zijn beoordeeld op vier parameters:

- De maximale scheurwijdte in het gebouwmodel gedurende de belasting
- De maximale blijvende scheurwijdte in het gebouwmodel na de belasting
- Het scheurpatroon in het gebouwmodel na de belasting
- Het spanningspatroon in het gebouwmodel na de belasting



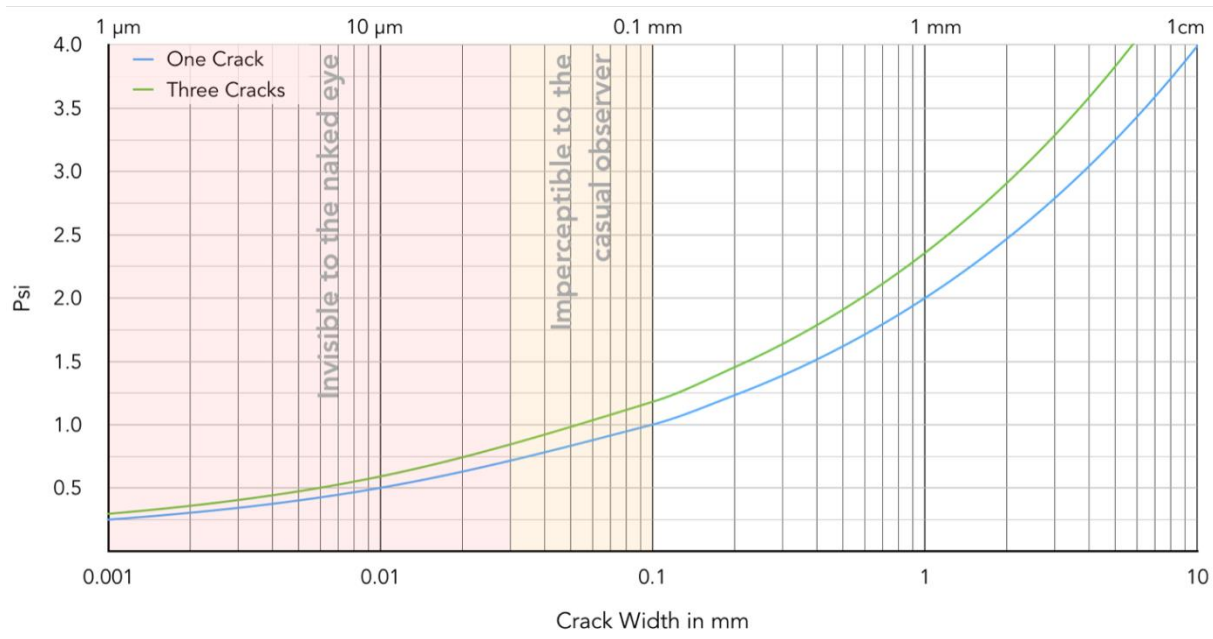
Figuur 11.8: - Belasting door eigen gewicht gecombineerd met beving: (a) maximale scheurwijdte gedurende de dynamische belasting (b) en resterende scheurwijdte na de beving.

Analysis1
Phased 2, Time-step 10000, Time 10.000, Settlement
Cauchy Total Stresses S1
min: -0.107N/mm² max: 0.060N/mm²



Figuur 11.9: Voorbeeld van verdeling van de resterende spanningen in het gevelveld na de beving.

Voor een integrale beoordeling van de scheurwijdte in een gebouwmodel is in [11.4] een methodiek gepresenteerd, waarin scheurwijdte en scheurlengte van alle scheuren in een gevel samen worden beschouwd in één schadeparameter Psi, ook aangeduid als Ψ . Deze parameter is ook zeer bruikbaar om de ontwikkeling van scheuren in geveldelen te volgen als gevolg van de combinatie van meerdere verschillende belastingen.



Figuur 11.10 Relatie tussen Ψ en scheurwijdte en aantal scheuren. Scheuren in steenachtige materialen zoals metselwerk met een scheurwijdte kleiner dan 0.1 mm vereisen speciale optische hulpmiddelen om te kunnen worden gedetecteerd [11.4].

De parameter Ψ beschrijft de schade in de categorie lichte schade (in de literatuur: damage class 1, DS1). De parameter beschrijft het totaal aan zichtbare scheuren (aantal en scheurlengte), zodanig dat een scheur met een scheurwijdte van 0,1 mm een waarde van één oplevert ($\Psi=1$), Scheuren met een wijdte van ca. 1 mm komen op een niveau $\Psi=2$ en scheuren met een wijdte van 4 mm geven bij benadering $\Psi=3$.

Bij de bepaling van de parameter Ψ worden het aantal scheuren, de scheurwijdte en de scheurlengte in beschouwing genomen, met de volgende formule [11.4]:

$$\Psi = 2n_c^{0,15} \dot{c}_w^{0,3} \quad (1)$$

Waarin:

n_c is het aantal scheuren in het muurveld

\dot{c}_w is de naar scheurwijdte en naar scheurlengte gewogen scheurwijdte (in mm), bepaald uit:

$$\dot{c}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n_w} c_{w,i}^2 \cdot C_{L,i}}{\sum_{i=1}^{n_w} c_{w,i} \cdot C_{L,i}} \quad (2)$$

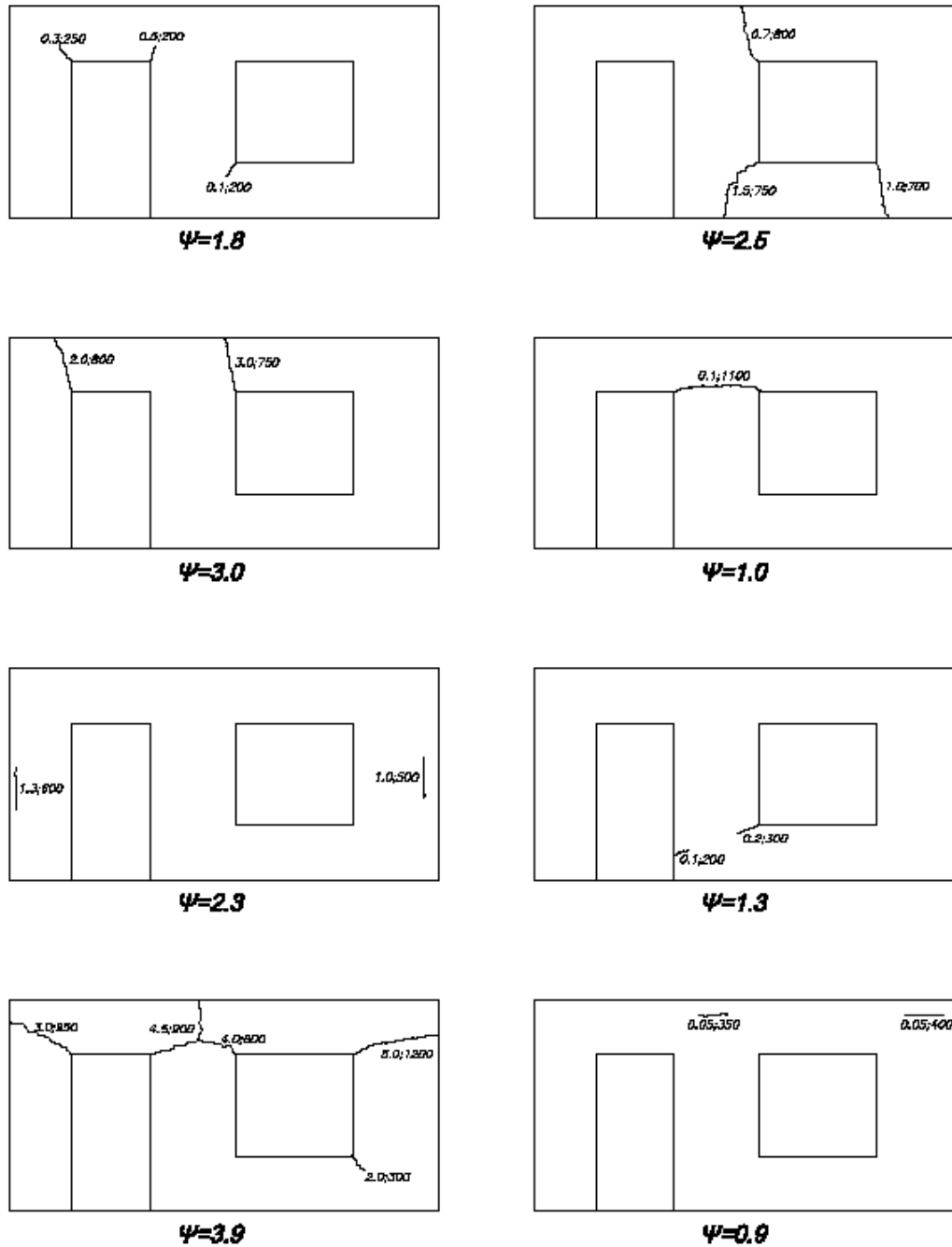
waarin:

c_w is de scheurwijdte gemeten bij een scheur, in mm

c_L is de scheurlengte, in mm

In geval $n_c=1$ geldt $\hat{c}_w = c_w$. In bovenstaande uitdrukking (2) wordt de scheurwijdte bepaald door de grootste scheurwijdte langs de scheur.

De parameter vat een volledig scheurpatroon in één getal samen. Hoewel ook informatie verloren gaat, maakt deze nieuwe techniek het mogelijk om het begrip 'schade' in kwantitatieve zin meetbaar en vergelijkbaar te maken. Aangezien de parameter gevoelig is voor scheurwijdte, lengte en aantal scheuren is het een objectieve maatstaf om ontwikkeling van scheurvorming te kunnen kwantificeren. Figuur 11.11 geeft enkele kenmerkende scheurpatronen in gevelaanzichten met de kwantificering in termen van Ψ .



Figuur 11.11 Voorbeelden van gevelvelden met scheuren en de berekende waarde van de parameter ψ [11.4]

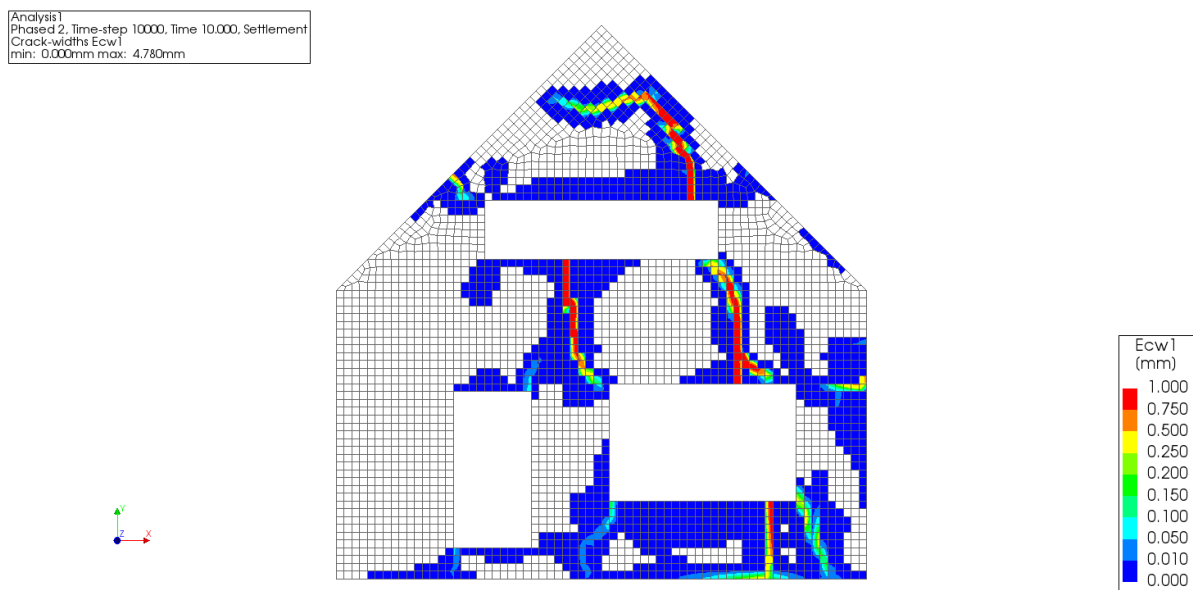
11.8 Resultaten van de schadesimulatieberekeningen

11.8.1 Algemene observaties

De gevelvlakken vertonen onder het aanbrengen van de belasting door eigen gewicht en rustende belasting al spanningen en vervormingen. Deze belastingen leiden tot enige vervormingen in de gevel en in de bodem en soms leiden deze belastingen al lokaal tot lichte overschrijding van de sterkte van het metselwerk.

Bij het simuleren van de initiële belasting op de gevelvlakken als gevolg van een ongelijkmatige zetting, blijkt dat bij een stijvere ondergrond een geringere ongelijkmatige zetting nodig is om tot de bedoelde initiële spanningstoestand of schade te komen, dan bij een minder stijve ondergrond. De gehanteerde initiële verschilzetting is daarom is daarom voor de verschillende bodemomstandigheden verschillend gekozen, waarbij een initiële schade in de orde van $\Psi = 0,7$ is nagestreefd.

Figuur 11.12 toont een voorbeeld van een resultaat voor gevelmodel 3, in termen van blijvende scheurwijdte bij een berekening waarbij een geringe verschilzetting aan het gevelvlak is opgelegd, gevolgd door een beving met trillingssterkte 16 mm/s. De rode zones geven aan waar grote scheuren zijn ontstaan.



Figuur 11.12: Blijvende scheurwijdte bij gevelmodel 3, eigen gewicht, rustende belasting, zettingsverschil + beving met een trillingssterkte van 16 mm/s (afstand tot epicentrum 4000 m).

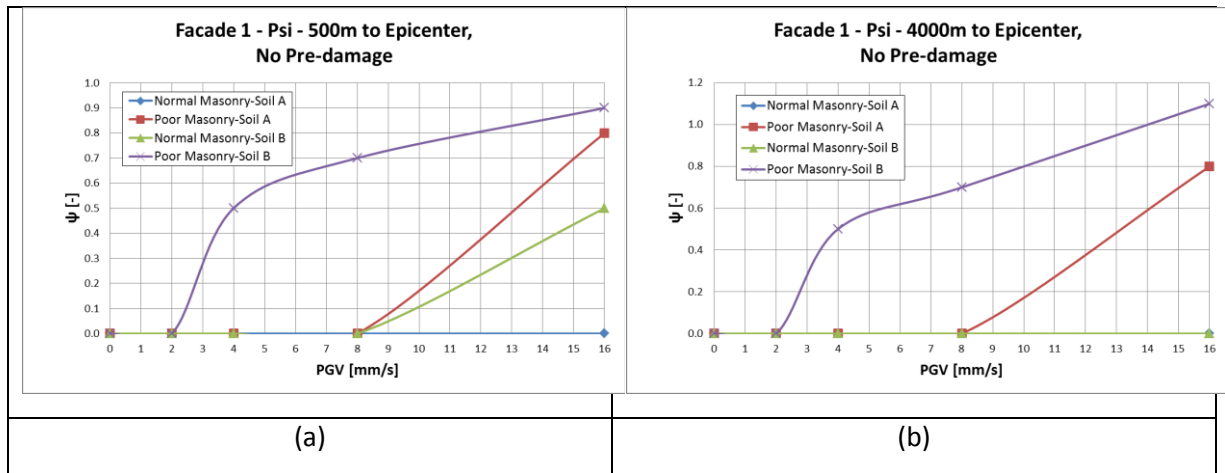
Een overzicht van de numerieke resultaten van de simulaties bevindt zich in bijlage F.

11.8.2 Boerderij, voorgevel

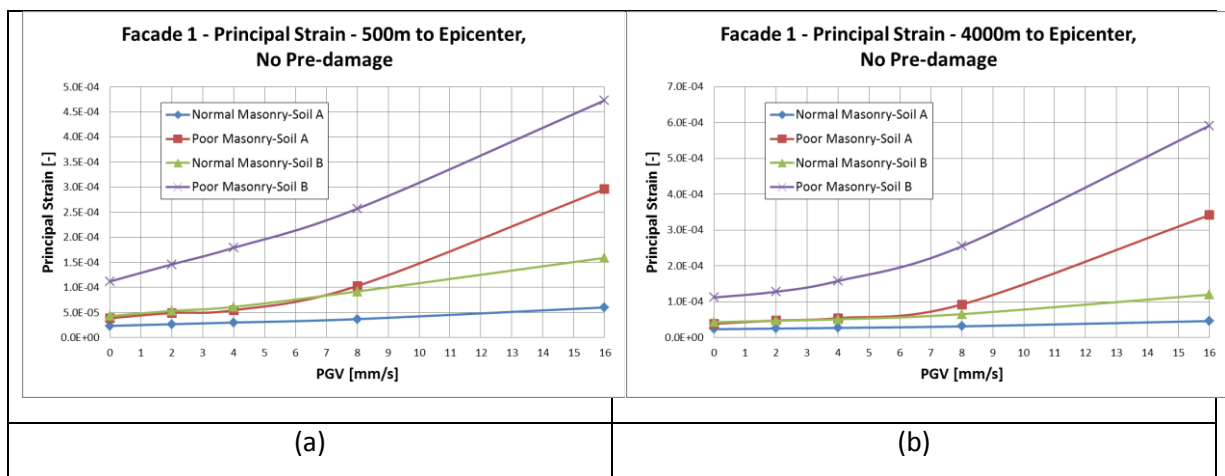
Eigen gewicht, geen aanvullende initiële spanningen door andere omstandigheden

De uitgevoerde simulatieberekeningen aan de voorgevel van de boerderij tonen aan dat in de situatie met alleen eigen gewicht en rustende belasting op de gevel en zonder initiële spanningen door andere omstandigheden in de voorgevel, de trilling met trillingssnelheid tot 16 mm/s bij metselwerk van gemiddelde sterkte niet leidt tot scheuren of scheurgroei. Ook bij metselwerk met lage sterkte leiden de trillingen niet tot met het blote oog waarneembare scheuren. De

scheurwijdten zijn in alle berekende situaties kleiner dan 0,06 mm, voor beide soorten metselwerk. De parameter Ψ ligt in alle gevallen onder 1,0, behalve voor de situatie met metselwerk met lage sterkte en een trillingsnelheid 16 mm/s bij bodemtype 2; hier bereikt Ψ de waarde 1,1. Figuur 11.13 en 11.14 geeft een grafische samenvatting van de resultaten.



Figuur 11.13: Parameter Ψ in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), voorgevel boerderij op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum



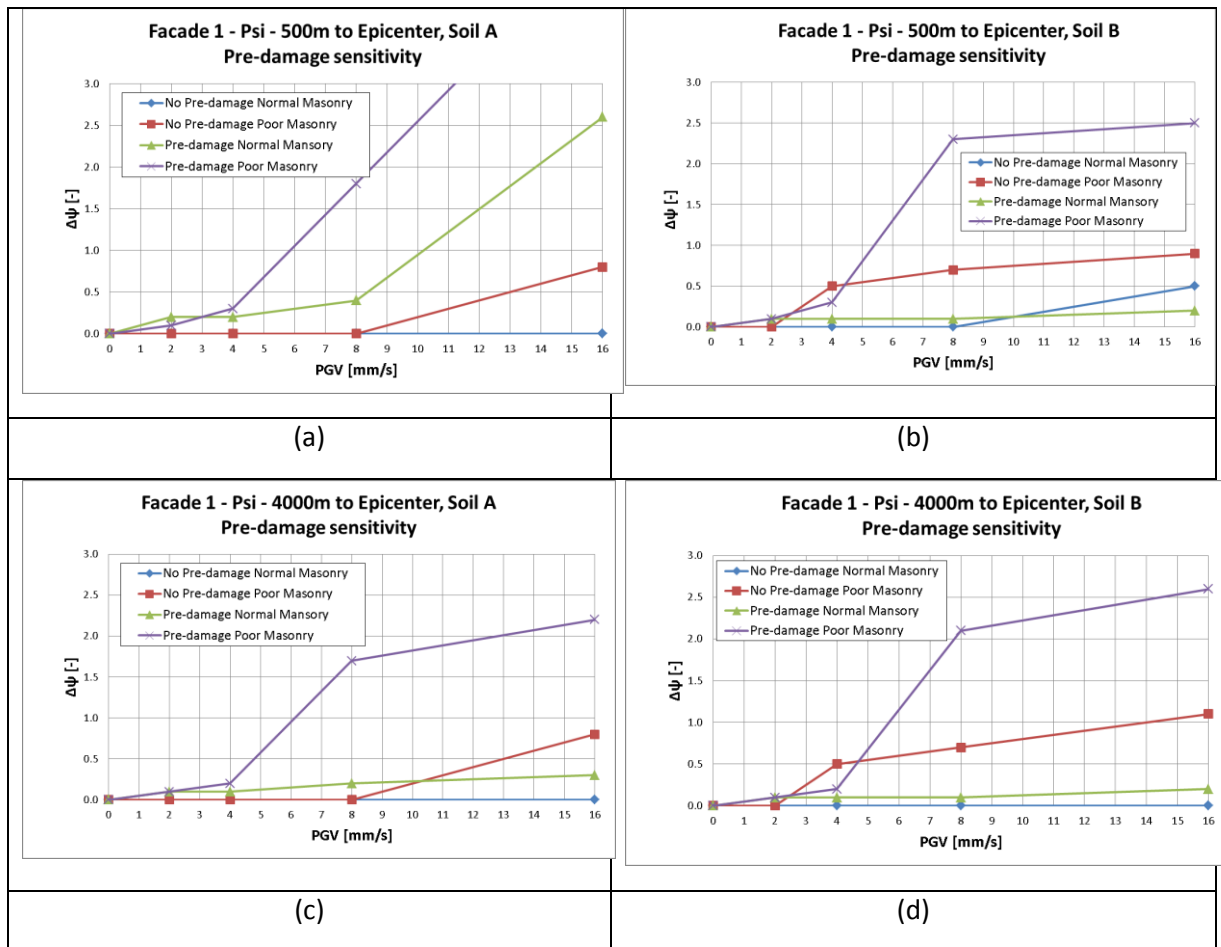
Figuur 11.14: Maximale hoofdtrekrek in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), voorgevel boerderij op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum

Met initiële spanningen door andere omstandigheden

Door het creëren van een stijfheidsverschil in de ondiepe ondergrond is een zettingsverschil gesimuleerd. Hierdoor ontstaan spanningen in het gevelvlak en ontstaan lichte, maar met het blote oog nog vrijwel onzichtbare scheuren met een breedte tot 0,02 mm en $\Psi = 0,6$. Uit de berekeningen blijkt dat bij metselwerk van gemiddelde sterkte deze initiële scheuren niet uitbreiden, behalve in het geval van een trillingsnelheid van 8 mm/s en 16 mm/s op korte afstand tot het epicentrum. In dit geval ontstaat een grotere scheur met $\Psi = 1$ resp. $\Psi = 3,2$.

Bij metselwerk met een lage sterkte treedt in alle gesimuleerde omstandigheden als gevolg van trillingen doorgroei van de scheur op tot een breedte boven 0,2 mm of Ψ groter dan 1 al vanaf een

trillingsnelheid van 8 mm/s. Figuur 11.15 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.15 : Ontwikkeling van de parameter Ψ zonder en met initiële spanningen voor de situaties: a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.

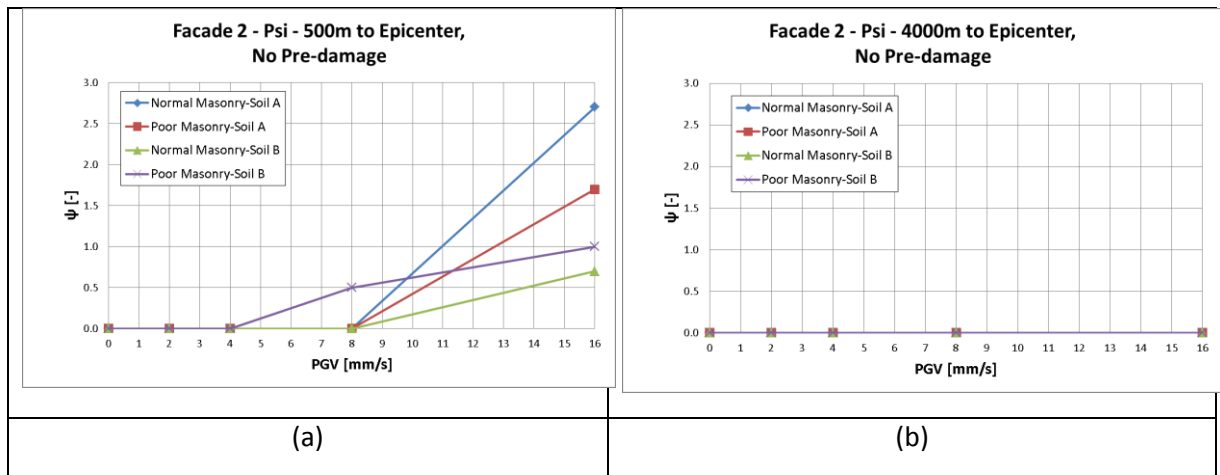
11.8.3 Boerderij, zijgevel

Eigen gewicht, geen aanvullende initiële spanningen door andere omstandigheden

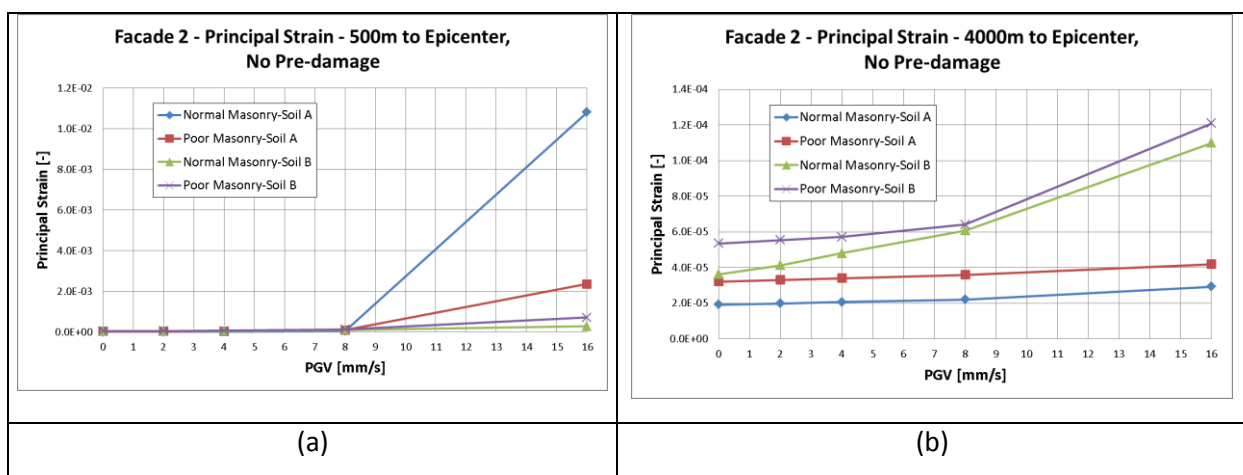
De uitgevoerde simulatieberekeningen aan de zijgevel van de boerderij geven een ten dele vergelijkbaar beeld. In de situatie met alleen eigen gewicht en rustende belasting op de gevel en zonder initiële schade in de voorgevel leidt de trilling met trillingsnelheid tot 8 mm/s bij metselwerk van gemiddelde sterkte niet tot scheuren in het zichtbare bereik. Ook bij metselwerk met lage sterkte leiden de trillingen niet tot met het blote oog waarneembare scheuren. De scheurwijdten zijn in alle andere berekende situaties kleiner dan 0,06 mm, voor beide soorten metselwerk. De parameter Ψ ligt in alle gevallen onder 1,0.

In een situatie dicht bij het epicentrum en met een trillingsnelheid van 16 mm/s treden bij beide soorten metselwerk zichtbare scheuren op met een wijdte tussen 0,3 en 1,0 mm ($\Psi = 1,7$ à $2,7$), dus zonder initiële schade. In dit geval is de schade groter in het geval van de stijve ondergrond. Een slappe ondergrond levert weliswaar ook scheuren, maar nog niet waarneembaar qua scheurwijdte ($\Psi = 0,7$ à 1 , scheurwijdte 0,03 à 0,07 mm).

De zijgevel van een boerderij blijkt gevoeliger voor de invloed van de trillingen dan de voorgevel. Figuur 11.16 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.16a: Parameter Ψ in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), zijgevel boerderij op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum



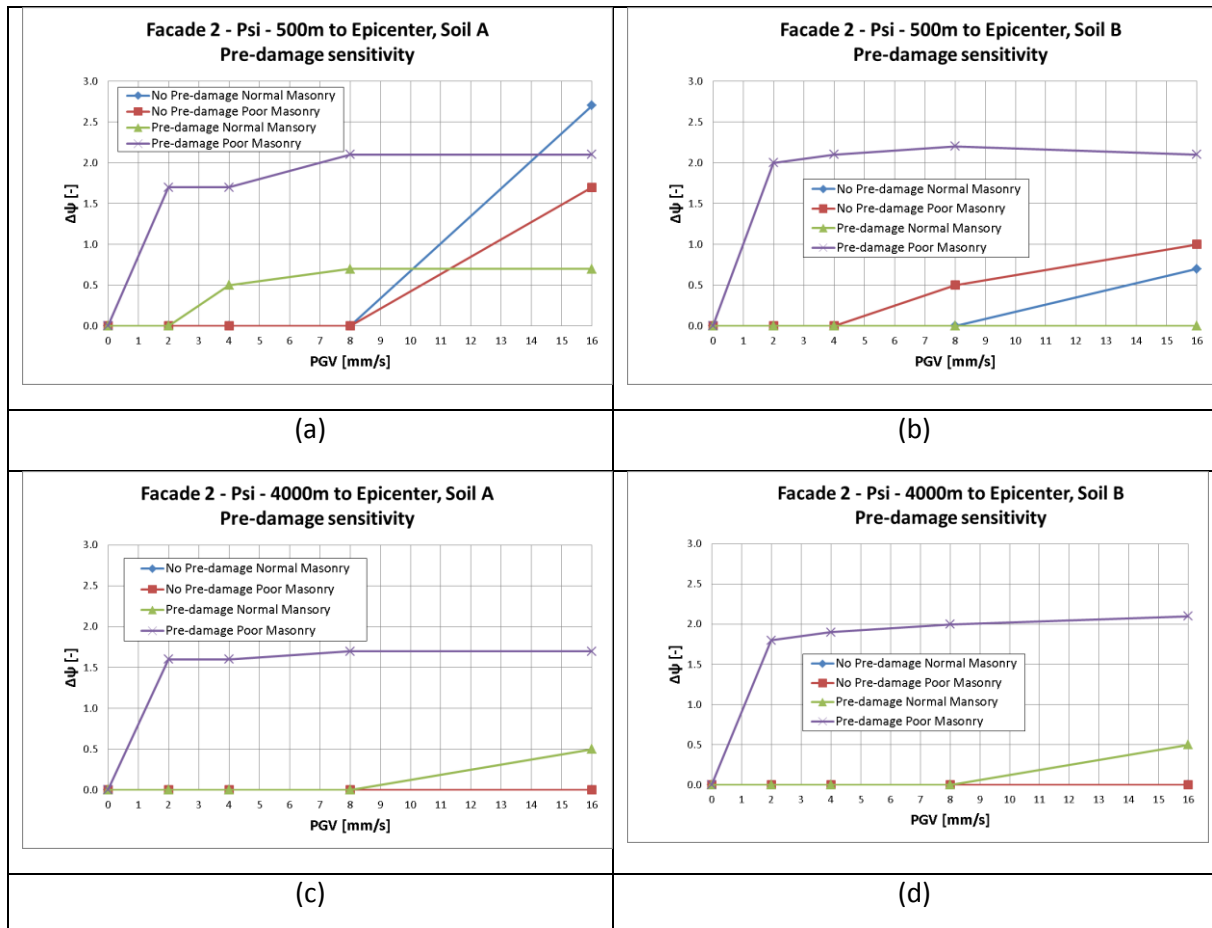
Figuur 11.16b: hoofdrek in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), zijgevel boerderij op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum

Met initiële spanningen door andere omstandigheden

Door het creëren van een stijfheidsverschil in de ondiepe ondergrond is een zettingsverschil gesimuleerd. Hierdoor ontstaan spanningen in het gevelvlak en ontstaan lichte, maar met het blote oog nog vrijwel onzichtbare scheuren met een breedte tot 0,017 mm en $\Psi = 0,6$. Uit de berekeningen blijkt dat bij metselwerk van gemiddelde sterkte deze initiële scheuren niet of nauwelijks uitbreiden bij een trillingssnelheid tot (orde) 8 mm/s.

Bij metselwerk met een lage sterkte treedt in alle gesimuleerde omstandigheden doorgroei van de scheur op tot een breedte boven 0,2 mm of Ψ groter dan 1 vanaf een trillingssnelheid van 2 mm/s. De

resterende scheurwijdte is betrekkelijk ongevoelig voor de sterkte van de trilling, en bedraagt 0,8 à 1,2 mm ($\Psi = 1,9$ à 2,3). Deze resultaten wijzen in de richting dat het opgelegde zettingsverschil de uiteindelijke scheurwijdte bepaalt, en niet de sterkte van de beving. Figuur 11.17 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.17 : Ontwikkeling van de parameter Ψ zonder en met initiële spanningen voor de situaties: a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.

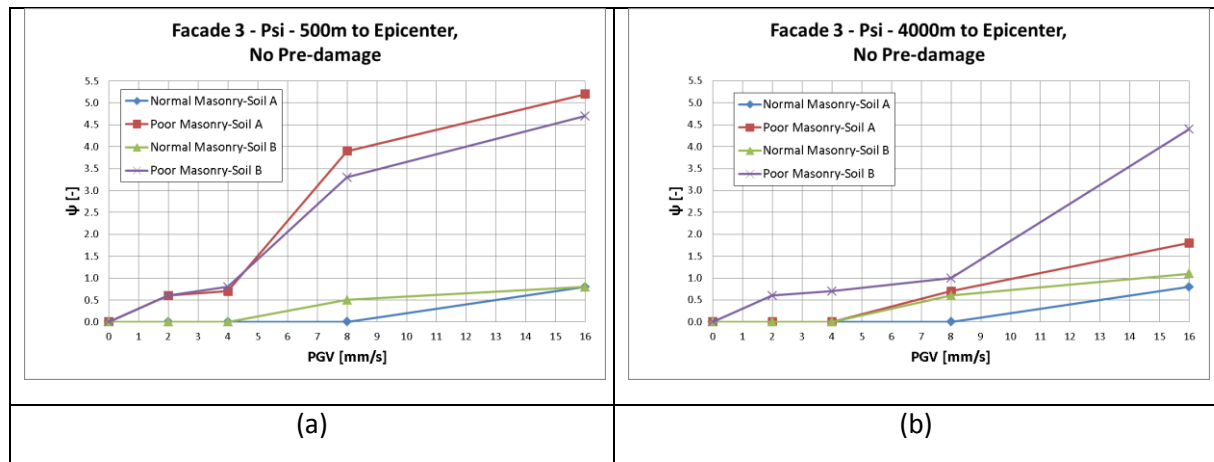
11.8.4 Vrijstaande woning, voorgevel

Eigen gewicht, geen aanvullende initiële spanningen door andere omstandigheden

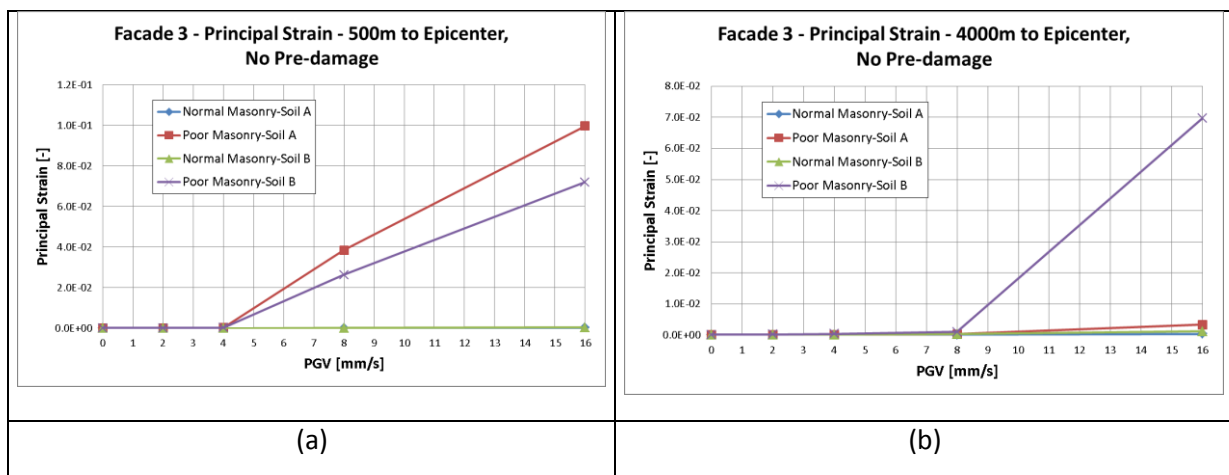
De uitgevoerde simulatieberekeningen aan de voorgevel van de vrijstaande woning geven te dele een vergelijkbaar beeld als bij de voorgevel van de boerderij. In de situatie met alleen eigen gewicht en rustende belasting op de gevel en zonder initiële schade in de voorgevel leidt de trilling met trillingssnelheid tot 4 mm/s bij metselwerk met geringe sterkte niet tot scheuren in het zichtbare bereik. De blijvende scheurwijdten zijn in alle andere berekende situaties kleiner dan 0,02 mm. De parameter Ψ ligt onder 0,6. Bij sterkere trillingen dan 4 mm/s treden aanzienlijke scheuren in de voorgevel op.

Bij metselwerk met gemiddelde sterkte leiden de trillingen tot 16 mm/s niet tot met het blote oog waarneembare scheuren. De blijvende scheurwijdten zijn in alle andere berekende situaties kleiner dan 0,04 mm. De parameter Ψ ligt onder 0,8

De situatie dicht bij het epicentrum levert bij metselwerk met geringe sterkte de grootste schade op. Dit wordt veroorzaakt door de relatief grote verticale component op korte afstand tot het epicentrum. Figuur 11.18 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.18a: Parameter Ψ in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), voorgevel vrijstaande woning op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum



Figuur 11.18b: hoofdrek in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), voorgevel vrijstaande woning op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum

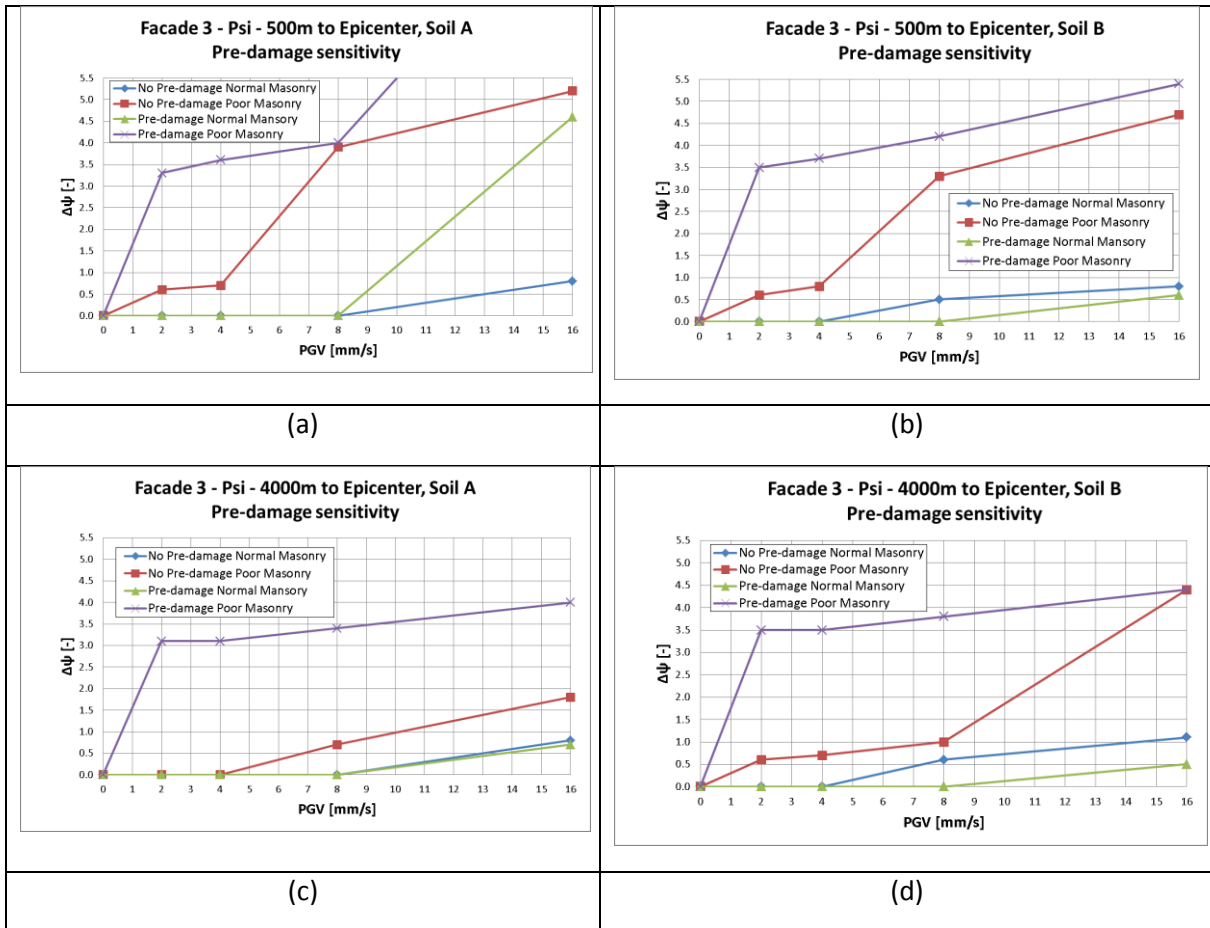
Met initiële spanningen door andere omstandigheden

Door het creëren van een stijfheidsverschil in de ondiepe ondergrond is een zettingsverschil gesimuleerd. Hierdoor ontstaan spanningen in het gevelvlak en ontstaan lichte, maar met het blote oog nog vrijwel onzichtbare scheuren met een breedte tot 0,015 mm en $\Psi = 0,6$. Uit de berekeningen blijkt dat bij metselwerk van gemiddelde sterkte deze initiële scheuren niet of nauwelijks uitbreiden bij een trillingssterkte tot 8 mm/s.

Bij metselwerk met een lage sterkte treedt in alle gesimuleerde omstandigheden doorgroei van de scheur op tot een breedte boven 2 à 3 mm of Ψ groter dan 3 al vanaf een trillingsnelheid van 2 mm/s. De resterende scheurbreedte blijkt ongevoelig voor de sterkte van de trilling. Ook deze resultaten wijzen in de richting dat het opgelegde zettingsverschil de uiteindelijke scheurbreedte bepaalt, en niet

de sterkte van de beving. De beving 'triggert' de scheurgroei wel, anders zou de scheurgroei niet opgetreden zijn.

Figuur 11.19 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.19: Ontwikkeling van de parameter Ψ zonder en met initiële spanningen voor de situaties: a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.

11.8.5 Vrijstaande woning, zijgevel

Eigen gewicht, geen aanvullende initiële spanningen door andere omstandigheden

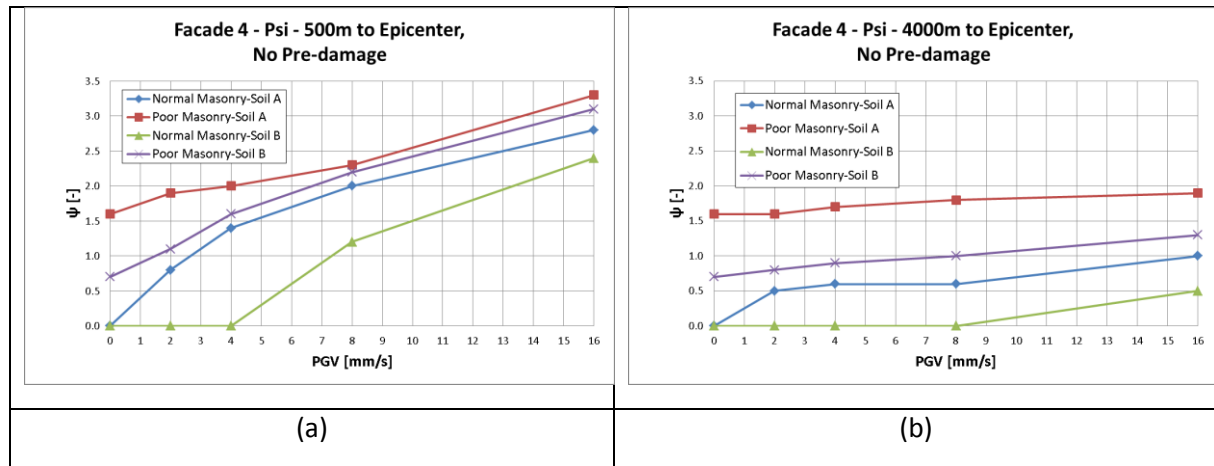
De uitgevoerde simulatieberekeningen aan de zijgevel van de vrijstaande woning geven een ongunstiger beeld dan de voorgevel.

In de situatie met alleen eigen gewicht en rustende belasting op de gevel en zonder initiële schade in de voorgevel leidt een trillingsnelheid tot 16 mm/s bij metselwerk met gemiddelde sterkte niet tot met het blote oog waarneembare scheuren, behalve op korte afstand tot het epicentrum. Daar ligt deze grens op 4 mm/s. De blijvende scheurwijdten zijn in alle andere berekende situaties kleiner dan 0,1 mm. De parameter Ψ ligt onder 1.

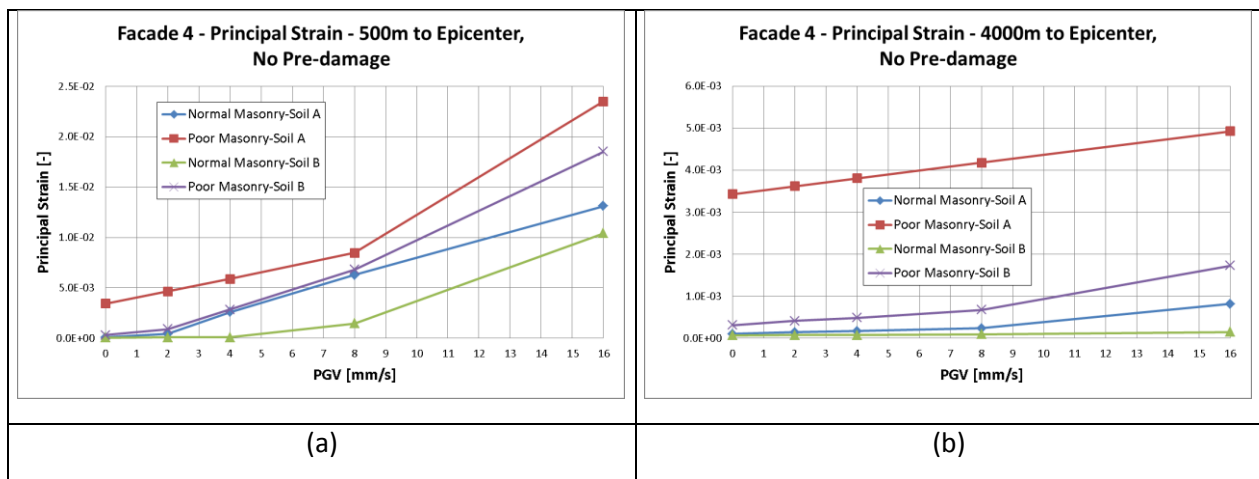
Bij metselwerk met geringe sterkte leiden trillingen al vanaf 2 mm/s tot scheuren in het zichtbare bereik. De blijvende scheurwijdten zijn in alle situaties (dus ongeacht de sterkte van de beving) ongeveer 0,4 mm. De parameter Ψ ligt in de orde van 2.

De situatie dicht bij het epicentrum levert dus ook hier de grootste schade op. Dit wordt veroorzaakt door de relatief grote verticale component van de trilling in de simulatieberekeningen op korte afstand tot het epicentrum.

Figuur 11.20 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.20a: Parameter Ψ in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), zijgevel vrijstaande woning op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum



Figuur 11.20b: hoofdrek in de situatie zonder initiële schade voor twee soorten metselwerk en twee bodemomstandigheden (A en B), zijgevel vrijstaande woning op a) 500 m en b) 4000 m van het epicentrum

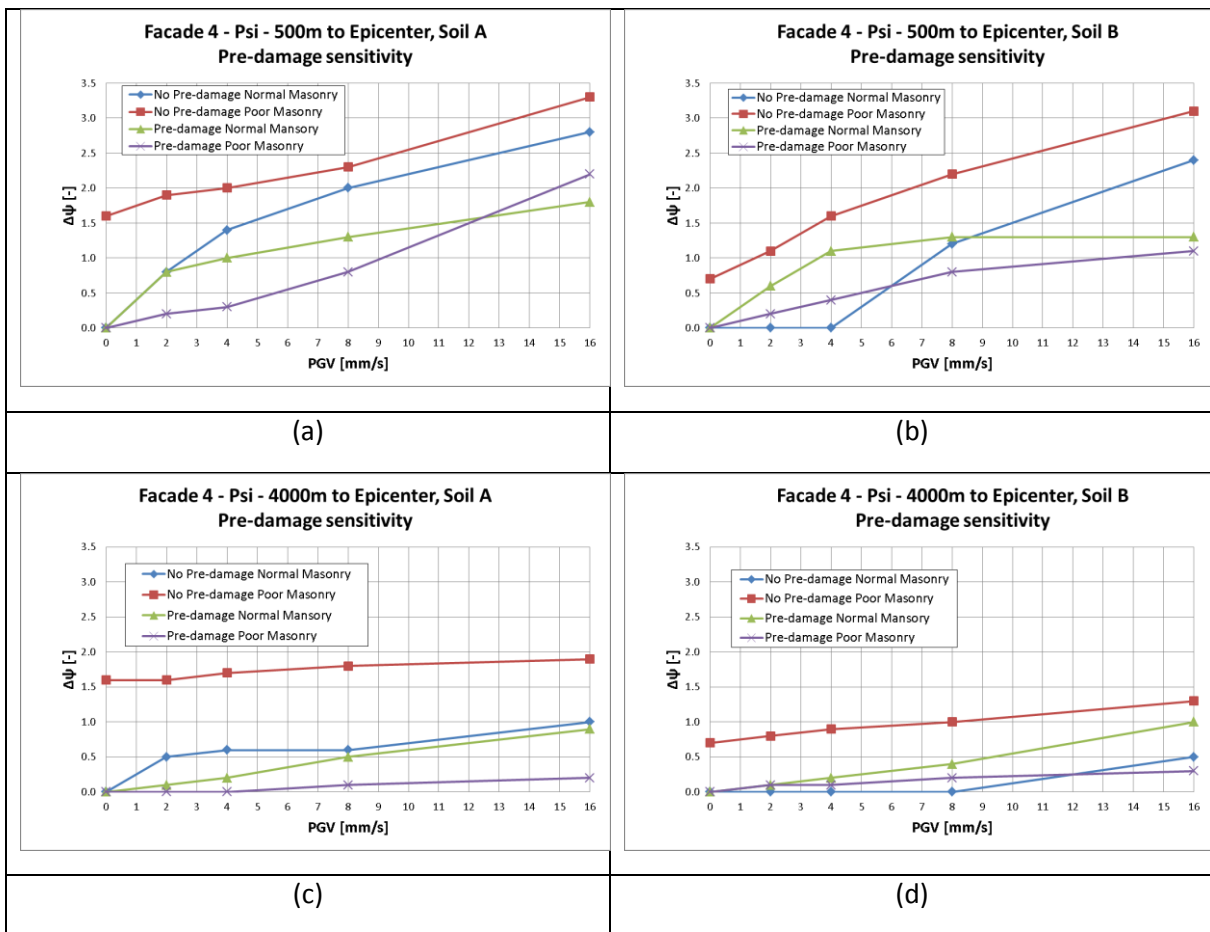
Met initiële spanningen door andere omstandigheden

Door het creëren van een stijfheidsverschil in de ondiepe ondergrond is een zettingsverschil gesimuleerd.

Bij metselwerk met lage sterkte ontstaan hierdoor spanningen in het gevelvlak en ontstaan lichte, maar met het blote oog juist zichtbare scheuren met een breedte tot 0,4 mm en $\Psi = 1,8$. Vervolgens treedt als gevolg van de trillingen een geringe toename van de blijvende scheurbreedte op, tot ca. 0,6 mm ($\Psi = 2,2$). De blijvende scheurbreedte neemt dus maar weinig toe.

Bij metselwerk met gemiddelde sterkte zijn de initiële scheuren kleiner (0,02 mm), evenals Ψ (0,6). Als gevolg van de trillingen neemt de blijvende scheurbreedte toe tot ongeveer 0,2 mm en Ψ tot 1,5. De blijvende scheurbreedte hangt nauwelijks samen met de sterkte van de trilling. Ook deze resultaten wijzen in de richting dat het opgelegde zettingsverschil de uiteindelijke scheurbreedte bepaalt, en niet de sterkte van de beving, maar de beving triggert de scheur wel.

Figuur 11.21 toont een grafische samenvatting van de toename van de schade (parameter Ψ) als functie van de sterkte van de trillingen.



Figuur 11.21: Ontwikkeling van de parameter Ψ zonder en met initiële spanningen voor de situaties: a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.

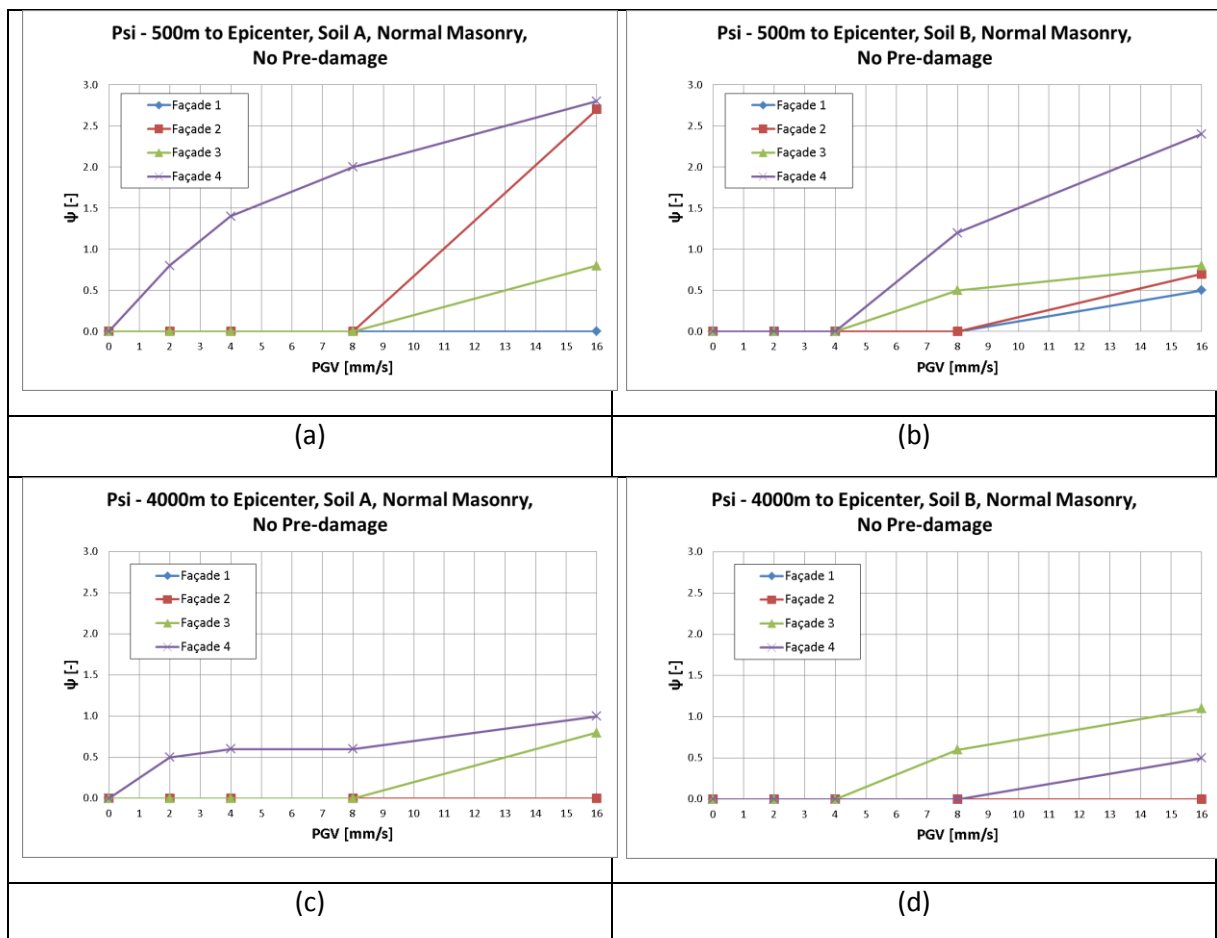
11.9 Bespreking van de simulatieresultaten

Bij de interpretatie van de berekeningsresultaten moet worden bedacht dat deze vooral hun waarde hebben bij het toetsen van de gevoeligheid van de uitkomsten voor diverse variaties, zoals de sterkte van de trilling, de sterkte van het metselwerk, de afstand tot het epicentrum, het type bodem etc.

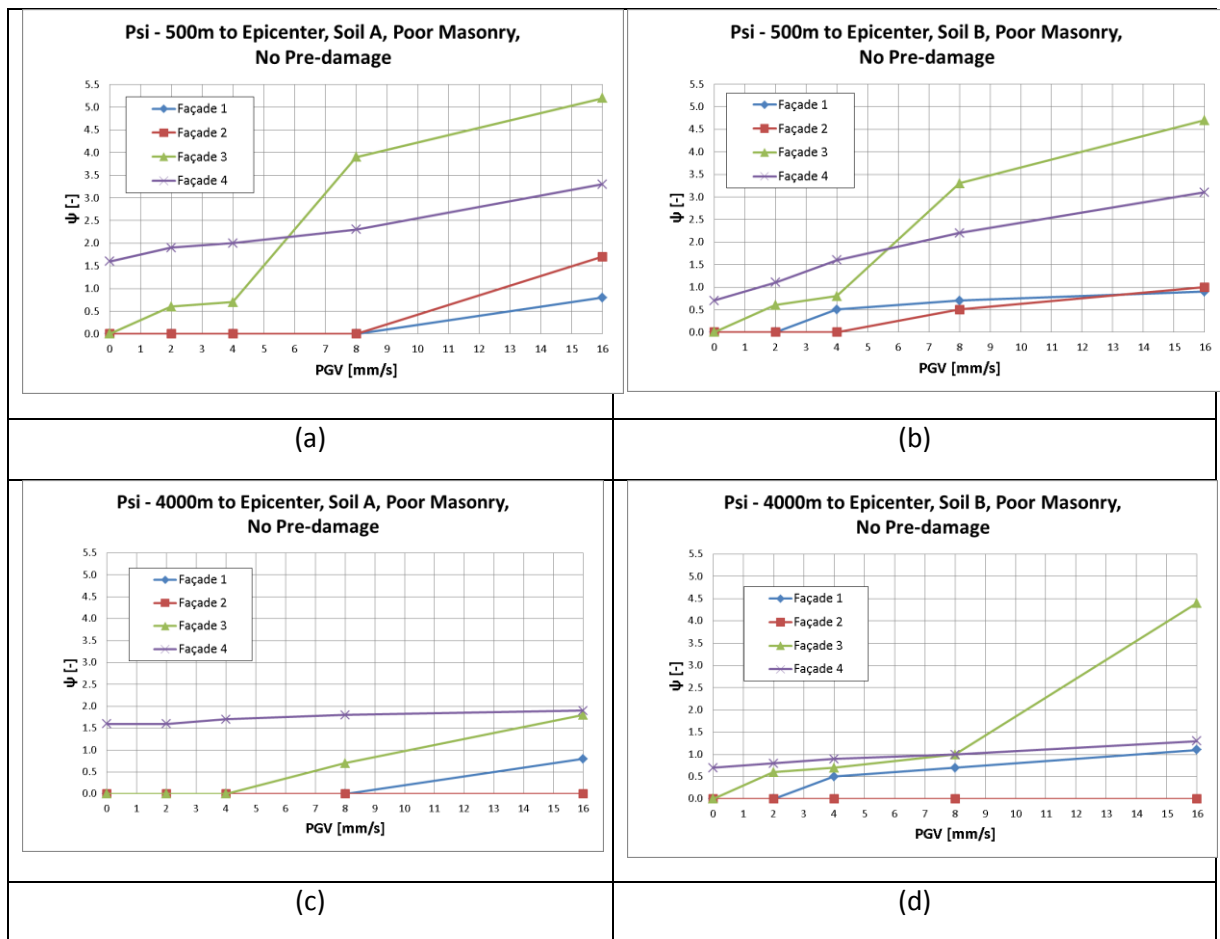
Uitspraken over de absolute waarde van de uitkomsten moet met enige voorzichtigheid gebeuren en zeker niet zonder andere ondersteunende omstandigheden.

Metselwerk zonder initiële spanningen door andere omstandigheden dan eigen gewicht

Het beeld van de berekeningsresultaten toont aan dat zonder initiële schade, metselwerk van gemiddelde sterkte in staat is om trillingen door bevingen met een trillingssnelheid tot 8 à 16 mm/s op te nemen, zonder daarbij schade te vertonen. Ook blijkt uit deze berekeningen dat metselwerk van geringe sterkte in staat is om trillingen met een sterkte in de orde van 4 mm/s zonder bijkomende schade op te nemen, althans indien het gevelveld niet aan andere belastingen of vervormingen is blootgesteld. Figuren 11.22 en 11.23 vatten deze bevingen grafisch samen.



Figuur 11.22: Ontwikkeling van de schadeparameter Ψ voor situaties zonder initiële spanningen. Vergelijking van de beschouwde gevelvelden in metselwerk met gemiddelde sterkte voor de situaties a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.



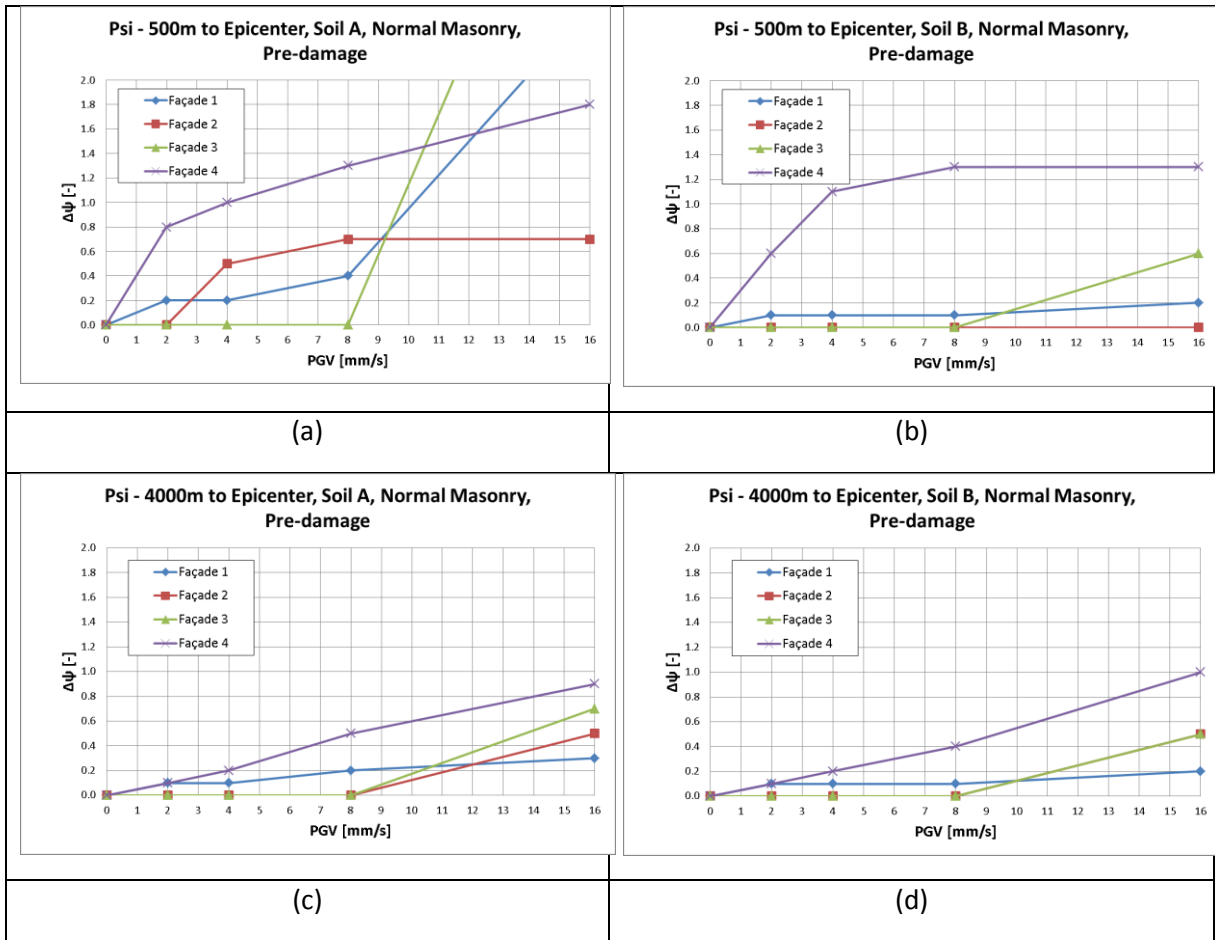
Figuur 11.23: Ontwikkeling van de schadeparameter Ψ voor situaties zonder initiële spanningen. Vergelijking van de beschouwde gevelvelden in metselwerk van geringe sterkte voor de situaties a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.

Metselwerk met initiële spanningen (bijv. door zettingen)

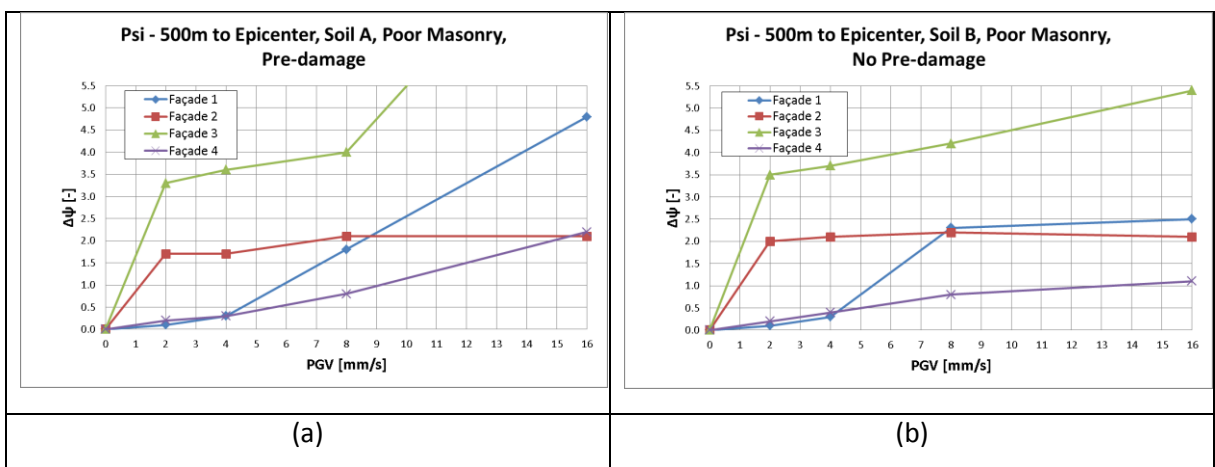
Een mate van voorbelasting en initiële schade blijken zeer belangrijke omstandigheden te zijn voor het ontstaan van zichtbare scheuren door een trilling. Die schade kan al zichtbaar worden bij een geringe trillingssnelheid. In de hier besproken berekeningen treedt dit fenomeen bij de voorgevel van de boerderij op bij een trillingssnelheid van 8 mm/s. Bij de zijgevel treedt het verschijnsel van scheurgroei al bij een lagere trillingssnelheid op (al vanaf 2 à 4 mm/s).

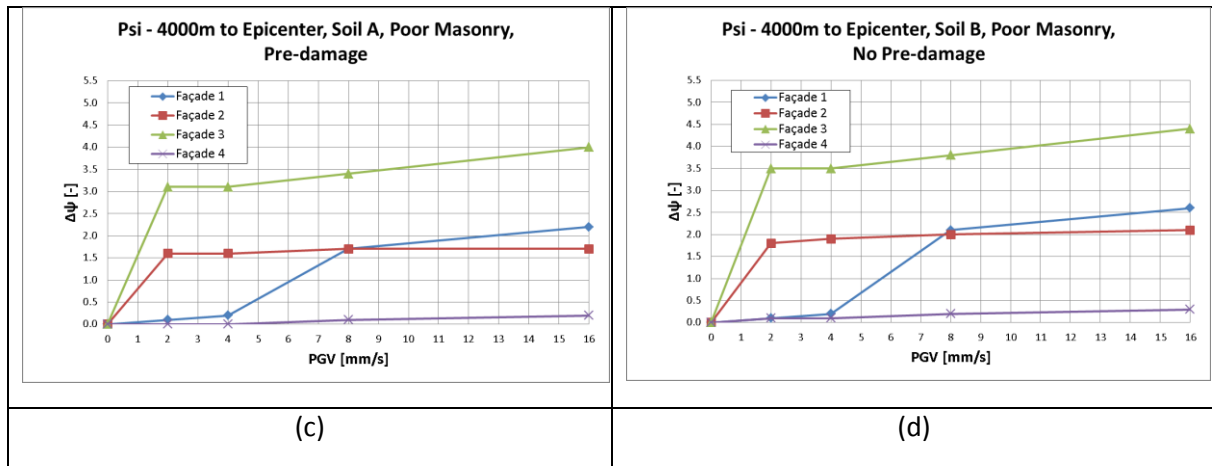
Het achterliggende mechanisme (in dit geval een verschilzetting) is de drijvende kracht voor de mate van de schade, de trilling als gevolg van de beving is de directe aanleiding tot het ontstaan. De trilling werkt als trigger voor het ontstaan van de schade, dat wil zeggen lokt de vorming van een grotere en zichtbare scheur uit. De berekeningen ondersteunen dit fenomeen.

Maar in alle gevallen waarin deze triggerwerking aan de orde is, blijkt dat de blijvende scheurwijdte in een situatie van een initiële schade nauwelijks afhankelijk is van de sterkte van de trilling, wel van het feit dat er een trilling is. De trilling stoot de scheurgroei aan, maar bepaalt niet de uiteindelijke scheurwijdte, die is primair te relateren aan de initiële belasting.



Figuur 11.24: Ontwikkeling van de schadeparameter Ψ voor situaties met initiële spanningen. Vergelijking van de beschouwde gevelvelden in metselwerk met gemiddelde sterkte voor de situaties a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.





Figuur 11.25: Ontwikkeling van de schadeparameter Ψ voor situaties met initiële spanningen. Vergelijking van de beschouwde gevelvelden in metselwerk van geringe sterkte voor de situaties a) Bodem type A, 500m vanaf epicentrum, b) Bodem type B, 500 m vanaf epicentrum, c) Bodemtype A, 4000 m vanaf epicentrum, d) Bodemtype B, 4000 m vanaf epicentrum.

Invloed afstand tot het epicentrum

De situatie op korte afstand van het epicentrum kenmerkt zich in de berekeningen door een grotere verticale trillingssnelheid dan de horizontale trillingssnelheid. Alle berekeningen zijn geschaald op de grootte van de horizontale trillingssnelheid. Op korte afstand tot het epicentrum (0,5 km) treden bij vergelijkbare trillingssnelheid grotere scheuren op dan op grote afstand van het epicentrum (4 km). Dit lijkt te wijzen op een invloed van de grotere verticale trillingssnelheid die in deze berekeningen optreedt op kortere afstand tot het epicentrum. In praktijksituaties zijn de verticale en horizontale trillingssnelheid doorgaans niet zo sterk verschillend, noch op grote noch op kleine afstand van het epicentrum. Daardoor mag verwacht worden dat de resultaten van de huidige berekeningen op grote stand tot het epicentrum (4 km) het meest realistische beeld geven.

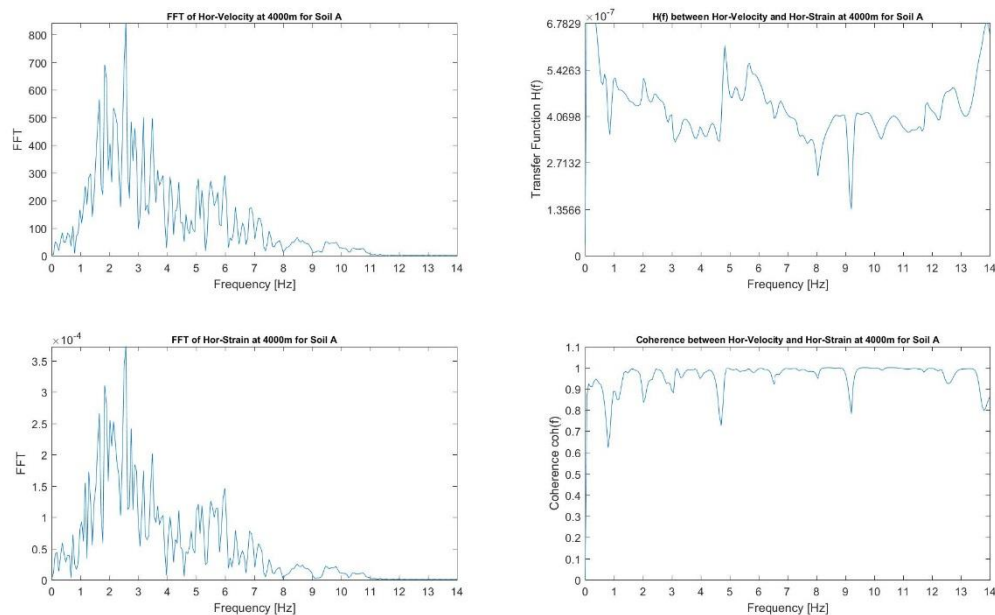
Invloed bodemomstandigheden

Bij de berekeningen zijn twee bodemomstandigheden beschouwd. Op korte afstand tot het epicentrum lijkt een stijve bodem eerder (dat wil zeggen bij lagere trillingssnelheid) aanleiding te geven tot het ontstaan van scheuren. Op grotere afstanden tot het epicentrum lijkt het echter de slappe bodem te zijn die grotere scheuren of reeds bij lagere trillingssnelheid scheuren doet ontstaan. De trends zijn overigens niet prominent en minder helder dan bij de andere parameters.

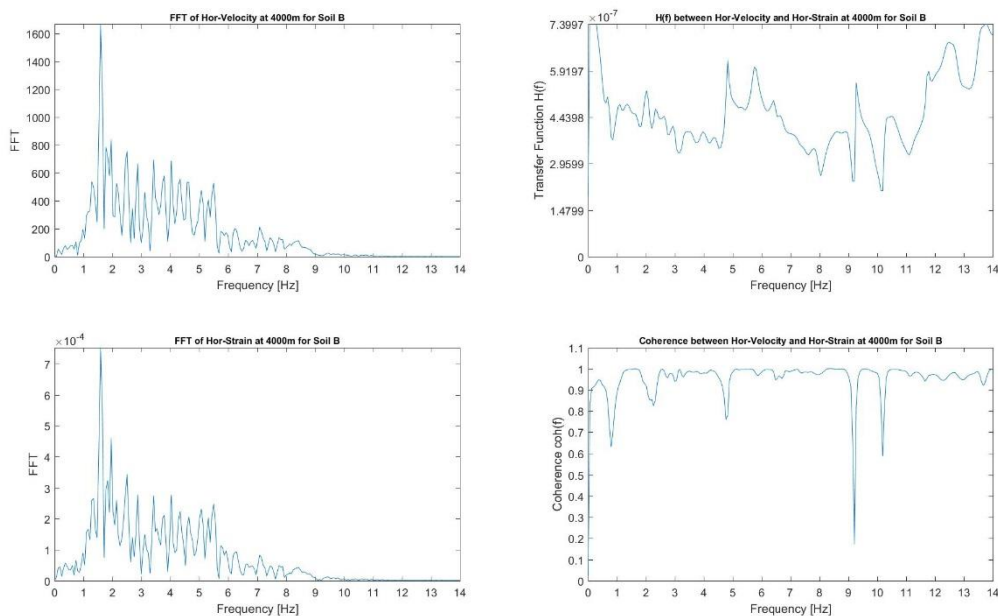
11.10 Onderzoek naar de relatie tussen trillingssnelheid en bodemrek

In de hiervoor gepresenteerde simulatieberekeningen is gebleken dat veel van de scheuren in metselwerk als gevolg van de trillingen een verticale oriëntatie hebben. Dat duidt er op dat de horizontale rekken of de buigrekken in de gevel een belangrijke parameter zijn bij het overschrijden van de treksterkte van het metselwerk. Om die reden is onderzocht wat de relatie is tussen de horizontale trillingssnelheid aan het oppervlak en de horizontale rekken en krommingen die zich tijdens het passeren van de spanningsgolven in de bodem optreden. Hiertoe zijn overdrachtsfuncties

berekend aan de hand van simulaties met het diepe bodemmodel voor beide ondergrondsituaties (bodem type A en B). De figuren 11.26 en 11.27 tonen de resultaten.



Figuur 11.26: Spectra van de trillingsnelheid en bodemrek op 4000 m van het epicentrum bij bodemtype A (figuren linkerzijde); Overdrachtsfunctie tussen bodemrek en trillingsnelheid en coherentie (rechterzijde)



Figuur 11.27: Spectra van de trillingsnelheid en bodemrek op 4000 m van het epicentrum bij bodemtype B (figuren linkerzijde); Overdrachtsfunctie tussen bodemrek en trillingsnelheid en coherentie (rechterzijde)

Uit figuren 11.26 en 11.27 blijkt dat de coherentie ongeveer 1 bedraagt en de betrouwbaarheid van de berekende overdrachtsverhouding in het gepresenteerde laagfrequente frequentie-interval

derhalve goed is. De overdrachtsverhouding bedraagt bij bodemtype A ongeveer $4,0 \cdot 10^{-7}$ s/mm (gemiddeld over het gepresenteerde frequentie interval) en bij bodemtype B ongeveer $4,5 \cdot 10^{-7}$ s/mm. Het verschil tussen beide bodemtypen is dus beperkt. De maximale overdrachtsverhoudingen liggen in beide gevallen steeds onder $7 \cdot 10^{-7}$ s/mm. Verdere analyse van de resultaten geeft aan dat het hier vrijwel uitsluitend extensierekken in de bodem betreft en dat het aandeel rek door kromming van de bodem zeer gering is. Op basis van deze resultaten mag verwacht worden dat een trilling met een topwaarde van 1 mm/s een topwaarde van de horizontale bodemrek veroorzaakt van ten hoogste $0,7 \cdot 10^{-6}$. Deze analyse geeft aan dat de trillingssnelheid een goede indicator is voor de optredende rekken in de bodem bij de laagfrequente trillingen bij het passeren van de spanningsgolven van een beving.

11.11 Samenvatting, conclusies en aanbeveling

Met het uitvoeren van de simulatieberekeningen naar de schadegevoeligheid van gebouwen als gevolg van bodemtrillingen, is inzicht verkregen in de gevoeligheid van metselwerk voor de initiatie van de eerste scheuren in metselwerk. Ook is inzicht verkregen in de uitbreiding van reeds bestaande initiële schade of spanningssituaties onder invloed van bodemtrillingen.

Overwegingen

- De berekeningen hebben het karakter van een gevoeligheidsanalyse en zijn uitgevoerd aan een beperkte set gebouw (gevel) modellen en bodemsituaties. Het betreft een beperkt aantal situaties.
- De toegepaste modellering van de bodemtrillingen is zo compleet mogelijk, binnen de context van de beschikbare rekentechnieken van de eindige-elementenmethode. Gebruik is gemaakt van een drietraps-model om de bewegingen van de ondergrond en ondiepe bodem zo goed mogelijk door te geven aan het gebouw.
- De toegepaste modellering van het metselwerk is zo realistisch en compleet mogelijk. Niet-lineaire effecten van scheur-initiatie, scheurvoortplanting en scheurdoorslag zijn meegenomen.
- De onderzochte gevelvelden hebben een realistische geometrie van buitengevels van oudere panden, te weten boerderijen van voor 1900 en vrijstaande woningen uit de periode 1900-1940.
- De sterkte van het metselwerk is gevarieerd tussen gemiddelde sterkte en geringe sterkte, waarbij de klasse geringe sterkte blijkens eerder uitgevoerd laboratoriumonderzoek representatief is voor de panden van voor 1940.
- De onderzochte twee bodemsituaties omvatten redelijkerwijs het brede spectrum van stijfheden van de bodem die zich in de Groningse situatie voordoen.

Conclusies

- Uit de berekeningsresultaten is duidelijk geworden dat trillingen door bevingen met trillingssterkten tot 8 à 16 mm/s in de regel niet zelfstandig (dat wil zeggen zonder bestaande initiële schade) zullen leiden tot schade in de vorm van zichtbare scheuren in gevels uitgevoerd in metselwerk.
- Lage trillingssterkten (in de uitgevoerde berekeningen al in de orde 2-4 mm/s, afhankelijk van onder meer het type gevel) kunnen invloed hebben op het ontstaan of verder ontwikkelen van schade in gevels uitgevoerd in metselwerk, maar uitsluitend indien er tegelijkertijd al andere omstandigheden zijn die zorgen voor een verhoogde spanningssituatie in de gevel. De simulatieberekeningen bevestigen de werking van trillingen als trigger voor het ontstaan van schade, in combinatie met andere oorzaken.

- De simulatieberekeningen bevestigen dat in scenario's met oorzaken voor schade bevingen een rol kunnen spelen, ook bij relatief lage trillingssterkten. Een oorzakelijk verband tussen schade en trillingen door bevingen is dus bij heel lage trillingssterkten (in de orde 2-4 mm/s, afhankelijk van onder meer het type gevel) in zekere mate plausibel. In dit opzicht sluiten de resultaten van de simulatie berekeningen aan op praktijkinzichten, die in hoofdstuk 10 zijn besproken.

Voorbehoud en aanbeveling

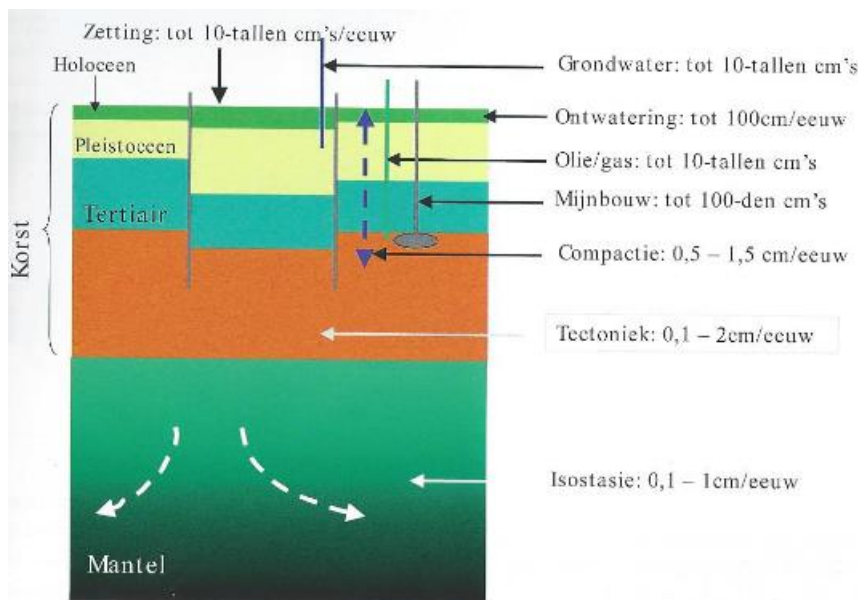
- In nationale en internationale literatuur zijn niet eerder berekeningen aangetroffen met extensie en kromming van de bodem, komende vanuit een trilling in de diepe lagen, inclusief doorgave via de ondiepe bodem aan een gebouw en inclusief scheurvorming en scheurvoortplanting in het gebouw, gericht op schade bij lichte bevingen. Om die reden moet de nodige voorzichtigheid betracht worden met de huidige, eerste berekeningen van dien aard. Nadere validatie van bijvoorbeeld het diepe bodemmodel en ondiepe bodemmodel ten aanzien van werkelijk gemeten extensie en krommingen, die in zo belangrijke mate de schade aan het gebouw veroorzaken, is gewenst. Ook dient het effect van interfacegedrag tussen ondiepe bodem en gebouw/fundering nader te worden bestudeerd, alsmede nadere gevoeligheids- en parameterstudies. Hierbij valt te denken aan de geometrie van de gevels, de drie dimensionale geometrie van het gebouw, meer variatie in gebouwtypen, materiaal, belastingen en trillingssterkten. Ook is kalibratie aan lab-experimenten en veldmetingen gewenst.

12 Effecten van langzame bodembewegingen

12.1 Soorten bodembewegingen: diepe bodemdaling en maaiveldddaling

Bodembewegingen aan het aardoppervlak zijn in de regel een combinatie van verschillende oorzaken. In [12.26] worden die oorzaken meer uitgebreid beschouwd. Genoemd worden autonome of natuurlijke, niet door de mens geïnitieerde oorzaken, zoals tektonie, isostatie en compactie. Bij tektonie bewegen aardmassa's ten opzichte van de diepere delen van de aarde. In geval van isostatie treden reacties van de aardkorst op door belastingsverschillen, zoals door ijsbedekking of het verdwijnen daarvan, door sedimentafzetting of veranderingen van het zeespiegelniveau. In geval van compactie of inklinking van de bodem, ontstaat zakking door verdichting van het sediment van zee en rivieren, als gevolg van het eigen gewicht, kruip en andere natuurlijke processen. Deze natuurlijke oorzaken voor bodembeweging leiden volgens [12.26] tot een bodemdaling van enkele centimeters per eeuw. In [12.26] worden de effecten op de bodembeweging door menselijk ingrijpen echter op een orde groter ingeschat. Onder menselijke ingrepen worden daarbij verstaan ontwatering, bebouwing en mijnbouw, waaronder ook gaswinning.

In figuur 12.1 is indicatief een overzicht gegeven van de bijdragen van de verschillende oorzaken voor het optreden van bodemdaling.



Figuur 12.1: Overzicht van de bijdragen aan absolute bodemdaling door isostasie, tektonie, compactie en menselijk ingrijpen, ontleend aan [12.26].

Uit het voorgaande blijkt dat wanneer er geen sprake is van menselijk ingrijpen er nog steeds bodembewegingen kunnen zijn. Maar wel in een mate die een orde (factor 10) geringer is.

We maken in het navolgende onderscheid tussen de bodembewegingen met een oorzaak in de diepe ondergrond ('diepe bodemdaling door mijnbouw') en bodembewegingen met een oorzaak in de ondiepe ondergrond ('maaivelddaling'). Diepe bodemdaling leidt meestal direct tot maaivelddaling, maar daarnaast soms ook nog indirect, als gevolg van aanpassingen in de waterhuishouding van een gebied. De term maaivelddaling moet overigens niet al te letterlijk worden opgevat. Voor gebouwen is vaak niet de daling van het maaiveld van belang, maar die van het niveau daar vlak onder, waarop de funderingen zijn aangelegd. Dat kan zijn het niveau beneden het aanlegniveau van een fundering op staal, maar, in geval van een paalfundering, ook het niveau beneden het paalpuntniveau.

12.1.1 Maaivelddaling

Daling van het maaiveld of van gebouwen die op of nabij het maaiveld zijn gefundeerd, kan optreden door verschillende mechanismen. Als het gaat over zakkings als gevolg van het gewicht van gebouwen wordt vaak gesproken over zettingen. Maaivelddaling als gevolg van diepe bodemdaling speelt zich af binnen grote oppervlakken, met een breedte van ten minste vele kilometers. Maaivelddaling als gevolg van oorzaken in de ondiepe ondergrond kan heel lokaal optreden, bijvoorbeeld in het geval van de aanleg van een weg, door oxidatie van plaatselijk aanwezig veen, maar ook over grote gebieden, zoals het geval kan zijn wanneer er een spanningsbemaling wordt uitgevoerd.

Onderstaand zijn de belangrijkste mechanismen die tot zetting aanleiding geven kort besproken.

Zettingen door belasting

De bovenbelasting kan worden veroorzaakt door bijvoorbeeld een toegenomen verticale druk vanuit de fundering van een gebouw. Een belasting op de grond vertaalt zich direct in een toename van de grondspanning. In slecht waterdoorlatende lagen leidt dat aanvankelijk tot een even grote toename van de waterspanning, maar na verloop van tijd consolideert de grond en wordt de korrelspanning verhoogd met de bovenbelasting. Alleen korrelspanningsverhogingen leiden tot een samendrukking van de grond en dus tot zettingen. Samendrukking is in slecht waterdoorlatende lagen dus een tijdsafhankelijk en grotendeels onomkeerbaar proces. In dikke kleilagen, zoals de potkleiafzettingen in Groningen, kan het consolidatieproces 10-tallen jaren duren en is de samendrukking praktisch gesproken een eeuwig durend proces. De zettingssnelheid neemt daarbij echter wel af.

Ook bij een dalende grondwaterstand neemt de korrelspanning in de bodem onder de oorspronkelijke grondwaterstand toe. In slecht waterdoorlatende lagen kan door capillaire spanningen de korrelspanning ook boven de oorspronkelijke grondwaterstand toenemen en tot krimp leiden; ook dat leidt tot een zetting.

De mate waarin grond samendrukt als gevolg van korrelspanningsverhogingen is afhankelijk van de samendrukbaarheid van de bodem.

Verschillen in een bovenbelasting op de ondergrond leiden tot verschillen in samendrukking en dus tot verschillen in zetting. Een fundering van een pand waar onder bepaalde gevels een hogere druk heerst dan onder andere gevels of delen van gevels, zal daardoor een verschillende mate van zetting kunnen ondergaan.

Een veenachtige bodem is sterk samendrukbaar. Ook klei is dat, maar aanzienlijk minder dan veen. Zand is weinig samendrukbaar.

Zettingen door overschrijden draagkracht

Een bovenbelasting leidt dus altijd tot zettingen. Naar mate de belasting de draagkracht van de fundering of grond nadert neemt de vervormingssnelheid toe. Als een belasting zo groot wordt dat de draagkracht van de grond wordt overschreden treedt bezwijken op. Dat gaat meestal gepaard met snel optredende en grote verplaatsingen. In tegenstelling tot de samendrukking van grond (waarvan de snelheid in de tijd steeds verder afneemt) is bezwijken een doorgaand proces, tot de belastingen zodanig zijn herverdeeld dat opnieuw een evenwicht is ontstaan.

Door een verhoging van de grondwaterstand zal de effectieve korrelspanning in het bodemmateriaal afnemen, waardoor ook de draagkracht van een fundering afneemt. Meestal is er een ruime marge tussen de belasting op een fundering en de draagkracht ervan. Als de draagkracht van een fundering door een grondwaterstandsverhoging afneemt en de marge t.o.v. de belasting op de fundering, is het denkbaar dat de zakkingsnelheid van de fundering (als gevolg van kruip in de grond) toeneemt.

In referenties [12.18 – 12.20] is verslag gedaan van onderzoek naar de zakkings van funderingen als gevolg van grondwaterstandsverhogingen, specifiek gericht op de afname van de draagkracht als gevolg van de grondwaterstandsverhoging. [12.20, 12.21] bevat een studie naar een praktijkgeval in Groningen en [12.22] geeft de stand van zaken in 2012 weer m.b.t. dat onderwerp.

Zettingen door dynamische verschijnselen

Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 10.

Zettingen door wijzigingen in het volume van het bodemmateriaal

Veenoxidatie

In een veenbodem kan maaiveldaling plaatsvinden door veenoxidatie. Veenoxidatie is een onomkeerbaar proces dat leidt tot blijvende krimp van het veenmateriaal. Dit proces treedt op wanneer er zuurstof bij het veen komt en het veen oxideert. Dit gebeurt voornamelijk 's zomers bij lagere grondwaterstanden en hogere temperaturen. Veenoxidatie wordt versterkt als de grondwaterstand zakt, waardoor er meer zuurstof bij het veen kan komen. Veenoxidatie is mogelijk wanneer het veen droog komt te staan. Dit gebeurt vooral als de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) lager ligt dan de bovenzijde van de veenlaag.

Uitdroging van klei

Dit kan optreden in het bovenste deel van een kleilaag, dat aan het maaiveld grenst. Bijvoorbeeld door verdamping (door vegetatie) of door blootstelling aan de lucht. Uitdroging van klei treedt vaak op in drooggevallen gebieden door ontpoldering of ontwatering.

Zwelling van klei

Bepaalde kleisoorten kunnen bij verhoging van het vochtgehalte ook een belangrijke volumetoename vertonen en omgekeerd een sterke krimp bij verlaging van het vochtgehalte.

Zettingen door wijziging van de mechanische eigenschappen

Het vochtgehalte in de bodem kan de mechanische eigenschappen (zoals elasticiteitsmodulus, plasticiteit, sterkte, etc) beïnvloeden. Dit kan met name het geval zijn bij klei. Een afname van de elasticiteitsmodulus door een hoger vochtgehalte kan leiden tot verdere samendrukking van het bodemmateriaal.

Ongelijkmatige zettingen door inhomogene bodemopbouw

Daar waar de bodemopbouw plaatselijk afwijkt, bijvoorbeeld door een andere samenstelling of met grotere of kleinere laagdikten, kunnen de bovenstaande mechanismen aanleiding geven tot ongelijkmatige zettingen. Het zettingseffect is dan op de ene plaats sterker dan op de andere. Afhankelijk van de ontstaansgeschiedenis van de bodem kunnen, met name in fluviale omstandigheden en afzettingsgebieden, verschillen zijn ontstaan in de bodemopbouw over afstanden in de orde van enkele meters, maar in mariene omstandigheden over tientallen meters.

Zettingen door hydrologische effecten

Aanpassingen van de oppervlaktewaterpeilen en aanpassingen van de grondwaterstanden (door bijvoorbeeld verbeterde drainage) beïnvloeden de spanningen in de bodem en/of de eigenschappen van het bodemmateriaal. Wijzigingen in grondwaterstand kunnen aanleiding gegeven tot:

- Zetting door verhoging van de korrelspanning (bij grondwaterpeildaling)
- Afhankelijk van het spanningsniveau zetting of zwel door wijziging mechanische eigenschappen (stijfheid en plasticiteit) bij grondwaterstandstijging
- Vermindering draagkracht van de bodem door verlaging van de korrelspanning (bij grondwaterpeilstijging)
- Volumekrimp van het bodemmateriaal (veenoxidatie en uitdroging/krimp van klei) bij grondwaterstanddaling

De hydrologische omstandigheden hebben invloed op meerdere mechanismen die tot vervormingen (meestal zettingen) aanleiding kunnen geven. Het is dus van groot belang om naast de opbouw van de bodem en de eigenschappen van het bodemmateriaal, ook inzicht te hebben in de geohydrologische situatie van een gebied.

12.1.2 Diepe bodemdaling

Mijnbouwactiviteiten kunnen diepe bodemdaling veroorzaken. Zo veroorzaakt gaswinning bodemdaling als gevolg van drukverlaging in het gesteente, waar aardgas wordt gewonnen, op grote diepte. Gasopslag in lege gasvelden kan door variaties in de druk van het gesteente die ontstaan bij het opslaan of onttrekken van gas, zowel bodemstijging als bodemdaling veroorzaken.

Ook zoutwinning kan aanleiding geven tot diepe bodemdaling. Nabij Veendam produceert Nedmag sinds 1972 magnesiumzouten. De zouten worden door oplosmijnbouw gewonnen, wat inhoudt dat er water onder hoge druk in de diepe zoutlagen wordt geïnjecteerd, die zich op een diepte van ongeveer 1,5 tot 1,8 km onder het maaiveld bevinden. Als gevolg hiervan lossen de zouten op tot een pekkel met hoge zoutconcentratie (voornamelijk magnesium-chloridezouten) en ontstaan cavernes. Sinds 1993 wordt de zogenaamde 'squeeze methode' toegepast. Deze methode komt erop neer dat men de magnesiumzouten in vaste vorm de gelegenheid geeft naar de cavernes toe te stromen. De vloeïende, laag-viskeuze, magnesiumzouten worden door het gewicht van de bovengrond naar de cavernes toe geperst, zoals men een tube tandpasta uitperst. De pekkel die aldus naar de caverne is gestroomd lost daar op en kan voor zijn productie benut worden. Omdat de magnesium-zoutlagen dunner worden en de druk in de caverne relatief laag is, daalt de bovengrond als gevolg van zwaartekracht. De daling van de bovengrond is het grootst boven de cavernes en wordt steeds minder naarmate de afstand tot het caverneveld toeneemt. Het bodemdalingsproces treedt bij deze squeeze methode relatief snel op.

Zoutwinning in de vorm van het maken van cavernes zoals toegepast door AKZO bij Zuidwending en Heiligerlee levert ook een wijziging van de spanningsverdeling in de ondergrond en in het zoutmassief op. Omdat hier stabiele holten in het zoutmassief worden gemaakt, veroorzaakt niet de volumeafname door de zoutonttrekking de bodemdaling, maar vooral de wijziging van de spanningssituatie in het zout door de vorming van de caveerne. Rondom de caveerne ontstaat een samendrukking van het zout en ontstaan zogenaamde kruipvervormingen in het zout. Dit kruipproces is een traag en langdurige proces.

Een vergelijkbaar proces met een invloed op de spanning in het zout en op de kruipvervormingen in het zout treedt op bij het opslaan van gas in lege zoutcavernes, zoals door Gasunie in Zuidwending en Heiligerlee wordt toegepast. De hoogte van de toegepaste gasdruk in de caveerne beïnvloedt de spanning in de plastische zoutlaag die de caveerne vormt. De varianties in druk leiden daardoor nauwelijks tot bodemdaling of bodemstijging. Wel worden zeer geleidelijke bodemdalingen gemeten als gevolg van het kruipgedrag van het zout onder de langdurige belasting op de zoutlaag.

Doordat de bron van de bodemdaling bij mijnbouwactiviteiten op grotere diepte ligt, leidt dit aan het aardoppervlak tot een bodemdalingskom over een relatief groot oppervlak. De huidige bodemdaling als gevolg van de gaswinning in het Groningenveld strekt zich uit over vele tientallen kilometers. De bodemdalingskom als gevolg van de zoutwinning door Nedmag nabij Borgercompagnie heeft een middellijn van circa 8 km (tot de 0,02 m zakkingscontour), zie [12.1, 12.2].

Een bodemdalingskom leidt tot zakkingen (verticale verlaging van het maaiveld) tot hellingen (scheef liggen van het maaiveld aan de rand van het bodemdalingsgebied), tot krommingen (buiging van het maaiveld) en tot verlenging of verkorting van het maaiveld (rek). Deze effecten zijn ook van belang voor gebouwen die in de bovenlagen van de bodem van de bodemdalingskom zijn gefundeerd, omdat deze zakkingen, hellingen, krommingen en rekken ook aan de gebouwen worden opgelegd. Afhankelijk van de sterkte en van de stijfheid van de bouwconstructie zullen deze verschijnselen leiden tot rekken en spanningen in die bouwconstructie.

Komvormige bodemdaling treedt op over een relatief groot oppervlak, doorgaans meer dan een tiental km². Doordat de bodem in een groot gebied langzaam en geleidelijk daalt, is er nauwelijks sprake van verschilzakking op het maaiveld, die aanleiding zou kunnen geven tot ongelijkmatige zettingen op de schaal van de afmeting van een gebouw.

Het beeld van de maaiveldddaling als gevolg van de zoutwinning bij Borgercompagnie (zie hoofdstuk 8) is op grote schaal tamelijk gelijkmatig. Omdat niet duidelijk is of het zout op grote diepte op een gelijkmatige of op een ongelijkmatige wijze wordt gewonnen, is het denkbaar dat door de winning ongelijkmatige maaiveldddaling optreedt. Aan de hand van de InSAR gegevens die nu per object beschikbaar zijn, kan dit worden nagegaan. Een gelijkmatig in de tijd verlopende zettingscurve is een eerste indicatie voor een gelijkmatige daling. Een tweede indicatie is mogelijk door met InSAR in de omgeving van een bouwwerk na te gaan of hier verschillende zakkingsnelheden optreden, die zouden kunnen duiden op lokale krommingen, plooiën in het maaiveld over zakkingsverschillen over korte afstanden. Voor de onderzoeksobjecten nabij de zoutwinning in Borgercompagnie is deze toets uitgevoerd. In de InSAR data zijn op deze locatie dergelijke verschijnselen niet waargenomen.

Het gasreservoir in Groningen wordt gevormd door het Slochteren zandsteen. Het zandsteen heeft een gemiddelde dikte van 160 m en wordt doorsneden door talrijke grote en kleine breuken die alle een grote hellinghoek hebben. Indien bestaande of nieuwe breuken zich doorzetten tot aan het maaiveld zouden ze daar ongelijkmatige zakkingen kunnen veroorzaken.

De Commissie Bodemdaling heeft in 1987 de mogelijkheid tot het ontstaan van onregelmatige zakkings ten gevolge van breukbeweging laten onderzoeken [12.6] en geconcludeerd dat uitgesloten wordt geacht dat dit fenomeen zich manifesteert in discontinuïteiten aan het maaiveld. Dit fenomeen blijft echter aanleiding geven tot discussie. Continue bodemdalingsmetingen zoals die met behulp van InSAR nu per object beschikbaar zijn, zijn ook hier bruikbaar om beter inzicht te krijgen. Gelijktijdig in de tijd verloopende zettingscurven zijn ook hier een eerste indicatie voor een gelijkmatig zettingsverloop. Ook kan aanvullend met InSAR in de omgeving van het bouwwerk worden nagegaan of verschillende zakkingsnelheden en dus ongelijkmatige zakkings optreden.

12.1.3 Relatie tussen diepe bodemdaling en maaiveld daling via hydrologische effecten.

Indien geen aanpassingen aan de waterhuishouding worden gepleegd, zal in het bodemdalingsgebied als gevolg van diepe bodemdaling de grondwaterstand stijgen t.o.v. het maaiveldniveau. Er treedt dan vernatting op. Om dit te voorkomen worden in de regel compenserende maatregelen getroffen door aanpassingen van de oppervlaktewaterpeilen, door het plaatsen van stuwen en/of het installeren van bemalingen.

Afhankelijk van het tijdstip waarop deze compenserende hydrologische maatregelen worden getroffen en afhankelijk van de grootte van de aanpassingen kunnen de maatregelen ook tijdelijk tot verdroging aanleiding geven. Bij het te laat nemen van maatregelen zal vernatting optreden.

De Commissie Bodemdaling heeft in het verleden vuistregels opgesteld voor de toelaatbare verlaging van de oppervlaktewaterpeilen, waarbij de kans op schade kleiner is dan 5 % [12.16].

Tabel 12.1: Toelaatbare verlagingen van het oppervlaktewaterpeil [12.16]

Bodem voornamelijk opgebouwd uit	Toelaatbare oppervlaktewaterpeil verlaging (m)
Zand	0,32
Klei	0,20
Veen	0,13

Bovenstaande zijn vuistregels, waarbij naast de bodemopbouw geen specifieke criteria zijn aangehouden voor wat betreft bijv. de inhomogeniteit van de bodem en de snelheid van realiseren van de aanpassingen. Meer hierover in paragraaf 12.4.

12.2 Grondwaterstanden

De relatieve (ondiepe) grondwaterstanden ten opzichte van het maaiveld worden bepaald door de karakteristieken van de ondergrond, zoals bodemopbouw en samenstelling, stijghoogten van het grondwater van diepere lagen, en door de volgende externe invloedfactoren:

- neerslag en verdamping (seizoenafhankelijk);
- oppervlaktewaterpeil
- menselijke ingrepen (zoals bemalingen, drainage);
- maaiveld daling

Grondwaterstandgegevens van specifieke locaties kunnen worden ontleend aan openbare databronnen (DINO loket) of voor grotere gebieden aan modellen zoals GeoTOP. Dit is een model met cellen van 100 x 100 m en met een dikte van een halve meter. Op basis daarvan kan de gemiddeld laagste grondwaterstand worden vergeleken met de bovenkant en de onderkant van

zettingsgevoelige lagen. Voor elke onderzoeklocatie c.q. van de peilbuizen is bepaald of er veen aanwezig is, en op welke diepte dat aanwezig is.

Onderzoek uitgevoerd in opdracht van TCB uit de jaren 80 leidt tot vuistregels voor toelaatbare verlaging van de grondwaterstanden, waarbij kans op schade door deze verlaging minder dan 5 % is [12.16], zie tabel 12.2.

Tabel 12.2: Toelaatbare verlaging van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) [12.16]

Bodem voornamelijk opgebouwd uit	Toelaatbare verlaging GLG (m)
Zand	0,24
Klei	0,10
Veen met kleidek	0,07

De Advies Commissie Schade Grondwater (ACSG) hanteert overigens een lagere waarde, namelijk voor alle grondsoorten een grondwaterstandverlaging van 0,05 m als grens waaronder schade door de grondwaterstandverlaging niet aanvaardbaar wordt geacht. Deze waarde wordt ook als toetskader gehanteerd door veel waterschappen in het kader van de vergunningverlening voor grondwateronttrekkingen en infiltraties.

Door Deltares is een statistische methodiek ontwikkeld, waarmee kan worden geschat wat de toename van de kans op schade aan gebouwen is ten gevolge van een peil aanpassing [12.24], [12.25]. Bij onderzoek in [12.24] naar het effect van een peilverlaging in Oude Pekela is gebleken dat de volgende aspecten een belangrijke invloed hebben op de zinking van een op staal gefundeerd gebouw ten gevolge van peilverlaging:

1. De grootte van de peilverlaging
2. De afstand van het gebouw tot het water waarin de peilverlaging optreedt
3. De intree weerstand van de waterbodem
4. De doorlatendheid van de bodem tussen het water en het gebouw
5. De stijfheid van de bodem (samendrukbaarheid)
6. De kwaliteit van de fundering van het gebouw.

Deze methodiek is bij het onderzoek Electraboezem 2^e schil toegepast om de toelaatbaarheid van 50, 100 en 150 mm relatieve peilverlaging te toetsen. Gebaseerd op de resultaten van de uitgevoerde analyses blijkt dat het effect van een relatieve peilverlaging van 0,05 tot 0,15 m een gebied betreft met een beperkte breedte (maximaal 25 m van de boezem). Zelfs binnen dit gebied is het effect volgens de rapportage van Deltares praktisch gezien verwaarloosbaar voor wat betreft het optreden van extra schade aan aanwezige bebouwing. Geconcludeerd wordt door Deltares dat de onderzochte relatieve peilverlagingen van 0,05 tot 0,15 m als toelaatbaar kunnen worden beschouwd. Bij deze toetsing is uitgegaan van een maximaal toelaatbare relatieve hoekverdraaiing van 1:1000 ter voorkoming van schade. Dit criterium ligt iets minder streng dan het hierna in paragraaf 12.5 voorgestelde criterium, maar wijkt niet wezenlijk af.

Ook is de ontwikkeling van de gemiddeld hoogste grondwaterstand beschouwd.

12.3 Bodemopbouw

De bodemopbouw bepaalt de gevoeligheid voor zettingen bij belasting van de ondergrond door gebouwen, uitbreidingen of wijzigingen van gebouwen en bij wijzigingen van de grondwaterstand en de gevoeligheid voor o.m. veenoxidatie bij langdurige droogstand van veenlagen. Van belang zijn vooral inhomogeniteiten in de bodem, die kunnen leiden tot ongelijkmatige zettingen.

Op basis van de gegevens uit het DINO loket en het Geotop model kan voor willekeurige locaties een eerste indruk worden verkregen van de bodemopbouw en op basis van de samenstelling ook van de zettingsgevoeligheid. Gegeven de bovenbelasting uit een gebouw, kunnen schattingen worden gemaakt van de zettingen die onder invloed van de belasting van een gebouw op zijn funderingsgrondslag in het verleden zijn opgetreden. Zettingen door wijzigingen in de bovenbelasting (en dus ook door wijzigingen in de grondwaterstand) ontwikkelen zich in de tijd. Op gebouwschaal en op mesoschaal is daarbij van groot belang wat de mate van ruimtelijke homogeniteit van de bodemopbouw is, met andere woorden, in welke mate het zettingsgedrag van de bodem overall onder het gebouw gelijk is of juist ruimtelijk verschilt. De gegevens van het DINO loket en het Geotop model geven hiervoor waardevolle eerste indicaties, maar bieden in concrete gevallen te weinig zekerheid.

Om dit zeker te stellen is bij de onderzoeksobjecten voor dit project voor panden, waar geen adequate gegevens van grondboringen of sonderingen beschikbaar waren, aanvullend grondonderzoek door middel van enkele handboringen en sonderingen uitgevoerd. Deze vorm van aanvullend onderzoek is uitgevoerd bij 50 van de 69 onderzoeksobjecten.

12.4 Invloed van bodembewegingen op gebouwen en bouwwerken – beoordelingscriteria

12.4.1 Inleiding

Onderstaande bodembewegingen, verband houdend met mijnbouwactiviteiten, worden tot de langzame processen gerekend:

- Vervormingen aan het aardoppervlak als gevolg van winningsprocessen op grote diepte (aardgas, zoutwinning), ook genoemd diepe bodemdaling;
- Vervormingen aan het aardoppervlak als gevolg van opslag- of onttrekkingsprocessen (bijvoorbeeld tijdelijke gasopslag in zoutcavernes of in gasvelden); deze hebben vaak een cyclisch karakter;
- Vervormingen aan het aardoppervlak door aanpassingen van oppervlakte-waterpeilen, (eventueel ook als gevolg van of met het oog op de effecten van diepe bodemdaling).
- Vervormingen nabij het aardoppervlak door veranderingen in de draagkracht van de funderingsgrondslag (bijv. door aanpassing grondwaterstanden, verweking of cyclic softening);
- Vervormingen aan het aardoppervlak door volumeveranderingen in de bodem (bijv. verdichting als gevolg van bevingen)
- Vervormingen aan het aardoppervlak door veranderingen in de belasting van het bouwwerk op de funderingsgrondslag

In deze paragraaf is nagegaan welke criteria in gevallen van schade bruikbaar zijn voor het beoordelen van de hypothese “schade door (langzame) bodembewegingen”. Daarbij geldt dat deze

(langzame) bodembewegingen zelfstandig en op zich zelf staand tot schade aanleiding kunnen geven, maar ook als onderdeel van een scenario samen met andere oorzaken. Te denken valt in dit verband aan de combinatie met trillingen door geïnduceerde aardbevingen, maar ook aan andere vormen van belastingen of opgelegde vervormingen.

Onderstaand is eerst ingegaan op de gehanteerde begrippen. Vervolgens is ingegaan op effecten van bodembeweging op gebouwen en op te hanteren criteria.

12.4.2 Begripsbepaling

Bovengenoemde (langzame) bodembewegingen vertalen zich in hoogteveranderingen van het aardoppervlak (dus zettingen). Die zettingen kunnen gelijkmatig zijn. Maar de bodembewegingen kunnen ook leiden tot een wijziging van het horizontaal verloop van het aardoppervlak en dus tot krommingen of scheefstanden van het oppervlak. Tenslotte kunnen met name diepe bodembewegingen ook leiden tot verkorting of verlenging van afstanden gemeten langs het aardoppervlak, dus tot horizontale rekken.

Zettingen van een gebouw komen doorgaans tot uiting in verstoring van de oorspronkelijk horizontale ligging van een gebouw of een onderdeel daarvan, zoals funderingen of muurvelden. Afhankelijk van de stijfheid van een gebouw zullen onderdelen van bouwwerken deze, vanuit de omgeving opgelegde beweging, in meer of mindere mate volgen. Vanuit de bodembeweging vastgestelde verplaatsingen of rekken zijn dus niet één op één over te dragen naar verplaatsingen en rekken van gebouwen, die op of in de bodem zijn gefundeerd. Er is een vertaalslag nodig van bodemvervormingen naar gebouwvervormingen.

Sommige bodembewegingen kunnen zonder grote interne spanningen in een gebouw worden gevolgd, zoals gelijkmatige zetting of zuivere scheefstand, maar bij kromming en dus buiging in het bouwdeel kunnen grote interne spanningen ontstaan. Bij objecten in schoon metselwerk kunnen de ondergane zettingsverschillen doorgaans goed worden vastgesteld door de hoogteligging van de lintvoegen – de horizontale voegen in het metselwerk – na te meten. Aangenomen dat het object ooit waterpas is gebouwd, geven de verschillen in hoogteligging van één of meer lintvoegen een goede indicatie van de relatieve zettingsverschillen sinds de bouw. Zettingsverschillen groter dan ongeveer de halve hoogte van een lintvoeg in metselwerk (± 5 mm) kunnen met een waterpasinstrument eenvoudig worden gesignaleerd en ingemeten. Voor de bepaling van de absolute zetting (bijv. zakking van het object ten opzichte van NAP) zijn metingen naar een vast punt en de oorspronkelijke hoogteligging nodig, die in sommige gevallen uit de bouwtekeningen kan worden herleid. Sinds enige tijd biedt ook de onderlinge vergelijking van INSAR-satellietbeelden de mogelijkheid om zettingen en zettingssnelheden van natuurlijke reflectoren met redelijke nauwkeurigheid in te meten en zelfs met terugwerkende kracht vast te stellen.

Ondiepe bodemdaling of maaiveld daling

Ondiepe bodemdaling (maaiveld daling) heeft als primaire aanleiding een wijziging in de ondiepe ondergrond. Dit kunnen wijzigingen zijn die veroorzaakt worden de aanpassingen of fluctuaties in de grondwaterstand. Zo kunnen bij daling van de grondwaterstand veenlagen in contact komen met zuurstof uit de lucht en oxideren. Hierbij krimpt het veen en treedt een daling van de bovenliggende lagen op.

Daling van de grondwaterstand leidt tot een vergroting van de korrelspanning in de bodem en tot een langzaam en irreversibel dalingsproces. Afhankelijk van de mate van homogeniteit van de ondiepe bodem, vertaalt dit zich in gelijkmatige of ongelijkmatige zakkingen van de bodem en –

afhankelijk van de mate waarin een gebouw deze zakkingsverschillen door zijn eigen stijfheid en sterkte kan volgen – ook tot ongelijkmatige vervormingen van een gebouw.

Een vaak voorkomende aanleiding voor een verhoogde belasting op de ondergrond en daardoor voor het ontstaan van plaatselijke zakkingsprocessen is het realiseren van aanbouwen bij bestaande gebouwen of wijzigingen in gebouwen. In de regel geldt dat ondiepe bodemdaling, maaiveld daling of zakking in de ondiepe ondergrond en op de schaal van de afmetingen van een gebouw de grootste impact heeft op de spanningen in een gebouw. Belangrijke parameters zijn grondwaterstand, bodemeigenschappen (draagkracht, zettingsgevoeligheid), ongelijkmatigheid of homogeniteit van de bodem, grootte van de funderingsdruk en de stijfheid en sterkte van een gebouw.

Diepe bodemdaling

Diepe bodemdaling door mijnbouwactiviteiten leidt doorgaans tot enigszins komvormige zettingen aan het aardoppervlak, die - afhankelijk van de diepte van de mijnbouwactiviteiten - vaak op grotere schaal optreden, in de orde van honderden meters tot kilometers. De belangrijkste effecten hiervan op gebouwen zijn:

- Gelijkmatige zetting
- Ongelijkmatige zettingen
 - o Scheefstand
 - o Kromming
- Horizontale rek (deze kan optreden zowel in de richting van het centrum van het bodemdalingsgebied als haaks daarop)

Bij diepe bodemdaling zijn de te verwachten scheefstanden en krommingen van de ondergrond direct af te leiden uit de geometrie van de grootschalige bodemdalingskom. De horizontale rekken in de bodem moeten doorgaans door middel van rekenkundige simulatie worden bepaald. Bij de horizontale rekken wordt onderscheid gemaakt in de radiale rek, dat is rek in de richting van het centrum van het bodemdalingsgebied, en de tangentiële rek, dat is de rek evenwijdig aan een raaklijn aan een dalingscontour. De praktijk bij de monitoring van omgevingseffecten van mijnbouwactiviteiten in termen van bodembeweging, is het meten van de bodemvervorming. Dit gebeurt in de vorm van zettingsmetingen, bijvoorbeeld in de vorm van vijfjaarlijkse waterpassingen van vaste meetpunten, GPS metingen op vaste punten of satelliet-hoogtemetingen over een groter oppervlak.

Omdat de schaal van de diepe bodemdaling groot is ten opzichte van de afmetingen van een gebouw, zijn de directe effecten in termen van scheefstanden, krommingen en daarvoor veroorzaakte spanningen in gebouwen in de regel zeer gering.

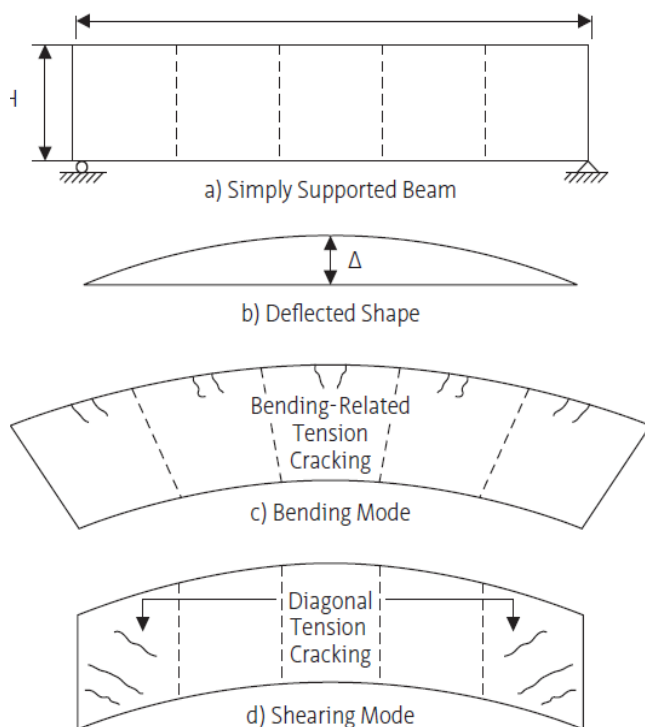
12.4.3 Inventarisatie van criteria voor schade op basis van waargenomen gebouwvervormingen

In de praktijk voor het beoordelen van de schadelijke effecten van langzame bodembewegingen voor gebouwen wordt veel gebruik gemaakt van zettingscriteria van Son & Cording [12.11] en Boscardin & Cording [12.8]. Dit gebeurt in omstandigheden van bouwwerkzaamheden (met name aanleg van bouwputten en tunnels in de gebouwde omgeving), zie bijvoorbeeld [12.15], bij de beoordeling van de effecten van funderingsschade, zie bijvoorbeeld [12.5], maar ook voor het beoordelen van effecten van mijnbouwactiviteiten door Nedmag, zie onder meer studies van GeoDelft [12.1],

Deltares [12.2] en Arcadis [12.3] en een literatuursurvey van de Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning [12.7]). Deze criteria worden hierna uitgebreider besproken.

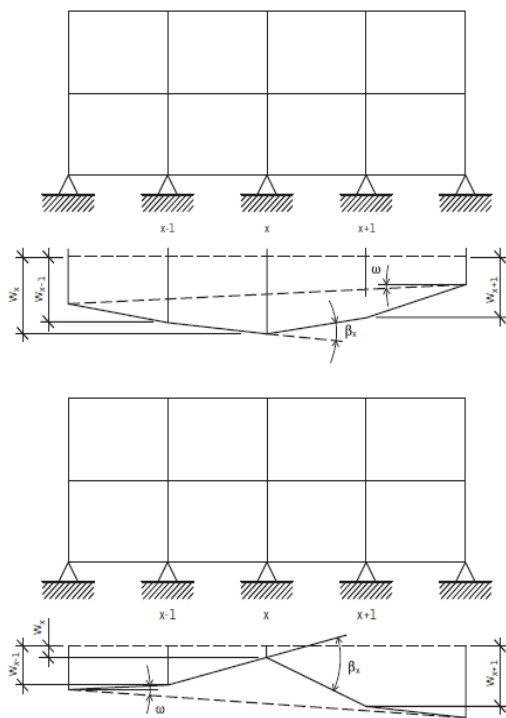
Specifiek bij mijnbouwactiviteiten is bodemdaling door wijzigingen van de spanningstoestand in de diepe ondergrond aan de orde. NAM [12.4] geeft een goed overzicht van de technieken die worden ingezet bij de monitoring van diepe bodemdaling als gevolg van de gaswinning in Groningen. Giardina [12.13], De Lange [12.5] en COB [12.15] geven een overzicht van in de praktijk gehanteerde beoordelingscriteria voor zettingen met het oog op (het beperken van) schade aan gebouwen als gevolg van bouwwerkzaamheden (bouwputten, aanleg tunnels) en met het oog op funderingsherstel.

Vooraf door de combinatie van kromming en horizontale rek van de bodem kan schade aan bouwwerken in metselwerk ontstaan. Gebouwen kunnen door zettingsverschillen vervormd worden, waarbij onderscheid gemaakt kan worden in neerwaartse buiging ('sagging') en opwaartse buiging ('hogging'). In onderstaande figuur zijn voor opwaartse buiging de kenmerkende grootheden (de doorbuiging Δ , de lengtemaat L) en ter illustratie de mogelijke schademechanismen in brosse, steenachtige materialen aangegeven.



Figuur 12.2 – overzicht van vervormingen in gebouwen en daaraan gerelateerde schade (ontleend aan [12.15])

Son & Cording [12.11] en Boscardin & Cording [12.8] hanteren voor de effecten van deze door de ondergrond aan het gebouw opgelegde vervorming een schadecriterium voor de horizontale rekken in combinatie met de kromming. Voor gebouwen wordt de kromming meestal gerelateerd aan de hoekvervorming.



Figuur 12.3 – hoekvervorming β_x (ontleend aan [12.15])

De hoekvervorming wordt gedefinieerd als grootste hoekverandering (β_x) bepaald over de afstand waarover deze optreedt. Op basis van de situatie die is geschetst in figuur 12.3 is dit:

$$\beta_x = (2 w_x - (w_{x+1} + w_{x-1})) / \Delta x$$

De in figuur 12.3 getekende ondersteuning zijn in deze benadering de fundering onder de gevels, (dragende) wanden of vloeren. Deze benadering van de hoekvervorming is niet toepasbaar op wanden die op een strokenfundering op staal rusten en daarmee min of meer continue ondersteund worden. In die gevallen is een beschouwing nodig van een ongelijkmatig verend ondersteunde ligger.

Indien de kromming wordt geschematiseerd als een cirkelboog, zie figuur 12.4, volgt uit geometrische overwegingen:

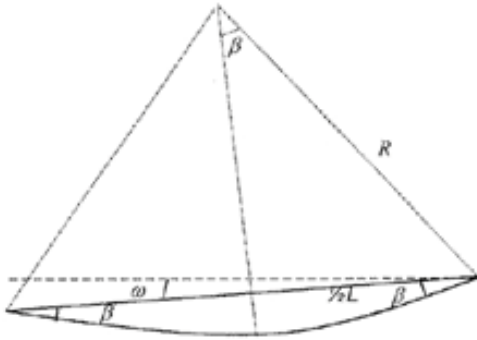
$$\beta_x = 2 \beta = L / R$$

Waarin

L = de afstand van de twee punten of doorgaans de lengte van het bouwwerk, in m

R = de kromtestraal, in m

β_x = hoekvervorming in radialen



Figuur 12.4 – geometrische relaties tussen hoekvervorming en kromtestraal van de bodemdaling

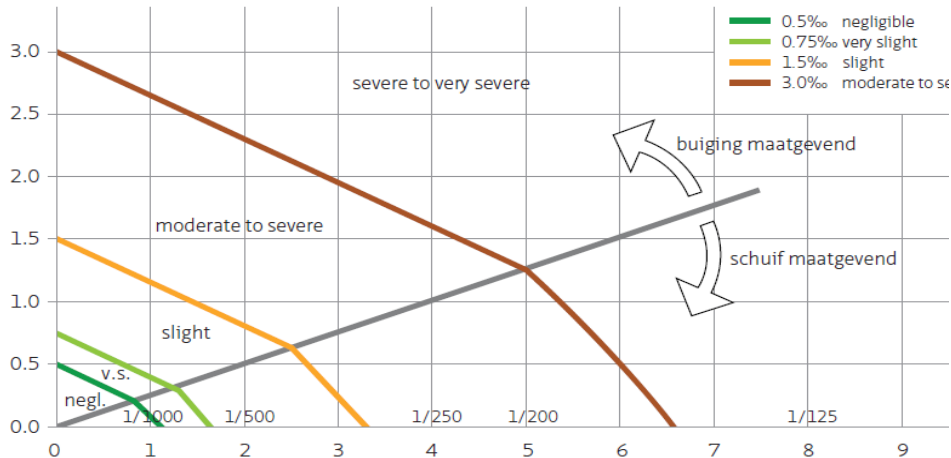
Burland en Wroth [12.6] refereren de maximaal toelaatbare vervormingen aan de grootste doorbuiging (Δ/L) van een gebouw. Zij stellen dat maximale rekken in een gebouw als gevolg van bodemvervormingen kunnen worden toegelaten in de orde van $\varepsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$, waarbij dan juist (met het blote oog) waarneembare scheuren optreden. Als indicatie: de met het blote oog waarneembare minimale scheurwijdte in metselwerk bedraagt circa 0,1 mm.

Het hanteren van schadecriteria met het oog op de beperking van de rek of kromming in gebouwen staat ook bekend onder de naam van de Limiting Tensile Strain Method. Giardina [12.13] en COB [12.23] beschrijven deze aanpak. Daarnaast geeft De Lange [12.5] een aantal alternatieve schadecriteria die in de praktijk zijn ontwikkeld. Daaruit blijkt dat bij gebouwen vooral de opwaartse buiging ('hogging') kritisch is.

Hoewel de Limiting Tensile Strain Method is bedoeld als conservatieve benadering van de werkelijk optredende rekken of spanningen in een gebouw, toont Giardina [12.13] op basis van eindige elementen modellen aan dat de Limiting Tensile Strain Method in termen van de optredende rekken niet altijd resultaten oplevert die aan de veilige kant zijn. De Limiting Tensile Strain Method wordt vaak gebaseerd op gemeten of berekende bodemvervorming. De interactie tussen de vervormde bodem en het gebouw moet dan nog apart in rekening worden gebracht. Die interactie leidt er in de regel toe dat een gebouw minder vervormt dan de bodem zou vervormen zonder het gebouw. Hiervoor zijn correctiefactoren nodig, die de invloed van de stijfheid van de bodem en het gebouw in rekening brengen (zie [12.23]).

Boscardin & Cording [12.8] definiëren een zone waarin 'verwaarloosbare schade' (zie figuur 12.5) kan optreden bij horizontale rekken van gebouwen in de orde van $0,5 \cdot 10^{-3}$ ($= 5 \cdot 10^{-4}$) of bij een hoekvervorming in de orde van $1 \cdot 10^{-3}$. In de grafiek van Boscardin en Cording [12.8] moet zowel de horizontale rek als de hoekvervorming ten gevolge van de bodembeweging worden bepaald, waarna uit de combinatie van beide effecten de kans op schade is af te lezen. Sambeek [12.9] citeert overeenkomstige waarden, waarbij geen schade wordt verwacht, namelijk een rek van $5 \cdot 10^{-4}$ en een hoekvervorming van $0,8 \cdot 10^{-3}$. Kratzsch [12.10] citeert als grens voor de horizontale rek waarbij geen schade wordt verwacht in de orde van $5 \cdot 10^{-4}$.

Ook Giardina [12.13] toont op basis van eindig-elementenmodellen aan dat bij langzame vervormingen van metselwerk bij rekken kleiner dan $0,5 \cdot 10^{-3}$ nog nauwelijks waarneembare scheuren optreden. Deze toelaatbaar geachte horizontale rek is overeenkomstig een verlenging van 5 mm over een lengte van 10 m.



Figuur 12.5 – schadecriteria m.b.t. horizontale rek en hoekvervorming naar Son & Cording [12.11]. Horizontaal staat de hoekvervorming in 10^{-3} en verticaal de horizontale rek in 10^{-3} .

De gangbaar acceptabel geachte waarden waaronder nauwelijks of alleen zeer lichte schade als gevolg van bodembewegingen kan optreden, zijn dus een rek orde $0,5 \cdot 10^{-3}$ [m/m] en een hoekvervorming orde $1 \cdot 10^{-3}$ [rad] of meestal uitgedrukt in [m/m]. Deze vervormingen hebben betrekking op het gebouw.

De kromming leidt ook tot rek in de constructie. Uitgaande van een hoogte van een muurveld van 5 en een lengte van orde 10 m levert een kromming bij een toelaatbaar geachte hoekvervorming van $\beta_x = 10^{-3}$ via onderstaande vergelijking tot een rek van (orde) $2,5 \cdot 10^{-4}$ ofwel 2,5 mm over een lengte van 10 m. $\varepsilon = \frac{1}{2} h / R = (\frac{1}{2} h / L)$. $\beta_x = \frac{1}{2} \cdot 5/10 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-4}$

Deze resultaten zijn dus qua orde van grootte consistent. Hieruit blijkt bovendien dat er een zekere verhouding tussen de optredende maximale rek en maximale kromming of hoekvervorming bestaat, die afhankelijk is van de lengte en hoogte afmetingen van een muurveld. Voor muren met een hoogte $h = 5$ m en een lengte tussen $L = 10$ m en $L = 20$ m vinden we horizontale rekken tussen $\varepsilon = 1/4 \beta_x$ en $\varepsilon = 1/8 \beta_x$.

Met dit gegeven kan worden bepaald welke doorbuiging als gevolg van een kromming of hoekverdraaiing van een muurveld nog toelaatbaar is, zonder schade te vertonen. Uitgaande van $\beta_x = 1 \cdot 10^{-3}$: dan geldt bij een cirkelvormige doorbuigingslijn dat de zakking over een lengte van 10 m 1,25 mm bedraagt. Dat kunnen we met lintvoegwaterpassingen net niet meer goed meten. Anders gezegd, merkbare afwijkingen van een horizontale ligging gemeten bij een lintvoegmeting, leiden al snel tot overschrijden van dit criterium.

De rekken in het gebouw door een eventuele horizontale bodemvervorming en door de kromming van de bodem moeten bij elkaar worden opgeteld en vormen de totale rek in een bouwwerk. Dit verklaart het dalende verloop van de lijnen in het diagram van Boscardin & Cording [12.8] en van Son & Cording [12.11]: als er ook kromming (hoekvervorming) optreedt, mag er minder horizontale rek toegelaten worden.

Op basis van laboratorium beproevingen aan metselwerk [12.13, 12.14] blijkt dat rek waarbij de uiterst opneembare buigtrekspanning in metselwerk (bij belasten in het vlak) optreedt, veel lager ligt, en wel in de orde van $1 \cdot 10^{-4}$. De criteria genoemd in De Lange [12.5], van Boscardin en Cording

[12.8], Sambeek [12.9], Kratzsch [12.10] en Son & Cording [12.11] impliceren dus veel hogere toelaatbaar geachte rekken in de praktijk, dan de rek, waarbij de maximaal opneembare spanning in het metselwerk c.q. de mortel zelf optreedt.

Het verschijnsel kruip in metselwerk, waardoor de spanning afneemt onder een lang constant gehouden opgelegde vervorming, kan hiervoor ten dele een verklaring vormen. Toch kan kruip dit verschil niet volledig verklaren. Dit houdt in dat de in de praktijk gehanteerde criteria een geringe overschrijding van de uiterst opneembare spanning in het metselwerk blijkbaar accepteren. Op microniveau is in een gebouw dan mogelijk al een vorm van schade opgetreden, terwijl deze nog niet met het blote oog zichtbaar is in de vorm van (micro)scheuren.

Naast de horizontale rekken en hoekvervorming kan ook scheefstand leiden tot schade (zie ω in figuur 12.3). Deze scheefstand is meestal relatief eenvoudig te meten door middel van een waterpassing van de vloeren. De scheefstand leidt meestal niet direct tot constructieve of esthetische schade aan een pand, maar mogelijk wel aan het gebruik ervan. NEN9997-1 geeft als criterium een toelaatbare scheefstand van 1:300. Deze waarde wordt in de praktijk gebruikt bij het ontwerpen van nieuwbouw. Bij bestaande en op staal gefundeerde bebouwing wordt echter vaak een veel grotere scheefstand gemeten, waarbij 1:200 wordt beschouwd als een overgang naar hinderlijke scheefstand.

12.4.4 Te hanteren vervormingscriteria

Uit bovenstaande analyse komt naar voren dat de rek waarbij de sterkte van metselwerk bij kortdurende belastingen wordt overschreden in de orde van $1 \cdot 10^{-4}$ ligt, terwijl in de gangbare praktijk, gemeten op basis van de vervorming van gebouwen, toelaatbare rekken van $5 \cdot 10^{-4}$ worden toegelaten. Zoals opgemerkt wordt in de praktijk een overschrijding van de uiterst opneembare spanning in het metselwerk geaccepteerd, zolang scheuren nog niet met het blote oog zichtbaar zijn.

We zoeken naar criteria om de hypothese ‘schade door langzame bodembewegingen’ te kunnen beoordelen, falsificeren of verifiëren. Het bovenstaande leidt tot de volgende conclusies:

1. Het is raadzaam om bovenstaande omstandigheden met betrekking tot de overdracht van bodembewegingen naar spanningen en scheuren in gebouwen in ogenschouw te nemen. Dit pleit er voor om het criterium voor toelaatbare bodemvervormingen te betrekken op de rekken en krommingen die *in het gebouw* optreden in plaats van *in de ondergrond*. Optredende krommingen moeten dus worden gebaseerd op metingen aan de gebouwen. Lintvoegwaterpassingen aan het gebouw leveren hiervoor de meest bruikbare basisgegevens.
2. Er moet een relatie worden gelegd tussen de vervorming van de bodem (bepaald door middel van waterpassingen, InSAR data e.d.) en de vanuit de bodembeweging veroorzaakte vervorming van het gebouw.

Op basis van het bovenstaande wordt een beoordeling in twee stappen gehanteerd.

1. Als eerste stap wordt aansluiting gezocht bij de veel gebruikte classificatie van Son & Cording [12.11] en wordt daaraan een beoordeling in termen van waarschijnlijkheid toegevoegd, dat de vervorming van het gebouw een rol speelt in een scenario dat tot met het blote oog waarneembare schade leidt.
2. Als tweede stap wordt beoordeeld of de waargenomen vervorming van het gebouw een relatie heeft met de bodembewegingen. De vervormingen van een gebouw zijn als regel kleiner dan de vervormingen van de bodem. In welke mate zij kleiner zijn, hangt af van de verhouding van de stijfheid van de bodem en het gebouw. Dit moet door middel van een specifieke analyse worden bepaald.

Indien de hoekvervorming of rek in een gebouw (op basis van metingen van zettingen) zodanig klein is dat de rek niet is overschreden waarbij de uiterst opneembare spanning van metselwerk optreedt, is het zeer onwaarschijnlijk dat vervorming van het gebouw door bodemdaling een bijdrage heeft geleverd aan een scenario. Zie mijn opmerking over meetnauwkeurigheid

Zoals hierboven aangegeven, komt dit neer op een horizontale rek bij het bereiken van de uiterst opneembare spanning in het metselwerk van maximaal $1 \cdot 10^{-4}$. Omdat het hier langzame processen betreft en ook kruip een rol speelt bij het beperken van de spanningsopbouw, kan deze waarde indicatief met een factor 2 worden verhoogd, dus tot $2 \cdot 10^{-4}$. Bij deze waarde is het metselwerk nog juist volledig intact. De maximale hoekverdraaiing bedraagt bij deze waarde circa $4 \cdot 10^{-4}$ à $6 \cdot 10^{-4}$.

13 Falsificatie, verificatie en toerekening van schadeoorzaken

13.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden criteria geïnventariseerd om te kunnen bepalen of een bepaalde oorzaak van invloed is geweest. Hiervoor wordt aangesloten bij de bestaande praktijk van de beoordeling van schadeoorzaken aangevuld met de kennis die er op dit gebied aanwezig is en inzichten die in deze studie zijn opgedaan.

In de bestaande praktijk van schadeafhandeling worden vaak toetsingscriteria gehanteerd voor afzonderlijke schadeoorzaken. Die toetsingscriteria kunnen worden ontleend aan formele normen, aan (praktijk)richtlijnen, zoals bijvoorbeeld de 'SBR Richtlijn A' voor de beoordeling van de invloed van trillingen, aan gezaghebbende publicaties, zoals bijvoorbeeld de criteria van Commissie voor Bodemdaling of aan publicaties uit de wetenschappelijke literatuur. In dit hoofdstuk zijn die toetsingscriteria geïnventariseerd en zijn de achtergronden van deze toetsingscriteria nagegaan. Dit is gedaan om na te gaan of deze toetsingscriteria ook bij scenario's met meerdere oorzaken kunnen worden gehanteerd, of bij scenario's met afwijkende omstandigheden. De toetsingscriteria dienen om bepaalde schade-oorzaken te kunnen uitsluiten, dus te falsificeren.

13.2 Criteria voor langzame bodembewegingen

Onderscheid wordt gemaakt in:

- bodemdaling door gaswinning of andere diepe winningsactiviteiten (diepe bodemdaling)
- bodemdaling door ondiepe oorzaken (ondiepe bodemdaling of maaveldaling)
- verweking

De criteria van de Commissie voor Bodemdaling [13.1] worden in dit onderdeel achtereenvolgens besproken en becommentarieerd. Op basis hiervan worden toetsingscriteria geformuleerd, die bij de beoordeling in dit onderzoek zullen worden gehanteerd.

13.2.1 Criteria voor vervormingen door (trage) bodembewegingen in de diepe ondergrond

In Groningen wordt een diepe bodemdaling door aardgaswinning verwacht in de orde van 0,5 m. Hiervan is tot nu toe al ruim 0,3 m gerealiseerd. Echter, omdat deze bodemdaling wordt veroorzaakt door samendrukking van gasvoerende laag op ca. 3 km diepte en de bodemdaling over een zeer groot gebied plaatsvindt, leidt dit maar in zeer beperkte mate tot vervorming aan het aardoppervlak. Bij lokale mijnbouwactiviteiten, zoals zoutwinning op geringere diepte, kunnen zakkingen in dezelfde orde van grootte optreden, echter dan op een ruimtelijke schaal van slechts enkele kilometers. De krommingen en hellingen zijn dan aanzienlijk groter.

Bij de beoordeling van de effecten oriënteert deze studie zich voor de falsificatiecriteria op de publicatie van Boscardin & Cording [13.10] met een passende vertaling naar het gebouw, zoals besproken in hoofdstuk 12.

Op basis van hoofdstuk 12 is in deze studie als falsificatiecriterium aangehouden: een horizontale rek van $2 \cdot 10^{-4}$ en een hoekvervorming van $4 \cdot 10^{-4}$.

13.2.2 Criteria voor vervormingen door (trage) bodembewegingen in de ondiepe ondergrond

Bij ondiepe bodembewegingen gaat het om inklinken/zetten van ondiepe klei- en veenlagen. Dit kan door samendrukking van bodemlagen door het gewicht van het gebouw. Schade ontstaat als dit ongelijkmatig gebeurt, door bijvoorbeeld verschillen in opbouw en samendrukbaarheid van ondergrond, verschillen in belasting op de ondergrond, verschillen in type of afmeting van fundering, latere uitbreiding van het gebouw of grondaanvulling (bijv. bij het ophogen van een perceel of het dempen van sloten).

Voor de gevolgen van ondiepe bodembewegingen in termen van horizontale rek en hoekvervorming in metselwerk is de situatie analoog aan de situatie voor diepe bodemdaling.

Op basis van hoofdstuk 12 is in deze studie als falsificatiecriterium aangehouden een horizontale rek van $2 \cdot 10^{-4}$ en een hoekvervorming van $4 \cdot 10^{-4}$.

13.3 Criteria voor verweking van de funderingsgrondslag

Verweking van de funderingsgrondslag kan optreden doordat losgepakte zandlagen onder de grondwaterspiegel onder invloed van bijvoorbeeld een aardbeving worden verdicht, waardoor (tijdelijke) grondwateroverspanningen ontstaan. Dit fenomeen is in Groningen nog niet waargenomen en zal naar verwachting bij geringe trillingssterkte niet optreden [13.3]. Hiervoor wordt bij een zandige bodem een falsificatiecriterium een grondversnelling van 0,1 g gehanteerd. Softening gedrag van klei wordt niet verwacht bij een gering aantal opeenvolgende belastingswisselingen en afschuifrekken kleiner dan 10^{-4} . Deze criteria gecombineerd met trillingen met dominante frequenties in de orde van 2 tot 5 Hz, leidt tot de conclusie dat bij een trillingssnelheid lager dan 10 mm/s verweking of *softening* niet zullen optreden.

In deze studie is als falsificatiecriterium aangehouden een bodemversnelling van 0,1 g of een trillingssnelheid van 10 mm/s.

13.4 Criteria voor de verdichting van de funderingsgrondslag

Verdichting van de funderingsgrondslag kan optreden doordat losgepakte zandlagen onder de grondwaterspiegel onder invloed van bijvoorbeeld een aardbeving worden verdicht en daardoor een zetting zullen vertonen. Recent onderzoek door Deltares [13.4, 13.5] geeft aan dat bij trillingen met een trillingssnelheid ter plaatse van het gebouw kleiner dan 4 mm/s, de kans op zettingen door verdichting in geval van een zandige ondergrond minder is dan 1 %. Cohesieve grondsoorten, zoals klei of veen, zijn geheel niet gevoelig voor verdichting door trillingen.

In deze studie is als falsificatiecriterium aangehouden een trillingssnelheid van 4 mm/s.

13.5 Criteria voor grondwaterstandsverlaging

Er kunnen allerlei redenen zijn om de grondwaterstand aan te passen. Een van de redenen is de diepe bodemdaling door gaswinning, waarbij gekozen wordt om de grondwaterstand mee te laten dalen om vernatting van maaiveld te voorkomen.

De aanpassingen gebeuren in de regel in stappen, waarbij het effect van de diepe bodemdaling wordt gecompenseerd. De compensatie kan in de tijd vooruitlopen op de eigenlijke bodemdaling of kan achteraf worden doorgevoerd. Afwijkingen van het oorspronkelijke grondwaterpeil kunnen lokaal aanleiding geven tot zettingen van zettingsgevoelige grondlagen, met name in geval van klei en veengronden.

Tevens kunnen bomen nabij een fundering invloed hebben op lokale grondwaterstandsverlagingen (zie volgende paragraaf), evenals lange perioden van extreme droogte.

Wil er sprake zijn van mogelijke schade door ondiepe bodemdaling door grondwaterstandsverlaging dan moet er sprake zijn van een fundering op staal in combinatie met een zettingsgevoelige grondslag en een wijziging van het grondwaterpeil (of eventueel een toename van negatieve kleeft bij een paalfundering). De Commissie voor Bodemdaling [13.1, 13.2] hanteert als limietwaarden voor grondwaterstandsverlagingen waaronder de kans op schade kleiner is dan 5 %:

- Voornamelijk zandige ondergrond: 32 cm
- Voornamelijk kleiachtige ondergrond: 20 cm
- Voornamelijk veenachtige ondergrond: 13 cm

Als toelaatbare relatieve grondwaterstandverhoging wordt door de Commissie voor Bodemdaling een waarde van 15 cm opgegeven voor de grondwaterstand. Theoretisch kan echter elke relatieve grondwaterstandsverlaging bijdragen aan schade. Door de Advies Commissie Schade Grondwater worden lagere waarden en dus strengere criteria gehanteerd voor oppervlaktepeilen – namelijk 0,05 m. In deze studie is op deze strengere criteria aangesloten voor de grondwaterstanden.

Ten behoeve van dit onderzoek is als falsificatie-criterium gehanteerd een grondwaterstandwijziging gedurende langere tijd van ten hoogste 5 cm.
--

Bij funderingen op houten palen kan met name de paalkop zeer gevoelig zijn voor aantasting bij verlaging van de grondwaterstand tot onder het niveau van de paalkop of het kesp hout. Hiervoor is dit falsificatie-criterium niet toepasbaar en kan geen algemene tolerantie worden aangegeven; dit moet in geval van een fundering op houten palen ter plaatse worden beoordeeld.

13.6 Criteria voor bomen

Uit de literatuur blijkt dat de ruimtelijke wateronttrekking door bomen tot driemaal de kroonprojectie kan gaan. Voor verschillende bomen worden de volgende grenswaarden aangehouden tussen boom en bouwwerk, waarbinnen 75% van de gerapporteerde schadegevallen plaatsvond [13.6].

Ranking	Species	Maximum height of tree (H) in meters	Separation between tree and building for 75 % of cases (in meters)	Minimum recommended separation in shrinkable clay (in meters)
1	Oak	16-23	13	1 H
2	Poplar	24	15	1 H
3	Lime	16-24	8	0,5 H
4	Common Ash	23	10	0,5 H
5	Plane	25-30	7.5	0,5 H
6	Willow	15	11	1 H
7	Elm	20-25	12	0,5 H
8	Hawthorn	10	7	0,5 H
9	Maple/Sycamore	17-24	9	0,5 H
10	Cherry/Plum	8	6	1 H
11	Beech	20	9	0,5 H
12	Birch	12-14	7	0,5 H
13	White beam/Rowan	8-12	7	1 H
14	Cypress	18-25	3.5	0,5 H

Tabel 13.1: Schaderisico afhankelijk van het type boom, afmetingen en afstand tot het pand [13.6]

Een vuistregel is dat schade door bomen meestal kan worden voorkomen als een boom niet dichterbij de fundering zit dan de hoogte van de boom. Dit hangt echter ook af van het type boom, het type grond en het type bouwwerk.

Voor deze studie is het uitgangspunt dat wanneer de afstand van de boom tot het bouwwerk groter is dan de hoogte van de boom er geen negatieve invloed is van de wortelgroei. Invloeden op de grondwaterstand kunnen niet geheel worden uitgesloten. Hierbij dient een analyse in samenhang met de lintvoegmeting te worden uitgevoerd.

13.7 Criteria voor trillingen door bouw- en industriële activiteiten

Bouwactiviteiten, zoals heien of intrillen van damwanden, en industriële activiteiten kunnen trillingen veroorzaken.

Als falsificatie criterium voor deze trillingen wordt op basis van hoofdstuk 10 een topwaarde van 0,5 mm/s aangehouden.

Wij beogen hiermee geen nieuwe grenswaarde voor het ontstaan voor schade aan bouwwerken door trillingen te introduceren. Het betreft een criterium waarbij de invloed van trillingen niet meer te onderscheiden is van de trillingen die in en bij een gebouw door een groot aantal andere omstandigheden al optreden. Op basis van dit falsificatie criterium kan dit aspect uit de analyse worden verwijderd, ook in geval van samenloop met andere belastingen of vervormingen.

13.8 Criteria voor trillingen door wegverkeer

Wegverkeer kan door het wisselend belasten van de ondergrond trillingen veroorzaken.

Als falsificatie criterium voor deze trillingen wordt op basis van hoofdstuk 10 een topwaarde van 0,5 mm/s aangehouden.

Voor de beoordeling van scenario's is het handzamer dit criterium te vertalen naar een afstandscriterium. In navolging van Witteveen en Bos hanteren hiervoor we de volgende afstanden van wegen ten opzichte van de woningen [13.7]:

- drempel op minder dan 50 m
- 50 km/u weg zonder asfalt op minder dan 30 m
- boerenlandweg met tractoren op minder dan 30 m
- 80 km/u of 100 km/u weg op minder dan 30 m
- weg met bus op minder dan 30m

Voor drempels stelt de 'Richtlijn drempels, plateaus en uitritten' in Bijlage IV [13.8] minder strenge eisen: "Bouwwerken binnen een straal van ongeveer 30 m van de drempellocatie lopen risico op trilling overlast indien er sprake is van het passeren van zware voertuigen." Bij twijfel kunnen er metingen ter plekke worden uitgevoerd.

13.9 Criteria voor trillingen door railverkeer

Railverkeer kan door een wisselende belasting van de ondergrond trillingen veroorzaken. Hiervoor kan eenzelfde falsificatie-criterium worden gehanteerd als in het geval van bouw- of industriële activiteiten. Voor de beoordeling van scenario's is het handzamer dit criterium te vertalen naar een afstandscriterium. Voor algemeen geldende criteria voor de minimale afstand tot rails in verband met de schadelijke invloed van trillingen door treinen zijn op dit moment geen richtlijnen bekend. Dit is zeer afhankelijk van bodemsamenstelling, ligging op spoordijk of niet, samenstelling ballastbed, oplegging rails, type trein etc.

Voor deze studie is een falsificatie-criterium aangehouden van 50 m in geval van uitsluitend reizigerstreinen en 100 m in geval van (ook) goederentreinen. Dit komt bij benadering overeen met een verwachte maximale trillingssterkte van 0,5 mm/s. Hierbij wordt aangesloten op een vooronderzoek voor het schadeafhandelingsprotocol van Prorail [13.9].

Als falsificatie criterium voor deze trillingen wordt op basis van hoofdstuk 10 een topwaarde van 0,5 mm/s aangehouden.

13.10 Criteria voor trillingen door bevingen

Ook voor aardbevingen zal in de analyse een falsificatie-criterium worden gehanteerd. Omdat gebruik gemaakt moet worden van extrapolaties en interpolaties van meetresultaten van de trillingen van bevingen op andere gebouwen en op andere locaties, is er een onzekerheid met betrekking tot de sterkte van de aardbeving ter plaatse van het gebouw waar de schade is gemeld. Om die reden wordt bij het gebruik maken van de berekende trillingssterkte van geïnduceerde bevingen gebruik gemaakt van een karakteristieke waarde met een overschrijdingskans van 25 %.

Het falsificatie-criterium voor trillingen door bevingen wordt op het zelfde niveau gehanteerd als voor trillingen van andere bronnen (bouwwerkzaamheden, weg- en railverkeer, industriële activiteiten) wordt aangehouden.

Als falsificatie-criterium voor deze trillingen wordt op basis van hoofdstuk 10 een topwaarde van 0,5 mm/s aangehouden, bij berekende trillingssterkten wordt gebruik gemaakt van een karakteristieke waarde met een overschrijdingskans van 25 %.

13.11 Toerekenbaarheid aan trillingen door bevingen

In deze studie is het concept ‘toerekenbaarheid’ van een oorzaak gehanteerd om tot uitdrukking te brengen in welke mate een oorzaak van een schade een (relatief) aandeel heeft gehad bij het overschrijden van de uiterste sterkte van een bouwdeel of in een bouw materiaal bij het ontstaan van de schade. In de onderhavige studie betreft dat veelal het overschrijden van de treksterkte in metselwerk. In veel gevallen kan bij schade oorzaken die gebouw-gebonden zijn of die door zettingen in de bodem worden veroorzaakt, op basis van de geometrie van het gebouw of gebouwdeel, de mate van zetting of de mate van opgelegde of verhinderde vervorming, een aandeel worden geschat.

Bij de toerekening van de invloed van trillingen ligt dit gecompliceerder. Schade door lichte trillingen kenmerkt zich niet door specifieke patronen, die deze schade-oorzaak herkenbaar en identificeerbaar maken. Om die reden wordt in deze paragraaf specifiek aandacht besteed aan de toerekenbaarheid aan trillingen door bevingen. De belangrijkste aanknopingspunten voor die toerekenbaarheid zijn in dit rapport gegeven in hoofdstukken 10 en 11. In hoofdstuk 10 is de invloed van trillingen op het ontstaan van schade gezien vanuit de praktijkervaringen en vanuit schade-evaluatie-studies na bevingen. In hoofdstuk 11 zijn resultaten van simulatieberekeningen naar het ontstaan van schade in bouwdelen behandeld.

Een toerekening van een aandeel in de schade in kwantitatieve zin (dus bijvoorbeeld in percentages) suggereert een nauwkeurigheid en betrouwbaarheid, die met de huidige inzichten nog niet kan worden onderbouwd. Om die reden is het oordeel over de toerekenbaarheid in de studie beperkt tot een kwalitatief oordeel over de toerekenbaarheid, dus in woorden. De gehanteerde kwalitatieve schaal voor het aandeel van een oorzaak is hieronder samengevat.

Kwalificatie	Orde van grootte
<i>(vrijwel) geen</i>	<i>minder dan 1 %</i>
<i>zeer klein</i>	<i>tussen 1 % en 10 %</i>
<i>klein</i>	<i>tussen 10 % en 33 %</i>
<i>middelmatig</i>	<i>tussen 33 % en 66 %</i>
<i>groot</i>	<i>tussen 66 % en 90 %</i>
<i>zeer groot</i>	<i>tussen 90 % en 99 %</i>
<i>(vrijwel) volledig</i>	<i>groter dan 99 %</i>

Praktijkinzichten, resultaten evaluatiestudies

De inzichten uit de praktijk, zoals de schade evaluatie na de beving in Huizinge en de praktijkervaringen die ten grondslag liggen aan richtlijnen, zoals SBR Richtlijn A, bieden indicaties over het ontstaan van schade, in statistische termen. In hoofdstuk 10 is een eerste indicatie gegeven voor de technische toerekenbaarheid van trillingen, kort samengevat:

- Bouwwerken in metselwerk na 1940: circa 1 % per mm/s
- Bouwwerken in metselwerk voor 1940: circa 2 % per mm/s

Simulatieberekeningen

De uitkomsten van de berekeningen in hoofdstuk 11 bieden aanvullend inzicht om uitspraken te doen over de toerekening van het aandeel van verschillende oorzaken in geval van schade, waar zowel een beving als een andere oorzaak onderdeel uitmaakt van een schadescenario.

De berekeningsresultaten ondersteunen dat de toerekening van schade aan bevingen bij trillingsnelheid in de orde tot 16 mm/s relatief gering moet zijn, zeker als het metselwerk van gemiddelde sterkte betreft. Voor metselwerk van geringe sterkte ligt deze grens in de orde van 4 à 8 mm/s. Als zelfstandige oorzaak veroorzaken de bevingen bij deze trillingssterkte geen schade.

De berekeningen in hoofdstuk 11 ondersteunen ook de hypothese van de beving als trigger. Door een beving met een geringe trillingssterkte kan dus schade ontstaan of zichtbaar worden, waarvan aard en mate vooral wordt bepaald door andere belastingen (zoals bijvoorbeeld een zetting). Uit de berekeningen blijkt bijvoorbeeld dat de grootte van de blijvende scheuren in deze situatie nauwelijks door de sterkte van de trilling wordt beïnvloed. Bij lage trillingssterkten (orde 2 mm/s) is het triggereffect weliswaar zeer zwak, maar nog steeds aanwezig.

Andere overwegingen

Een bijzondere klasse van schades betreft de schade die optreedt tussen aansluitende delen van een bouwwerk, waar deze aansluitende delen geen verbinding vormen met een (vanuit de ontwerpoverwegingen) benodigde minimale sterkte. Dit doet zich bijvoorbeeld voor bij scheidingwanden die tegen dragende muren zijn geplaatst. De kwalificaties voor aansluitende delen zonder aanhechting of zonder constructief verband zijn gelijk verondersteld. De reden is dat de opneembare treksterkte in dergelijke verbindingen zeer laag is. In deze studie is bij gebrek aan goed onderbouwde gegevens, de kwalificatie voor bouwwerken van voor 1940 gehanteerd voor de toerekenbaarheid in deze situaties.

Het bovenstaande heeft geleid tot de kwalitatieve inschatting van de toerekenbaarheid van het aandeel van trillingen door bevingen in waargenomen schades indien de beving voorkomt in een scenario samen met andere oorzaken, zoals samengevat in tabel 13.2. Voor de toename van de trillingen met een factor 2, is op basis van de huidige inzichten het kwalitatieve oordeel van de toerekenbaarheid telkens één kwalificatie verhoogd.

Tabel 13.2: Gehanteerde toerekenbaarheid van trillingen door bevingen (kwalitatief)

	Metselwerk gemiddelde sterkte / panden na 1940	Metselwerk geringe sterkte / panden voor 1940	Aansluitende delen zonder aanhechting of constructief verband
Er is een unieke en evidente andere oorzaak; de aard en mate van de schade staat in geen verhouding tot het mogelijke effect van een trilling op bijv. de scheurwijdte of scheurlengte	beving geen onderdeel van scenario	beving geen onderdeel van scenario	beving geen onderdeel van scenario
trillingssterkte is kleiner dan 2 mm/s	(vrijwel) geen aandeel	(vrijwel) geen aandeel tot zeer klein aandeel	(vrijwel) geen aandeel tot zeer klein aandeel
trillingssterkte ligt tussen 2 en 4 mm/s	(vrijwel) geen aandeel tot zeer klein aandeel	zeer klein aandeel	zeer klein aandeel
trillingssterkte ligt tussen 4 en 8 mm/s	zeer klein aandeel	klein aandeel	klein aandeel
trillingssterkte ligt tussen 8 en 16 mm/s	klein aandeel	Klein tot middelmatig aandeel	middelmatig aandeel
trillingssterkte ligt tussen 16 en 32 mm/s	Klein tot middelmatig aandeel	Middelmatig aandeel	groot aandeel
trillingssterkte is groter dan 32 mm/s	middelmatig aandeel	groot aandeel	zeer groot aandeel

Bij de analyse van afzonderlijke schades is de uiteindelijk geschatte toerekenbaarheid aan trillingen ook afhankelijk van het belang van andere oorzaken in de schade.

14 Onderzoek aan schadeobjecten

14.1 Inleiding

Concreet hebben we het over 69 gebouwen met in ruim 2300 beoordeelde schades. Alle panden zijn beoordeeld op basis van de schades zoals vermeld in de beschikbare schadeopname rapporten.

De aangetroffen schades in de objecten zijn alle individueel vastgelegd en beschreven in schadeopnamerapporten. Schades zijn vaak scheuren, maar schades kunnen ook afwijkingen zijn van loodrechtstand of vlakheid of andere type van vervormingen of aantastingen. Vaak komen scheuren voor in combinatie met afwijkingen van rechtstand, vlakheid of andere typen van vervormingen. De schades zijn in de regel als aparte schades vastgelegd, maar bij het bepalen van de oorzaken waar nodig soms behandeld als één samenhangend schadebeeld.

De schades zijn individueel geassocieerd in termen van gebouwcontext (plaats van optreden, aard van de schade). De schades zijn vervolgens met de methodiek zoals gepresenteerd in hoofdstuk 5 beoordeeld op basis van scenario's waarin de gebouwcontext en de omgevingscontext (inclusief de effecten van gaswinning) zijn meegenomen.

De invloedfactoren die samenhangen met gaswinning en mijnbouwactiviteiten, zoals beschreven in hoofdstuk 7 tot en met 12 zijn bij die beoordeling in alle gevallen expliciet meegenomen indien hun invloed niet kon worden gefalsificeerd. De inzichten uit hoofdstuk 13 met betrekking tot de gecombineerde invloed van een aantal oorzaken zijn daarbij ook in beschouwing genomen.

De best verklarende scenario's zijn per schade benoemd. Voor zover mogelijk is per best verklarend scenario een oordeel gegeven over de toerekenbaarheid aan de afzonderlijke oorzaken in een scenario, om daarmee het relatieve belang van de oorzaken in een scenario nader te duiden.

Voor een zeer beperkt aantal panden zijn verschillende schadeopname rapporten beschikbaar of meer metingen, die aanvullend inzicht zouden kunnen geven hoe de schade zich heeft ontwikkeld of welke schade tussen twee inspectiemomenten is ontstaan.

Dit hoofdstuk gaat in op inzichten, die uit de beoordeling van deze schades naar voren komen en geeft daarmee invulling aan de opdracht om duiding te geven aan de oorzaken die ten grondslag liggen aan het ontstaan van de aangetroffen schades.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Paragraaf 14.2 vat de gevolgde beoordelingsprocedure samen. Paragraaf 14.3 bevat een beschrijving van de waargenomen schades. Dit is gedaan in termen van mate van de schades, kenmerken van de schades uitgesplitst naar gebied, bouwtype en bouwjaarklasse. In paragraaf 14.4 is besproken welke best verklarende scenario's zijn opgesteld als oorzaak van de waargenomen schades. Paragraaf 14.5 behandelt vervolgens de toerekening van de schade naar de afzonderlijke oorzaken in deze scenario's. Paragraaf 14.6 beschrijft de kenmerken van de gebouwen die in het onderzoek zijn betrokken en de relatie met de gevonden oorzaken achter de scenario's. Het gaat dan over overeenkomsten in bouw- en constructiewijze en dit is vooral gerelateerd aan de bouwtype en aan de bouwjaarklasse. Paragraaf 14.7 beschrijft de belangrijkste onderscheidende kenmerken van de gehanteerde onderzoeksgebieden, zoals bodemomstandigheden, hydrologische omstandigheden, invloed van diepe bodemdaling en van bevingen, en de relatie met de oorzaken van de schade. Paragraaf 14.8 gaat in op de invloed van de

belangrijkste fenomenen van de mijnbouwactiviteiten, namelijk de diepe en ondiepe bodemdaling, de daarmee samenhangende invloed op de hydrologie, en de bevingen.

14.2 Beoordelingen

De afzonderlijke schades zijn beoordeeld in twee stappen.

In de eerste stap is op basis van gebouw- en omgevingsinformatie een falsificatie uitgevoerd van mogelijke oorzaken van de schade. Dit houdt in dat oorzaken die niet aan de orde kunnen zijn, in de verdere analyse niet meer worden meegenomen. Deze falsificatie is uitgevoerd op gebouwniveau.

Figuur 14.1 geeft een overzicht van het resultaat van de falsificatie. De in lichtgrijs aangegeven cellen bevatten oorzaken die niet kunnen worden gefalsificeerd en worden dus meegenomen in de beoordeling. De donkergrijze cellen zijn gefalsificeerd.

Opvallend in de resultaten na de eerste falsificatie is dat:

- In alle onderzoeksgebieden en bij alle objecten overschrijden de opgetreden trillingen ten gevolg van de aardbevingen de falsificatie-grens van 0,5 mm/s, die bij aanvang van het onderzoek is gesteld. Dat betekent dat bij geen van de objecten de invloed van de bevingen op voorhand uitgesloten kon worden (A3.5, C3.7). Deze componenten zullen dus meegenomen worden bij de beoordeling van de schade.
- In alle gevallen kan de invloed van diepe bodemdaling in termen van krommingen, hellingen en rekken op het beschouwde object worden gefalsificeerd. Hierbij wordt opgemerkt dat de invloed van lokale winningsactiviteiten op de krommingen, hellingen en rekken op de objecten in de regel een orde groter is dan de invloed van winning in het Groningenveld (C3.9).
- Dit betreft bij een groot aantal objecten de oorzaak, C1.1, vaak in combinatie met C2.1-C2.4.
- In veel gevallen zijn aanpassingen en verbouwingen van de onderzochte woningen uitgevoerd en daardoor mag de invloed hiervan op weerstand, eventuele overbelasting, verhinderde vervormingen of opgelegde vervormingen niet worden uitgesloten (A1.2, A2.3, B1.2, B2.2.).
- Incidentele overbelasting blijkt in de regel niet aan de orde te zijn ofwel hierover niet is gerapporteerd (A4.1-A4.5).
- Overbelasting door trillingen door (spoor)wegen of bouwwerkzaamheden (A3.1-A3.3) blijkt in de meeste gevallen niet aan de orde te zijn. Ditzelfde geldt voor wijzigingen die in de ondergrond zijn ontstaan door trillingen door (spoor)wegen of bouwwerkzaamheden (C3.4-C3.6).
- Initieel onvoldoende weerstand, verhinderde vervormingen op opgelegde vervormingen kunnen niet op basis van algemene contextgegevens van gebouw of omgeving worden gefalsificeerd. Deze aspecten worden in de analyse van de schade per object altijd beschouwd.

In de tweede stap is iedere schade beoordeeld op basis van de overgebleven set aan oorzaken. Er zijn mogelijke scenario's opgesteld die een verklaring kunnen bieden voor de schade. Hieruit zijn gemotiveerd ten hoogste twee best verklarende scenario's geselecteerd, die het meest plausibel zijn. Er zijn ook situaties waarin de gegevens over de schade onvoldoende duidelijk waren om tot een best verklarend scenario te komen (bijvoorbeeld slechte kwaliteit foto's, onduidelijke locatie). In dat geval is geen best verklarend scenario opgesteld. Ten slotte is het ook mogelijk dat er meer dan twee best verklarende scenario's zijn. Ook in dat geval is geen best verklarend scenario opgesteld.

- of de zettingen mogelijk een relatie hebben met geohydrologische omstandigheden (bijv. aanpassingen waterpeilen, grondwaterstand) en hierdoor gerelateerd zouden kunnen zijn aan diepe bodemdaling als gevolg van mijnbouwactiviteiten.

Met betrekking tot de invloed van bevingen valt op te merken:

- Omdat de invloed van bevingen op een schadebeeld op voorhand moeilijk vast te stellen is, is de invloed van de bevingen in meervoudige scenario's meegenomen, tenzij zij de invloed van de beving op basis van het schadepatroon of een andere eenduidige oorzaak kunnen uitsluiten. Dit leidt er toe dat de oorzaak bevingen zeer vaak voorkomt in meervoudig samengestelde scenario's. Dit zegt op voorhand nog niets over de invloed die de bevingen in dergelijke meervoudig samengestelde scenario's hebben. Die invloed is apart gewaardeerd in de toerekenbaarheid.

De best verklarende scenario's zijn per pand samengevat. Per pand is een overzicht gemaakt van de afzonderlijke oorzaken in de best verklarende scenario's. Daarmee is de vraag over de *causaliteit* beantwoord. Ook is per schade en per scenario een kwalitatieve inschatting gemaakt van de mate waarin de schade aan een oorzaak uit het scenario *toerekenbaar* is. De bevindingen per pand zijn vervolgens vergeleken per onderzoeksgebied, per bouwtype en per bouwjaarklasse.

14.3 Waargenomen schade per gebied, bouwwerkklasse en bouwtype

Het totaal aantal waargenomen en beoordeelde schades bedraagt 2418. Elke beoordeelde schade is geclassificeerd in termen van de omvang van de schade, gemeten naar scheurwijdte in de categorieën < 0,3 mm (Licht - L), tussen 0,3 en 3,0 mm (Middel -M) en groter dan 3,0 mm (Zwaar - Z). Daar waar de scheurwijdte niet stond vermeld in de schade opnameopname rapporten, is een inschatting gemaakt gebaseerd op de beschikbare foto's. Het resultaat is toegelicht in tabel 4.2. Elke schade is ook geclassificeerd volgens de indeling van De Vent naar het type schade. Van elke schade is ook vastgelegd of deze zich aan de buitenzijde van een pand bevindt of aan de binnenzijde, dus in binnenmuren of aan de binnenzijde van buitengevels.

In de tabellen 14.3 tot en met 14.5 zijn de schades per pand gecategoriseerd naar de mate van de schade volgens tabel 14.2.

Classificatie	Omschrijving mate van schade
Lichte scheur	Scheur met een scheurwijdte $w \leq 0,3$ mm. Deze scheuren zijn vaak niet zichtbaar in de overzichtsfoto van het geveldeel.
Middelmatige scheur	Meeste waargenomen scheuren. Scheurwijdtes tussen 0,3 mm en 3 mm.
Zware scheur	Zware scheuren met een scheurwijdte $w > 3$ mm. Deze scheurwijdtes zijn vaak duidelijk zichtbaar in overzichtsfoto's van gevels. Vaak ook een significante scheurlengte, die van geveluiteinde tot geveluiteinde loopt of geheel van sparring tot uiteinde geveldeel. In sommige gevallen ook vervorming uit het vlak waarneembaar.

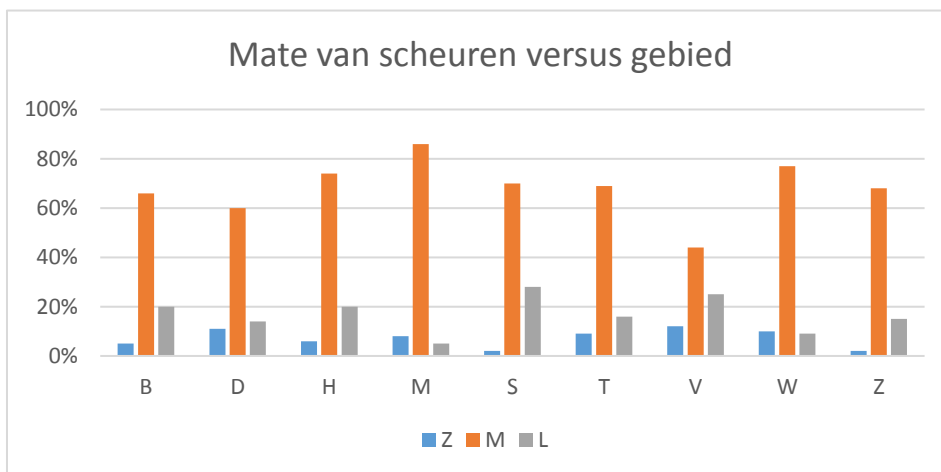
Tabel 14.2: Overzicht van de classificatie van de mate van de schade.

De getallen geven de verhoudingen van alle schades per gebied, per bouwtype en naar bouwjaarklasse. Hierbij wordt opgemerkt dat dit een weergave is van uitsluitend de panden die in het onderzoek zijn betrokken en dus niet een representatieve weergave is van een gebied of een

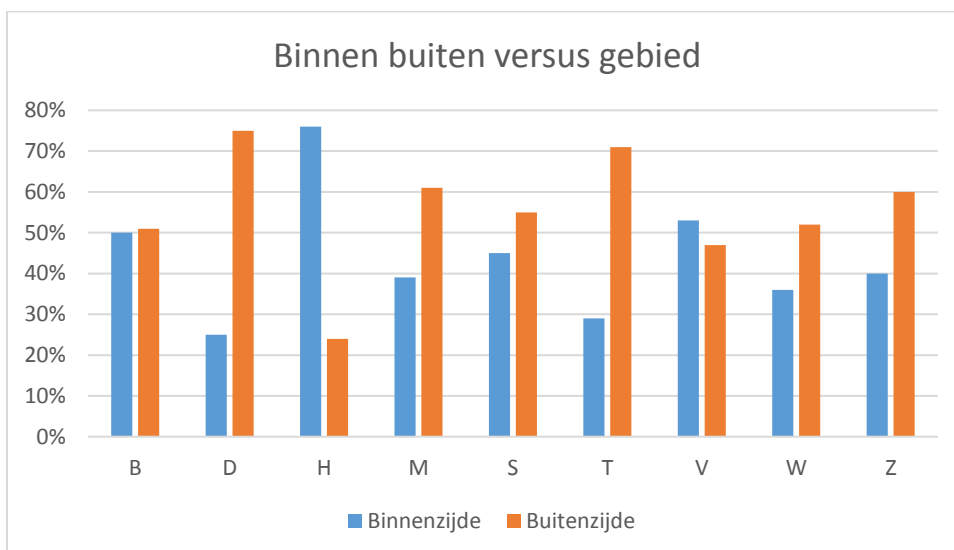
gebouwtype. Verder merken we op dat in de tabellen de som van de classificaties van de schade niet altijd sluit op 100 %, omdat sommige schades niet konden worden geclassificeerd.

Gebied	classificatie			Locatie in gebouw	
	Zwaar	Matig	Licht	Binnenzijde	Buitenzijde
B - Bedum e.o.	5%	66%	20%	50%	51%
D - Woldendorp e.o.	11%	60%	14%	25%	75%
H - Groningen/Haren	6%	74%	20%	76%	24%
M - De Marne	8%	86%	5%	39%	61%
S - Slochteren	2%	70%	28%	45%	55%
T - 't Zandt e.o.	9%	69%	16%	29%	71%
V - Veendam e.o.	12%	44%	25%	53%	47%
W - Winschoten e.o.	10%	77%	9%	36%	52%
Z - Zuidhorn	2%	68%	15%	40%	60%

Tabel 14.3: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden in een gebied



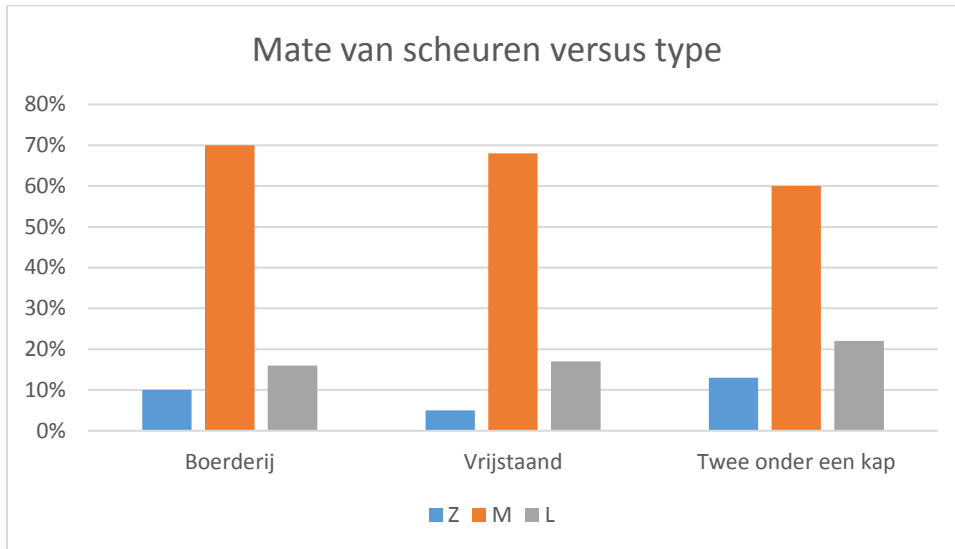
Figuur 14.1: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages over alle panden in een gebied



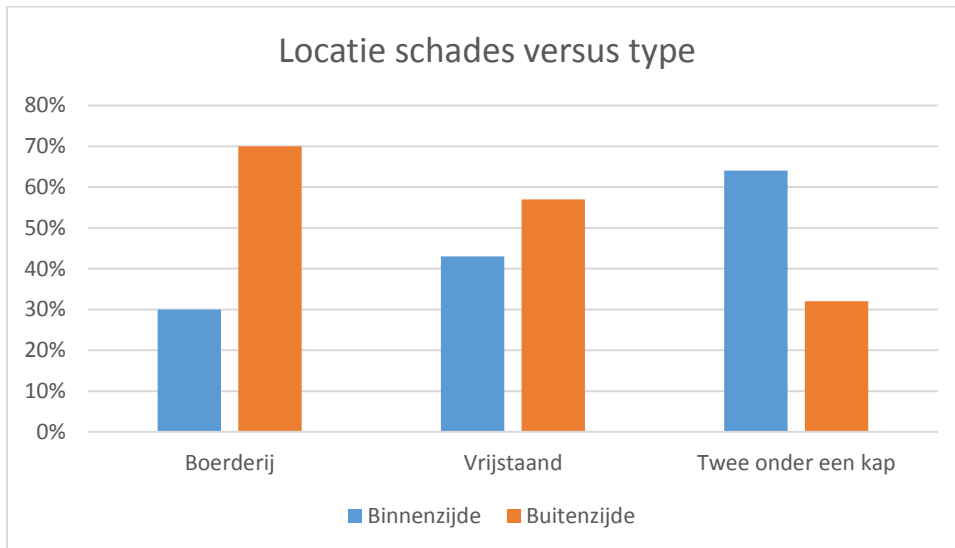
Figuur 14.2: Overzicht van de locatie van de schades in percentages over alle panden in een gebied

Gebouwtipe	Classificatie			Locatie in gebouw	
	Zwaar	Matig	Licht	Binnenzijde	Buitenzijde
Boerderij	10%	70%	16%	30%	70%
Vrijstaand	5%	68%	17%	43%	57%
Twee onder een kap	13%	60%	22%	64%	32%

Tabel 14.4: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden van een gebouwtipe



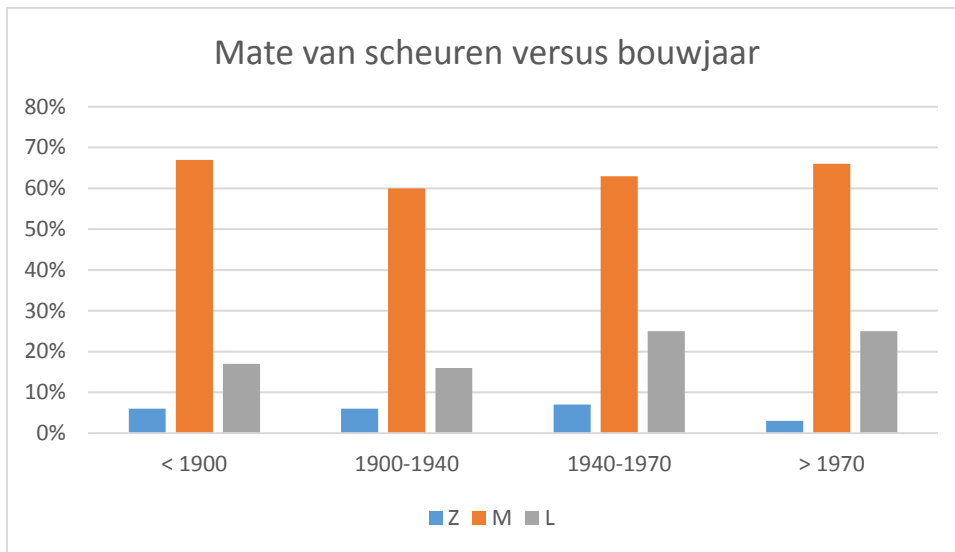
Figuur 14.3: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages over alle panden van een gebouwtipe



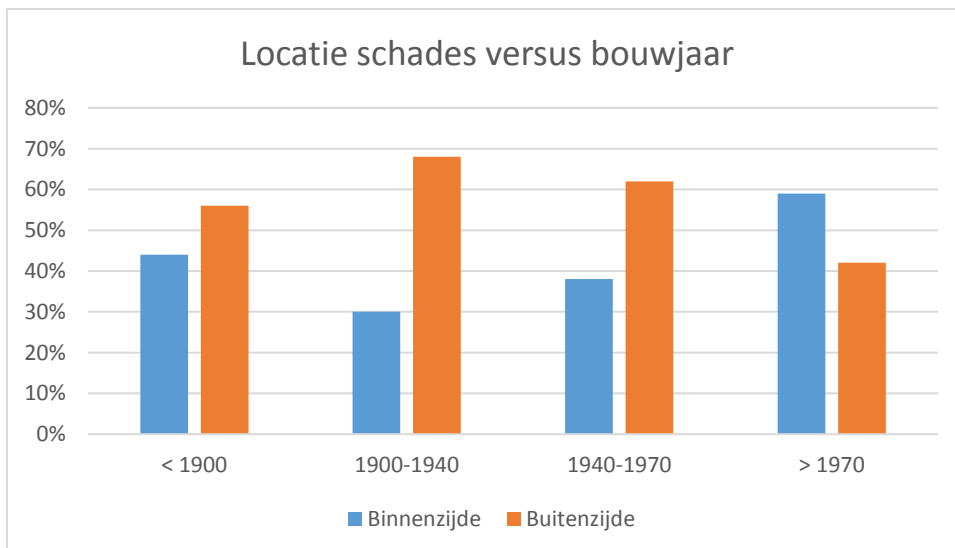
Figuur 14.4: Overzicht van de locatie van de schades in percentages over alle panden van een gebouwtipe

Bouwjaar	Classificatie			Locatie in gebouw	
	Zwaar	Matig	Licht	Binnenzijde	Buitenzijde
< 1900	6%	67%	17%	44%	56%
1900-1940	6%	60%	16%	30%	68%
1940-1970	7%	63%	25%	38%	62%
> 1970	3%	66%	25%	59%	42%

Tabel 14.5: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse



Figuur 14.5: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse



Figuur 14.6: Overzicht van de locatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse

Bespreking van de resultaten – mate van de schade en locaties van de schade

Het zwaartepunt van de waargenomen schade ligt in de categorie M (scheurwijdten tussen 0,3 en 3 mm). Daarbij vallen de bouwjaarklassen 1900-1940 en na 1970 op, doordat daar het percentage schade in categorie Z (scheurwijdte groter dan 3 mm) relatief laag is.

Wat betreft de locatie van de schade valt op dat bij de bouwjaarklassen tot 1970 de schade voor het merendeel aan de buitenzijde wordt gerapporteerd. Voor de bouwjaarklasse na 1970 is dit beeld anders, hier wordt het grootste deel van de schade aan de binnenzijde aangetroffen. Een vergelijkbaar verschil vinden we tussen boerderijen en vrijstaande woningen enerzijds, met de schade in meerderheid aan de buitenzijde, en de twee onder één kap woningen met de meeste schade aan de binnenzijde. Beide waarnemingen hangen samen, immers de twee onder één kap woningen zijn in meerderheid woningen van recente datum.

Bespreking van de resultaten – classificatie volgens De Vent

Met betrekking tot de schadeclassificatie van De Vent is gekeken naar relaties tussen de verschillende schadetypes, zoals vermeld in bijlage E. Dit is gedaan door het aandeel van de schadetypes te bepalen ten opzichte van het totaal aantal schades. Uit deze relaties konden geen structurele verbanden afgeleid tussen bouwjaarklassen of bouwtypen en evenmin tussen de verschillende onderzoeksgebieden en omstandigheden die in het onderzoek zijn onderscheiden.

14.4 Oorzaken en toerekenbaarheid van schade per gebied, bouwwerkklasse en bouwtype

14.4.1 Overzicht geïdentificeerde oorzaken in scenario's bij alle objecten

Per pand is verzameld wat de oorzaken in de belangrijkste best verklarende scenario's zijn. Tabel 14.6 geeft een beeld van de oorzaken die in de scenario's een rol spelen.

14.4.2 Samenstelling en identificatie van de best verklarende scenario's

Van alle beoordeelde schades is in 70 % van de gevallen een best verklarende scenario opgesteld. Dit betekent dat in 30 % van de gevallen geen best verklarend scenario is gevonden, omdat er onvoldoende informatie was om een oordeel op te baseren, of omdat er teveel mogelijke scenario's over bleven. In de tabellen 14.7 tot en met 14.9 zijn de belangrijkste resultaten uit de beoordeling van de schades en over het opstellen van de best verklarende scenario's samengevat.

Gebied	# schades gemiddeld per pand	% benoemde best verklarende scenario's gemiddeld per pand
Bedum e.o.	66,3	62%
Woldendorp e.o.	26,7	77%
Groningen/Haren	21,8	90%
De Marne	25,7	69%
Slochteren e.o.	22,1	58%
't Zandt e.o.	32,7	59%
Veendam e.o.	36,3	72%
Winschoten e.o.	17,4	85%
Zuidhorn	32,9	72%

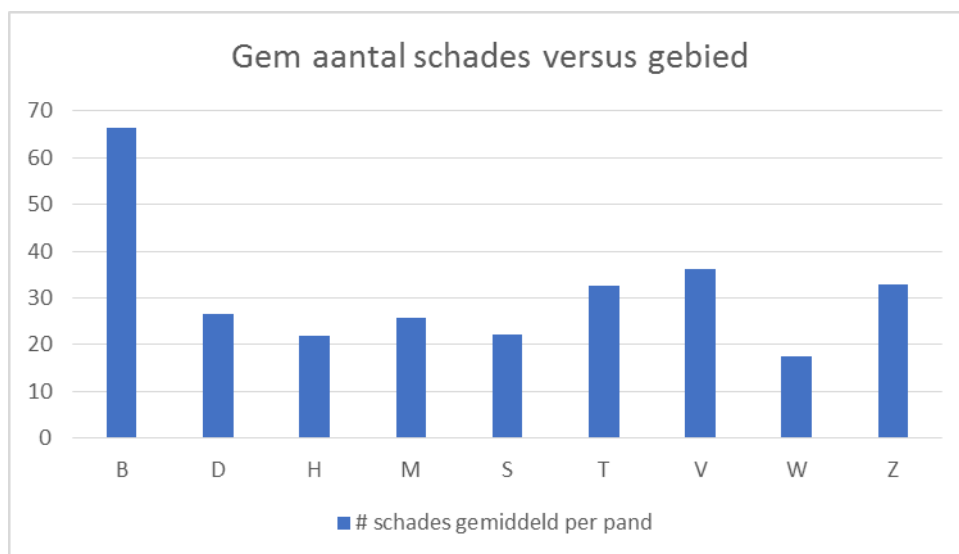
Tabel 14.7: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar onderzoeksgebied

Gebouwtype	# schades gemiddeld per pand	% benoemde best verklarende scenario's gemiddeld per pand
Boerderij	41,1	62%
Vrijstaand	33,6	72%
Twee onder een kap	26,5	73%

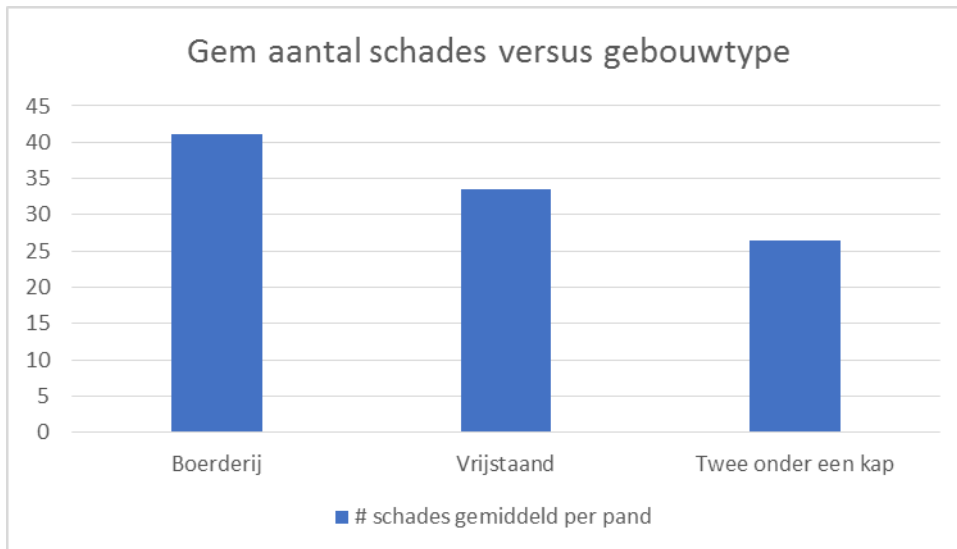
Tabel 14.8: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwtype

Bouwjaar	# schades gemiddeld per pand	% benoemde best verklarende scenario's gemiddeld per pand
< 1900	52,6	66%
1900-1940	29,1	70%
1940-1970	22,6	69%
> 1970	25,6	73%

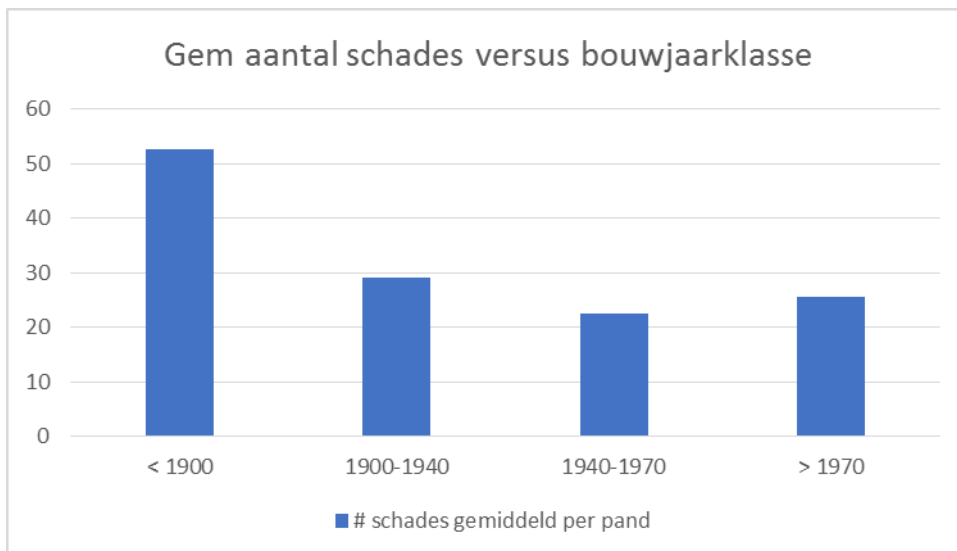
Tabel 14.9: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse



Figuur 14.7: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar onderzoeksgebied



Figuur 14.8: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwtype



Figuur 14.9: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse

Bespreking van de resultaten – aantallen schades en benoemde best verklarende scenario's

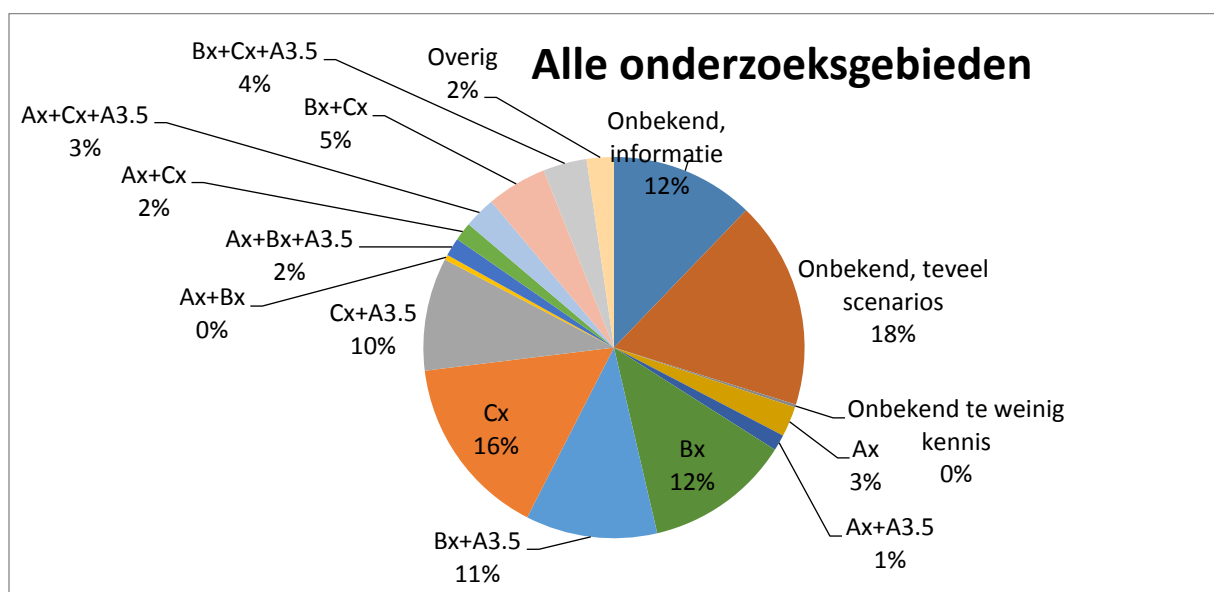
Omdat het over het algemeen weinig panden per gebied betreft, is grote voorzichtigheid geboden bij het toepassen van statistiek op deze data. Toch blijkt uit bovenstaande overzichten dat gemiddeld aantal schades per pand in de 9 gebieden niet sterk uiteenloopt. Ook het gemiddelde van het percentage benoemde beste verklarende scenario's per pand varieert niet sterk tussen de verschillende onderzoeksgebieden.

Het gemiddeld aantal schades in boerderijen is aanzienlijk groter dan bij vrijstaande woningen en bij twee onder een kap woningen. Hierbij spelen de gemiddeld grotere omvang van boerderijen, de complexere constructie en de gemiddeld grotere ouderdom van deze panden een rol. Vrijstaande woningen en twee onder een kap woningen geven in dit onderzoek vergelijkbare gemiddelde aantallen schades per pand. Het gemiddelde van het percentage benoemde beste verklarende

scenario's per pand stemt goed overeen bij vrijstaande woningen en twee onder een kap woningen, bij boerderijen is dit percentage aanzienlijk lager.

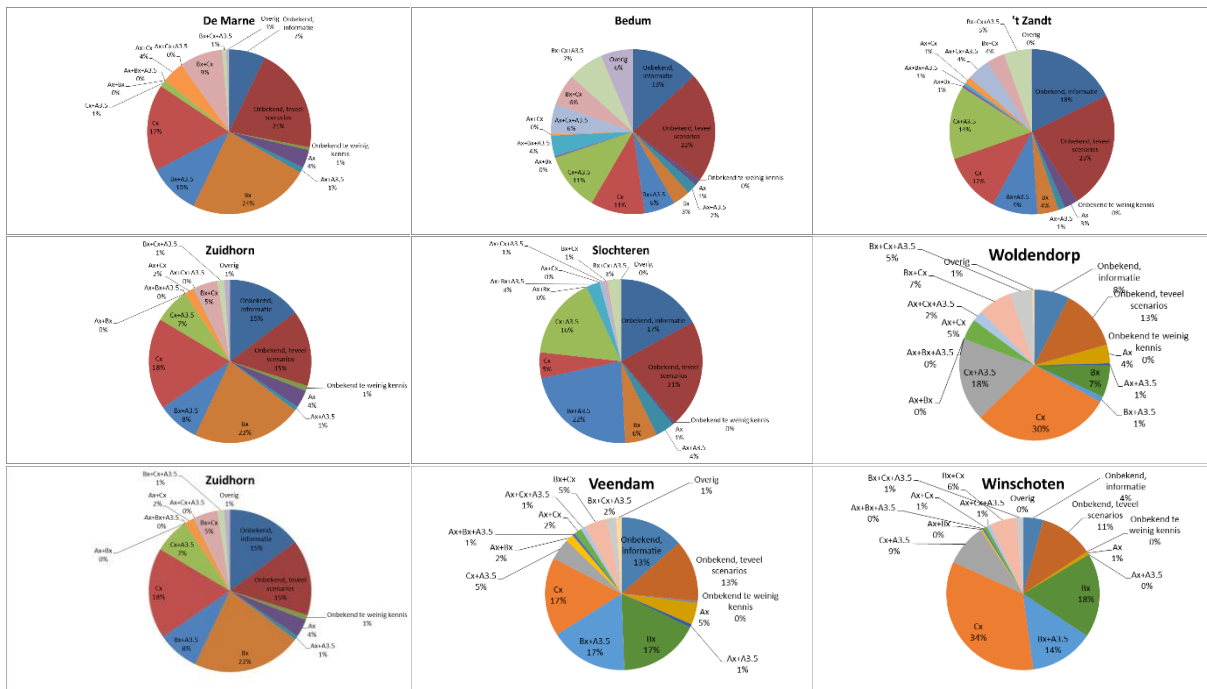
Het aantal schades lijkt toe te nemen naarmate een gebouw ouder is, met uitzondering van de bouwjaarperiode 1940-1970. Dit beeld wordt in zekere mate beïnvloed door de omstandigheid dat veel boerderijen in het onderzoek een bouwjaar voor 1900 hebben, en deze hebben van zichzelf al een groter gemiddeld aantal schades. Het gemiddelde van het percentage benoemde beste verklarende scenario's per pand varieert binnen een bandbreedte van 10 % tussen de verschillende bouwjaarklassen.

Deze oorzaken kunnen zelfstandig een best verklarend scenario vormen. Zij kunnen ook een best verklarend scenario vormen met één andere oorzaak of met meer dan één andere oorzaak. In figuur 14.10 is de samenstelling van de gevonden best verklarende scenario's voor alle gebieden samen weergegeven. Zoals uit de figuur blijkt, komt de oorzaak 'overbelasting door trillingen' (A3.5) in ruim 30 % van alle best verklarende scenario's voor.



Figuur 14.10: Overzicht van de samenstelling van de best verklarende scenario's per schade (totaaloverzicht).

In figuur 14.11 is een overzicht van de best verklarende scenario's voor alle onderzoeksgebieden afzonderlijk weergegeven. De samenstellende figuren zijn in bijlage G op een grotere schaal opgenomen. Opvallend is dat het percentage niet vastgestelde schades waarvoor geen best verklarend scenario kon worden vastgesteld, in de onderzoeksgebieden Bedum, Slochteren en 't Zandt aanzienlijk groter is dan in de overige onderzoeksgebieden. Met name het percentage van de schades waarin er te veel scenario's beschikbaar waren ligt in deze gebieden hoger.



Figuur 14.11: Overzicht van de samenstelling van de best verklarende scenario's per schade (overzicht over alle 9 onderzoeksgebieden)

Zoals uit de figuur blijkt, komt de oorzaak 'overbelasting door trillingen' (A3.5) in ruim 30 % van alle best verklarende scenario's voor. Dit is ook het geval bij beschouwing van de onderzoeksgebieden afzonderlijk. Het betreft een zeer systematisch beeld dat voor een deel zijn oorzaak vindt in de gehanteerde beoordelingsprocedure. De achtergrond hiervan is als volgt. Alleen bij schades waar de invloed van de beving kan worden gefalsificeerd op basis van het schadebeeld en op basis van meer plausible andere oorzaken, is de beving niet in de best verklarende scenario's meegenomen. Als dit niet het geval is, is aangenomen dat enige invloed van een aardbeving mogelijk is, althans niet uit te sluiten is. De mate waarin de aardbeving in deze scenario's invloed heeft, wordt verder besproken onder de technische toerekenbaarheid naar de afzonderlijke oorzaken.

14.4.3 Toerekening aan afzonderlijke oorzaken in de scenario's

De toerekening van de schade naar de afzonderlijke elementen in de best verklarende scenario's is de laatste stap in de beoordeling. Deze toerekening brengt tot uitdrukking in welke mate de afzonderlijke oorzaken hebben bijgedragen tot het overschrijden van bijvoorbeeld een uiterste opneembare rek in een muur, waardoor een schade is ontstaan. De toerekening gaat niet over de volgorde waarin de elementen uit de scenario's hebben gewerkt. De toerekening volgt uit de *expert judgements* en zijn kwalitatief verwoord, omdat een kwantitatieve uitdrukking een veel te grote nauwkeurigheid zou suggereren. In onderstaande tabellen zijn de resultaten weergegeven per gebied, per bouwjaarklasse en per gebouwtype. De bij de beoordeling gehanteerde kwalitatieve schaal voor de technische toerekenbaarheid is hieronder vermeld.

Kwalificatie	Orde van grootte
<i>(vrijwel) geen</i>	<i>minder dan 1 %</i>
<i>zeer klein</i>	<i>tussen 1 % en 10 %</i>
<i>klein</i>	<i>tussen 10 % en 33 %</i>
<i>middelmatig</i>	<i>tussen 33 % en 66 %</i>
<i>groot</i>	<i>tussen 66 % en 90 %</i>
<i>zeer groot</i>	<i>tussen 90 % en 99 %</i>
<i>(vrijwel) volledig</i>	<i>groter dan 99 %</i>

Tabel 14.10: Gehanteerde kwalificatie van de toerekenbaarheid

Om de resultaten van verschillende panden makkelijker te kunnen vergelijken, zijn de oorzaken in de scenario's geaggregeerd tot drie hoofdgroepen van oorzaken, te weten (1) gebouwgebonden, (2) bevingen en (3) ongelijkmatige zettingen.

Toerekening aan gebouwgebonden oorzaken (verhinderde en opgelegde vervormingen, overbelasting of onvoldoende sterkte)

Uit het schadebeeld kan in de meeste gevallen vastgesteld worden dat gebouwgebonden aspecten, zoals verhinderde vervormingen, opgelegde vervormingen, overbelasting of onvoldoende sterkte een belangrijke rol spelen en dus een relevante component in een best verklarend scenario zijn. Het onderscheid tussen verhinderde en opgelegde vervormingen is overigens niet in al deze gevallen goed te maken. De toerekening van de schade naar de afzonderlijke invloed van verhinderde en opgelegde vervormingen is zonder diepgaande analyses niet kwantitatief te maken. Om die reden is de toerekenbaarheid geformuleerd in de vorm van een kwalitatieve uitspraak.

Toerekening aan aardbevingen in scenario's

Bij de beoordeling van de schade is in dit onderzoek vastgesteld dat schade door lichte trillingen van aardbevingen in gebouwen als zodanig voor de experts niet herkenbaar is. Dergelijke aardbevingen leveren geen karakteristieke of naar aard herkenbare schade. Dit wordt bij lage trillingsniveaus vooral veroorzaakt, doordat gebouwen de door aardbevingen opgelegde spanningen en vervormingen gedeeltelijk opvangen in de vorm van flexibiliteit die de gebouwen zelf hebben. Waar deze flexibiliteit te kort schiet kunnen scheuren ontstaan, die een vergelijkbare plaats en patroon kunnen hebben als bijvoorbeeld ten gevolge van zettingen, verhinderde vervormingen of opgelegde vervormingen. De flexibiliteit om de aardbevingsbelasting op te vangen kan ook deels gevonden worden in reeds aanwezige scheuren, die al door een andere oorzaak zijn ontstaan. Bestaande scheuren *kunnen* groter worden door bevingen, eerder gerepareerde scheuren die alleen zijn opgevuld zonder dat een constructief verband is hersteld, kunnen dus weer gaan open staan als gevolg van bevingen.

In termen van causaliteit kan de rol van aardbevingen daardoor in veel gevallen noch worden gefalsificeerd, nog worden geverifieerd. Maar ook bij de bepaling van de toerekenbaarheid komt naar voren dat zonder ondersteunende informatie over de sterkte van opgetreden trillingen door de aardbeving het vrijwel onmogelijk is de toerekening aan de invloed van bevingen in schadescenario's ook maar enigszins te duiden. De toerekening van de schade aan de oorzaak bevingen is in dit onderzoek gedaan mede op basis van de ter plaatse opgetreden trillingssterkte, aan de hand van de kwalitatieve toerekeningschaal zoals aangegeven in hoofdstuk 13.

Toerekening aan de verschillende oorzaken van ongelijkmatige zettingen in de scenario's

In deze analyse op gebiedsniveau, bouwjaarklassen en gebouwtype zijn ongelijkmatige zettingen als één oorzaak gepresenteerd; per schade en per scenario is dit echter voor zover mogelijk verder uitgesplitst in de meest plausibele componenten, waaronder:

Ongelijkmatige zettingen met een interne oorzaak

- Autonome zettingen (alleen veroorzaakt door gewicht, rustende en veranderlijke belasting in het gebouw)
- Zettingen door wijzigingen in of nabij het bouwwerk (bijvoorbeeld aanbouw, verzwaren van de belasting op de funderingen)

Ongelijkmatige zettingen met een externe oorzaak

- Zettingen door tijdelijke beïnvloeding grondwaterstanden (bemalingen etc)
- Zettingen door structureel veranderde grondwaterstanden, mogelijk onder invloed van gewijzigde oppervlaktewaterstanden of gewijzigde stijghoogten in onderliggende watervoerende pakketten (bijv. door waterwinning)
- Zettingen door invloed van bomen op grondwaterstanden of vochtgehalte van de bodem
- Zettingen door de invloed van de natuurlijke seizoen dynamiek van de grondwaterstanden en met name de invloed van droge of natte perioden, inclusief zettingen door de werking van hoge en lage grondwaterstanden in taluds en in wierden
- Zettingen door wijzigingen nabij het bouwwerk (ophoging van aansluitend terrein)

Deze uitsplitsing is dus alleen uitgevoerd per schade en per onderzoeksobject.

Bij de beoordeling is echter gebleken dat de toerekening van zettingen aan verschillende deeloorzaken die tot zettingen leiden, voor de experts zeer lastig is. Voor zettingsverschijnselen die het gevolg zijn van verschillen in belasting op de fundering is dit kwantitatief nog wel mogelijk. De lintvoeg- en vloerwaterpassingen zijn een belangrijk hulpmiddel om vast te stellen of zettingsverschillen zijn opgetreden, maar daarmee is de oorzaak daarvan nog niet vastgesteld. Indien zakkingsverschijnselen gerelateerd zijn aan de grondwaterstand of aan niet homogene opbouw van de ondiepe ondergrond is dit moeilijk en zonder aanvullend onderzoek niet mogelijk. Zonder gedetailleerde informatie over de inhomogene opbouw en de eigenschappen van de ondergrond of zonder expliciete informatie over de gemiddelde grondwaterstanden, de grondwaterstanddynamiek en de extremen is zelfs een zeer kwalitatieve of indicatieve toerekening naar deeloorzaken vrijwel onmogelijk.

Wijzigingen in grondwaterstand kunnen een breed scala aan oorzaken hebben. Bij veel panden konden geen grondwaterstandgegevens in de directe nabijheid worden gevonden. In het noorden van de provincie worden de grondwaterstanden met een zeer grofmazig net gemeten. Daardoor is er slechts summiere monitoringsinformatie over de grondwaterstanden beschikbaar voor de onderzochte panden. Specifiek in het noorden van de provincie, waar de bovenlagen van de ondiepe ondergrond vooral uit klei bestaan, is het ook de vraag in hoeverre de grondwaterstand en grondwaterdynamiek invloed heeft op de eigenschappen (met name de stijfheid) van de klei, waarop is gefundeerd.

Op een aantal plaatsen, met zandige toplagen, is sprake van een slecht doorlatende laag op geringe diepte (1 à 2 m). Op die plaatsen is sprake van een schijnwaterspiegel op die slecht doorlatende laag, waar beneden een veel lagere waterstand heerst. Dat maakt het vaststellen van de effecten van waterstands dalingen gecompliceerd. Afzonderlijke invloeden die kunnen leiden tot zettingen zijn

moelijk te splitsen in termen van hun afzonderlijke bijdragen en aandeel in de toerekenbaarheid. Om die reden zijn deze bij de bepaling van de toerekening in bovenstaande samen genomen in een kwalitatief oordeel. In de tabellen 14.11-14.13 zijn de resultaten van de kwalitatieve toerekening op gebiedsniveau, per bouwtype en naar bouwjaarklasse samenvat.

Gebied	Gebouwwgebonden	Beving	Ongelijkmatige zettingen
Bedum e.o.	middelmatig	klein/middelmatig	middelmatig
Woldendorp e.o.	middelmatig	Zeër klein	middelmatig
Groningen/Haren	groot	Zeër klein	klein
De Marne	middelmatig	(vrijwel) geen	middelmatig
Slochteren e.o.	middelmatig	klein/middelmatig	klein
't Zandt e.o.	middelmatig	klein/middelmatig	middelmatig
Veendam e.o.	middelmatig	Zeër klein	middelmatig
Winschoten e.o.	middelmatig	(vrijwel) geen	middelmatig
Zuidhorn	middelmatig	(vrijwel) geen	middelmatig

Tabel 14.11: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per onderzoeksgebied

Gebouwtype	Gebouwwgebonden	Bevingen	Ongelijkmatige zettingen
Boerderij	middelmatig	zeer klein/klein	middelmatig
Vrijstaand	middelmatig	zeer klein/klein	middelmatig
Twee onder een kap	middelmatig	zeer klein	Klein-middelmatig

Tabel 14.12: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwtype

Bouwjaar	Gebouwwgebonden	Bevingen	Ongelijkmatige zettingen
< 1900	middelmatig	zeer klein/klein	middelmatig
1900-1940	middelmatig	zeer klein/klein	middelmatig
1940-1970	middelmatig	zeer klein	middelmatig
> 1970	Groot	zeer klein/klein	klein

Tabel 14.13: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwjaarklasse

Uit tabellen 14.11-14.13 valt af te leiden dat de gebouwwgebonden oorzaken en de ongelijkmatige zettingen de belangrijkste rol spelen bij het ontstaan van de schade en dus de grootste toerekenbaarheid hebben. Alleen in het onderzoeksgebied Groningen/Haren, voor de bouwjaarklasse na 1970 en voor de bouwtype Twee onder een kap is de toerekenbaarheid van de schade aan de oorzaak ongelijkmatige zettingen klein in plaats van middelmatig. De verbeterde methoden voor grondonderzoek, funderingsontwerp en uitvoering van funderingen voor deze type woningen en deze bouwjaarklasse zijn hiervan waarschijnlijk de achtergrond.

Bij tabellen 14.12 en 14.13 wordt nadrukkelijk opgemerkt dat hierin alle objecten van alle gebieden zijn meegenomen, zowel op kleine afstand tot epicentra als op grote afstand. De invloed van de toerekening aan bevingen is dus een gemiddeld beeld over alle schades en alle objecten.

14.5 Nadere beschouwing van mate, locatie, oorzaak en toerekenbaarheid van schade

In deze paragraaf zijn drie aanvullende doorsnedes gemaakt over de verzameling onderzochte objecten. Zij zijn daarbij respectievelijk onderverdeeld naar:

- a) afstand tot de epicentra van de zwaardere geïnduceerde bevingen (zie verder paragraaf 14.5.1)
- b) De omstandigheid of grote lokale bodemdaling of grote peilaanpassingen hebben plaatsgevonden (zie verder paragraaf 14.5.2)
- c) De mate van stijfheid van de ondiepe ondergrond (zie verder paragraaf 14.5.3)

14.5.1 Afstand tot de epicentra van zware geïnduceerde bevingen

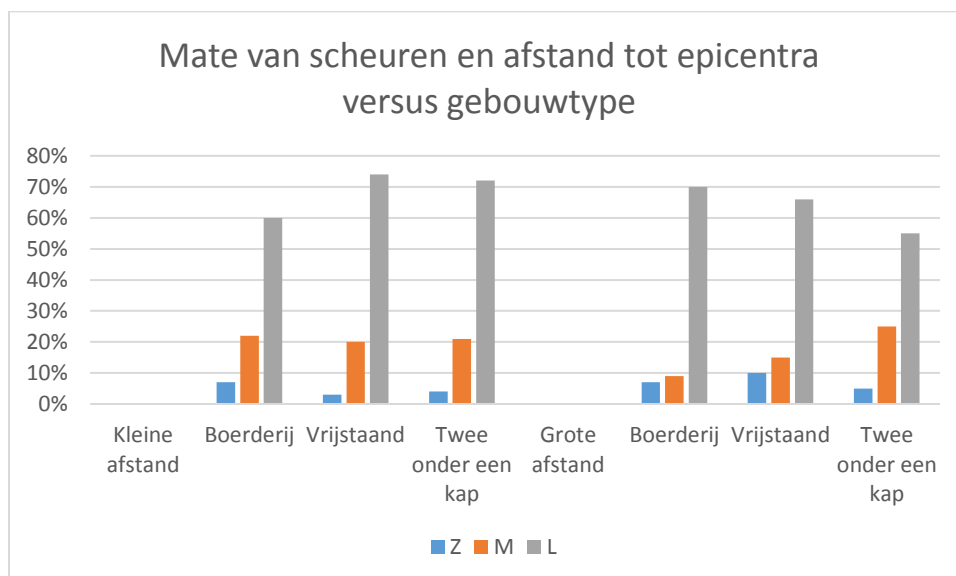
Wat betreft de afstand tot de epicentra van de zwaardere geïnduceerde bevingen is onderscheid in gebieden Bedum, Slochteren en 't Zandt (B, S, T) enerzijds en Woldendorp, De Marne, Groningen/Haren, Veendam, Winschoten en Zuidhorn (D, H, M, V, W, Z) anderzijds. In tabellen 14.14a en 14.14b is de mate en locatie van de schade uitgesplitst naar onderzoeksgebieden op kleine en grote afstand tot de epicentra van de zwaardere bevingen. De figuren 14.10a tot en met 14.10d geven een grafische weergave.

	Kleine afstand (gebieden B,S,T)					Grote afstand (gebieden D,H,M,V,W,Z)				
	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu
B	7%	60%	22%	47%	53%	7%	70%	9%	38%	62%
V	3%	74%	20%	43%	59%	10%	66%	15%	39%	60%
T	4%	72%	21%	64%	36%	5%	55%	25%	60%	34%

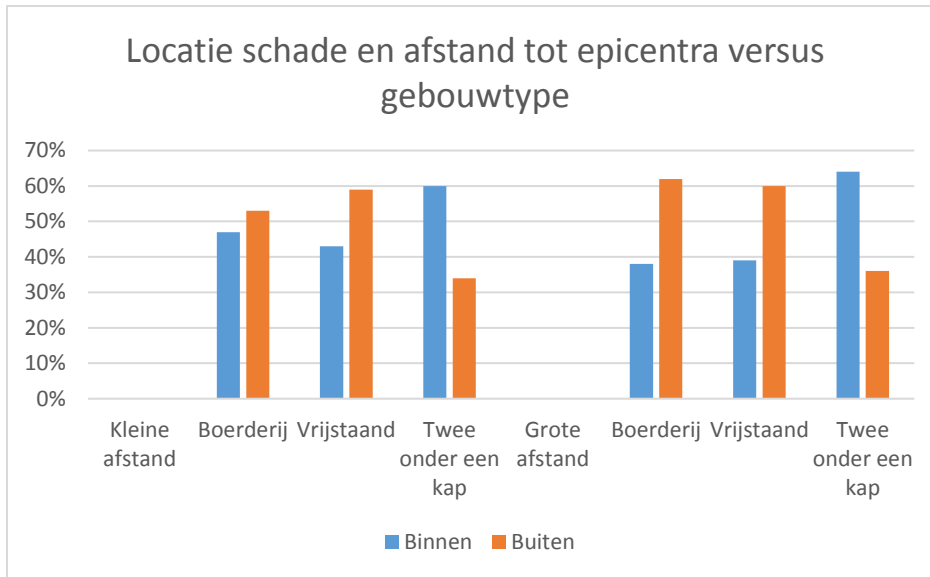
Tabel 14.14a: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden naar bouwtype. NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder één kap, Bi = binnen, Bu = buiten

	Kleine afstand (gebieden B,S,T)					Grote afstand (gebieden D,H,M,V,W,Z)				
	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu
<1900	5%	65%	19%	54%	46%	7%	63%	14%	42%	58%
1900-1940	8%	64%	25%	28%	72%	8%	66%	11%	27%	69%
1940-1970	1%	61%	33%	33%	67%	14%	79%	6%	29%	71%
>1970	2%	77%	15%	53%	47%	8%	56%	27%	67%	33%

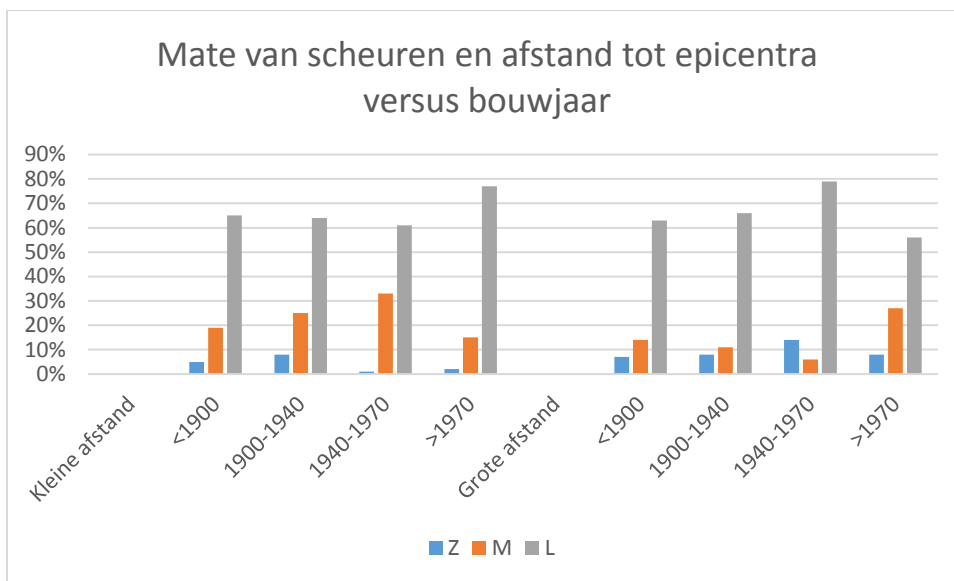
Tabel 14.14b: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse. NB: Bi = binnen, Bu = buiten



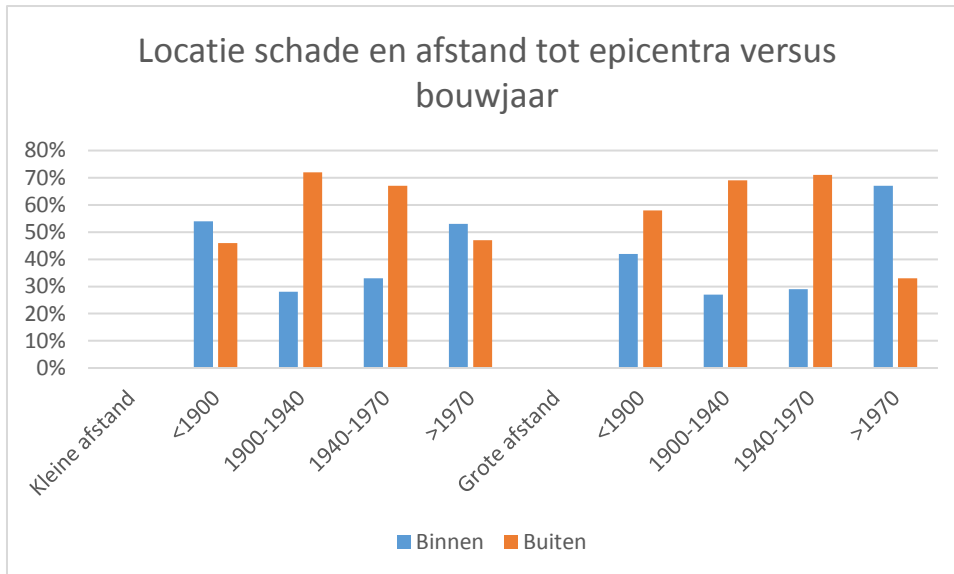
Figuur 14.10a: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages over alle panden naar bouwtype



Figuur 14.10b: Overzicht van de locatie van de schades in percentages over alle panden naar gebouwtype



Figuur 14.10c: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse



Figuur 14.10d: Overzicht van de locatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse

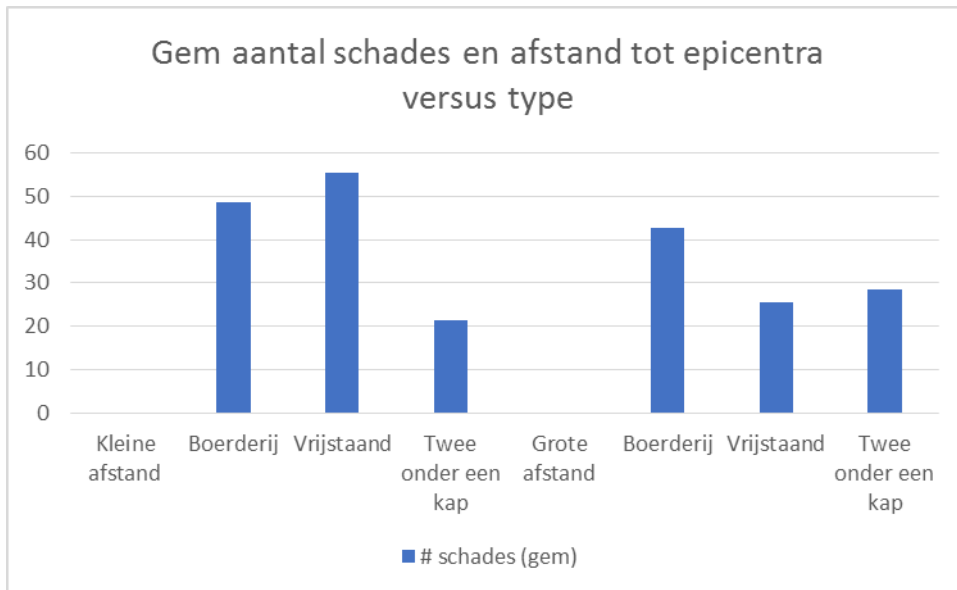
In tabellen 14.15a en 14.15b is het gemiddelde aantal schades aangegeven per gebouwtype en bouwjaarklasse, afhankelijk van de afstand tot de epicentra van de zwaardere geïnduceerde bevingen, en het percentage van de benoemde best verklarende scenario's. Figuren 14.11a en 14.11b geven een grafische weergave van deze resultaten

	Kleine afstand (gebieden B,S,T)		Grote afstand (gebieden D,H,M,V,W,Z)	
	# schades (gem)	% scenario's	# schades (gem)	% scenario's
Boerderij	48,5	54%	42,8	69%
Vrijstaand	55,4	68%	25,6	76%
Twee onder een kap	21,3	44%	28,5	82%

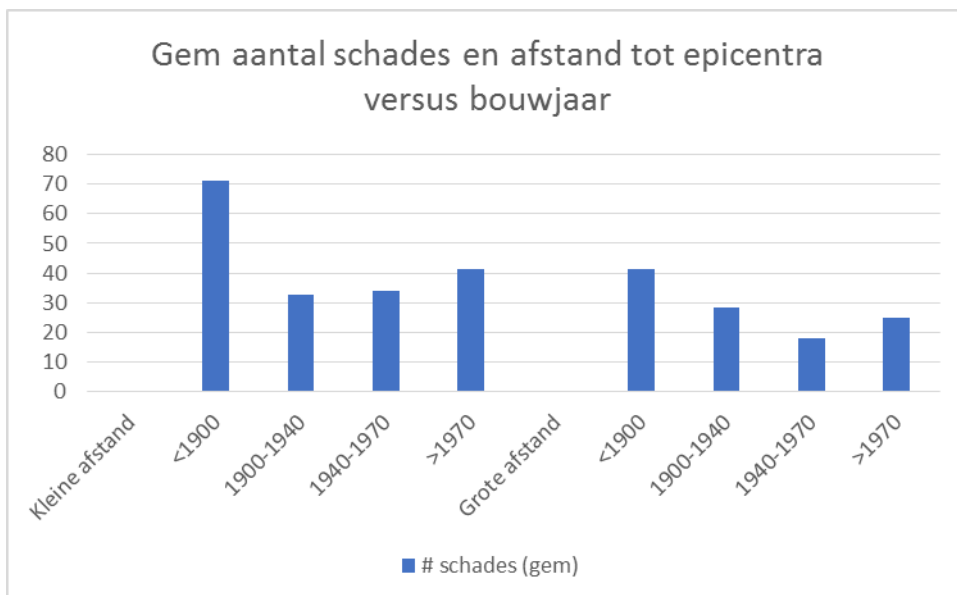
Tabel 14.15a: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar gebouwtype

	Kleine afstand (gebieden B,S,T)		Grote afstand (gebieden D,H,M,V,W,Z)	
	# schades (gem)	% scenario's	# schades (gem)	% scenario's
<1900	71,3	59%	41,2	76%
1900-1940	32,8	68%	28,4	72%
1940-1970	34,0	63%	18,0	78%
>1970	41,2	61%	24,8	78%

Tabel 14.15b: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse



Figuur 14.11a: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwtype



Figuur 14.11b: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse

Uit tabellen 14.14 en 14.15 blijkt geen belangrijke invloed van de afstand tot de epicentra van de zware bevingen en de verdeling van de mate van de schade en de locatie van de schade

De gemiddelde aantallen schade per pand (bezien naar bouwtype en bouwjaarklasse) laten ook geen belangrijke verschillen zien, behalve voor de bouwjaarklasse voor 1900 en bouwtype vrijstaande woning. Het aantal schades in die categorie is duidelijk groter op korte afstand tot de epicentra.

Het percentage benoemde scenario's ligt op korte afstand tot de epicentra van de zwaardere bevingen aanzienlijk lager. Dit valt voornamelijk te wijten aan de (in het algemeen) geringere kwaliteit van de bouwkundige schadeopname rapporten in deze gebieden. Het betreft in deze gebieden namelijk veelal oudere (voor 2016) opgemaakte schadeopname rapporten.

In de onderstaande tabellen is een kwalitatieve toerekening van de rol van de oorzaken in de best verklarende scenario's gegeven, afhankelijk van de stand tot de epicentra van de zwaardere bevingen.

Gebied	Gebouwwgebonden	bevingen	Ongelijkmatige zettingen
Kleine afstand	middelmatig	Klein/middelmatig	Klein/middelmatig
Grote afstand	middelmatig	Zeer klein	middelmatig

Tabel 14.16a: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's afhankelijk van de afstand tot de epicentra van de zwaardere geïnduceerde bevingen

	Kleine afstand tot epicentra			Grote afstand tot epicentra		
	Gebouw gebonden	Bevingen	Zetting	Gebouw gebonden	Bevingen	zettingen
B	middelmatig	Klein/middelmatig	middelmatig	middelmatig	(vrijwel) geen	middelmatig
V	middelmatig	Klein/middelmatig	middelmatig	middelmatig	zeer klein	middelmatig
T	middelmatig	Klein/middelmatig	klein	middelmatig	zeer klein	klein

Tabel 14.16b: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwtype. NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder een kap.

	Kleine afstand tot epicentra			Grote afstand tot epicentra		
	Gebouw gebonden	Bevingen	Zetting	Gebouw gebonden	Bevingen	zettingen
<1900	middelmatig	Klein/middelmatig	middelmatig	middelmatig	(vrijwel) geen	middelmatig
1900-1940	middelmatig	Klein/middelmatig	middelmatig	middelmatig	(vrijwel) geen	middelmatig
1940-1970	middelmatig	Klein/middelmatig	klein	middelmatig	zeer klein	middelmatig
>1970	middelmatig	klein/middelmatig	klein	groot	zeer klein	klein

Tabel 14.16c: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwjaarklasse

Uit tabellen 14.16a-14.16c blijkt een systematisch verschil in toerekening van de oorzaak bevingen tussen de gebieden op grote en kleine afstand tot de epicentra van de zwaardere bevingen. Dit valt ook te verwachten, aangezien de toerekening in belangrijke mate steunt op de sterkte van de opgetreden bodemtrillingen. De toerekening aan de overige oorzaken is vergelijkbaar, behalve bij de bouwjaarklasse van na 1970 en de twee onder één kap woningen.

14.4.2 Gebieden met lokale bodemdaling en/of peilaanpassingen

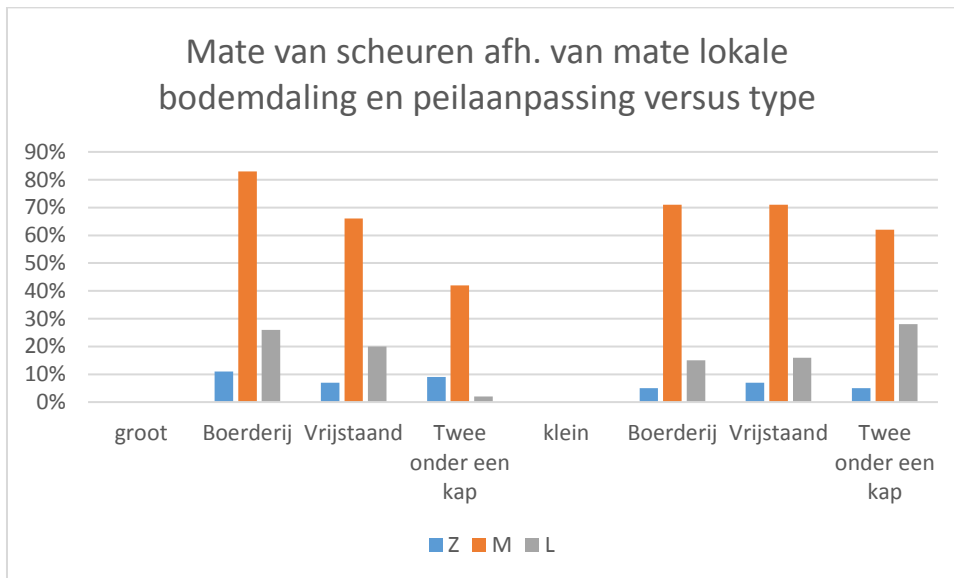
Ten behoeve van de analyse naar de invloed van grote lokale bodemdaling en peilaanpassingen is in deze paragraaf onderscheid gemaakt in objecten nabij lokale bodemdalingsgebieden (met name: Veendam, Heiligerlee, met een relatieve hoekverdraaiingen van het maaiveld (groter dan $1 \cdot 10^{-5}$) en daar waar peilaanpassingen meer dan 0,05 m hebben plaatsgevonden. Voor een splitsing op objectniveau wordt verwezen naar bijlage H. Tabellen 14.17a-14.17b geven een overzicht van de classificatie en locatie van de schade. De figuren 14.12a tot en met 14.12d geven een grafische weergave.

	Lokale bodemdaling/peilaanpassing groot					Lokale bodemdaling/peilaanpassing gering				
	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu
B	11%	83%	26%	50%	50%	5%	71%	15%	36%	64%
V	7%	66%	20%	31%	69%	7%	71%	16%	43%	57%
T	9%	42%	2%	33%	67%	5%	62%	28%	68%	32%

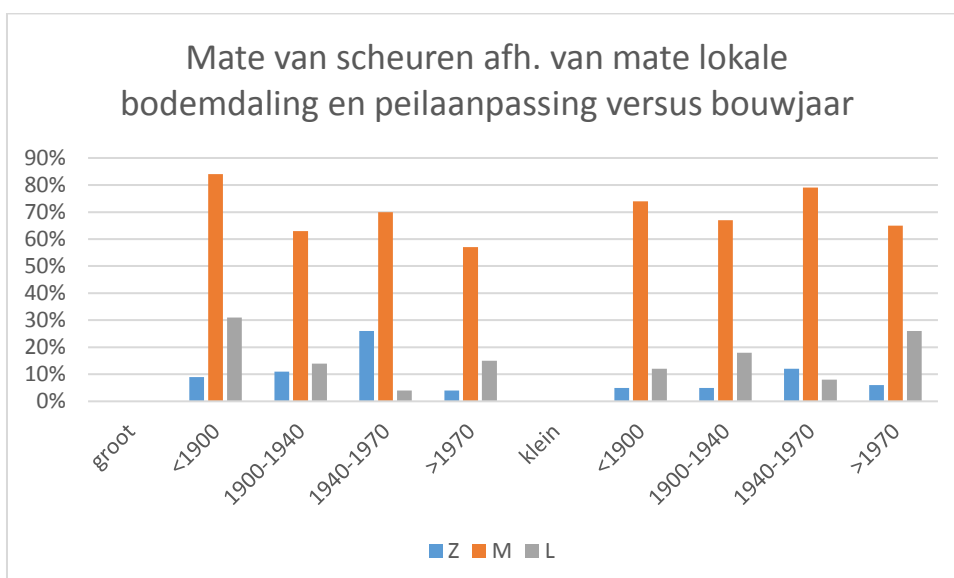
Tabel 14.17a: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden naar bouwtype. NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder één kap, Bi = binnen, Bu = buiten

	Lokale bodemdaling/peilaanpassing groot					Lokale bodemdaling/peilaanpassing gering				
	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu
<1900	9%	84%	31%	54%	46%	5%	74%	12%	44%	56%
1900-1940	11%	63%	14%	24%	76%	5%	67%	18%	29%	71%
1940-1970	26%	70%	4%	9%	91%	12%	79%	8%	37%	63%
>1970	4%	57%	15%	47%	53%	6%	65%	26%	60%	40%

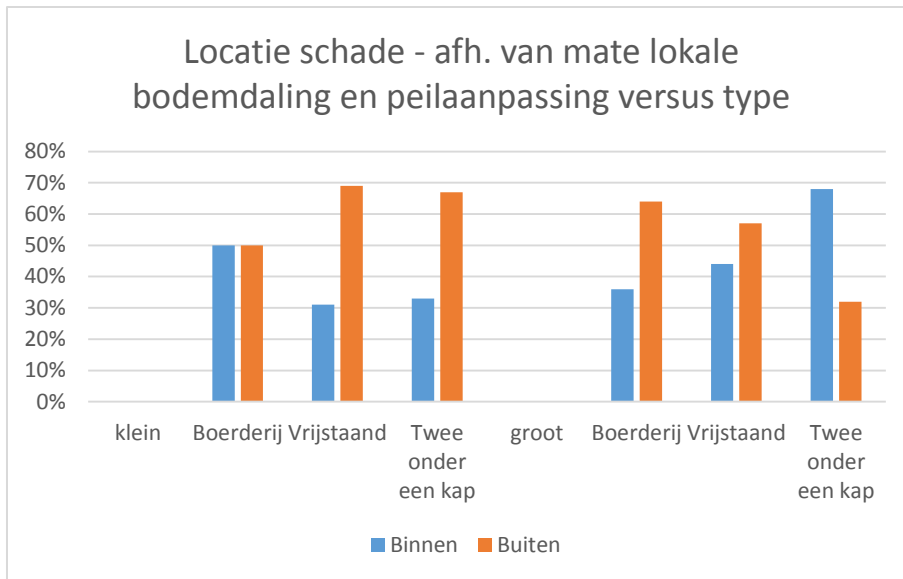
Tabel 14.17b: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse. NB: Bi = binnen, Bu = buiten



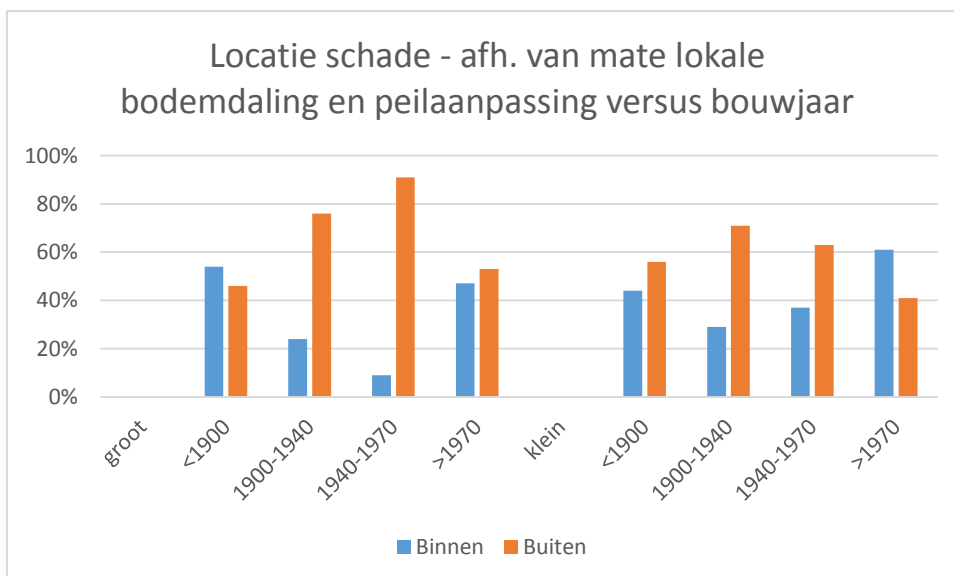
Figuur 14.12a: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages naar gebouwtype, afhankelijk van de mate van lokale bodemdaling / peilaanpassing



Figuur 14.12b: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages naar bouwjaarklasse, afhankelijk van de mate van lokale bodemdaling / peilaanpassing



Figuur 14.12c: Overzicht van locatie van de schades in percentages naar gebouwtype, afhankelijk van de mate van lokale bodemdaling / peilaanpassing



Figuur 14.12d: Overzicht van de locatie van de schades in percentages naar bouwjaar, afhankelijk van de mate van lokale bodemdaling / peilaanpassing

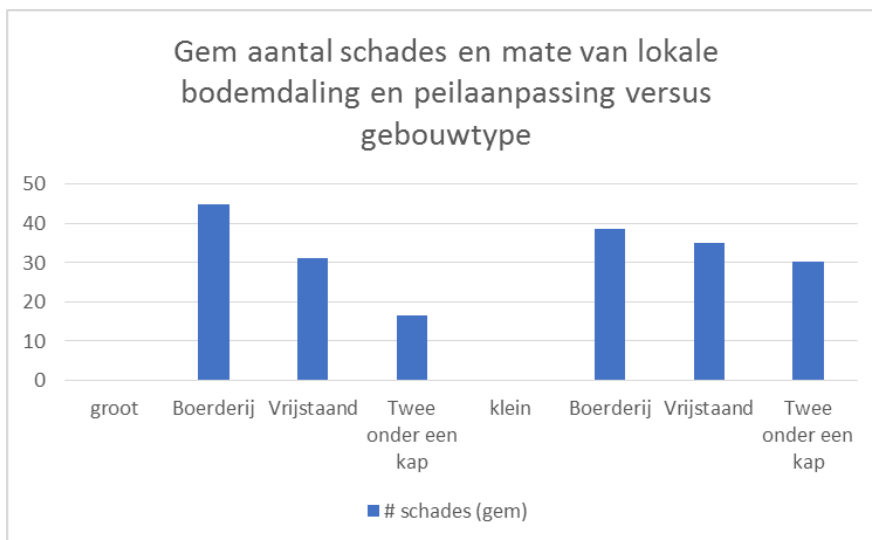
In tabellen 14.18a en 14.18b is het gemiddelde aantal schades aangegeven per gebouwtype en bouwjaar, afhankelijk van de omstandigheid van een grote of geringe lokale bodemdaling of peilaanpassing, en het percentage van de benoemde best verklarende scenario's. Figuren 14.13a en 14.13b geven een grafische weergave van deze resultaten.

	Bodemdaling/peilaanpassing groot		Bodemdaling/peilaanpassing gering	
	# schades (gem)	% scenario's	# schades (gem)	% scenario's
Boerderij	44,8	66%	38,6	59%
Vrijstaand	31,1	79%	35,1	69%
Twee onder een kap	16,7	80%	30,3	72%

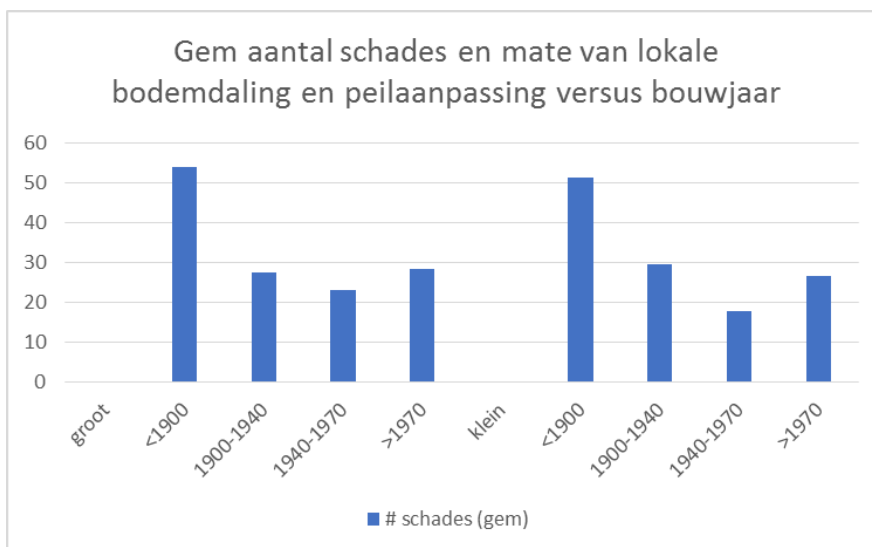
Tabel 14.18a: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwtype NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder één kap.

	Bodemdaling/peilaanpassing groot		Bodemdaling/peilaanpassing gering	
	# schades (gem)	% scenario's	# schades (gem)	% scenario's
<1900	54,0	71%	51,3	64%
1900-1940	27,4	76%	29,5	67%
1940-1970	23,0	87%	17,7	72%
>1970	28,5	70%	26,6	73%

Tabel 14.18b: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse



Figuur 14.13a: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwtype



Figuur 14.13b: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaar

In tabellen 14.19a -14.19c is de toerekenbaarheid aan oorzaken in de best verklarende scenario's uitgesplitst naar objecten met grotere dan wel kleine lokale bodemdaling en/of peilaanpassingen.

Bodemdaling/peilaanpassing	Gebouwgebonden	bevingen	Ongelijkmatige zettingen
Grote mate	middelmatig	klein	middelmatig
Kleine mate	middelmatig	klein	middelmatig

Tabel 14.19a: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's naar mate van (lokale) bodemdaling en peilaanpassingen

	Grote bodemdaling of peilaanpassingen			Geringe bodemdaling of peilaanpassingen		
	Gebouw gebonden	Bevingen	Zettingen	Gebouw gebonden	Bevingen	zettingen
B	klein	klein	middelmatig	middelmatig	klein	middelmatig
V	middelmatig	zeer klein	middelmatig	middelmatig	klein	middelmatig
T	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	klein	klein

Tabel 14.19b: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwtype. NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder één kap.

	Grote bodemdaling of peilaanpassingen			Geringe bodemdaling of peilaanpassingen		
	Gebouw gebonden	Bevingen	Zetting	Gebouw gebonden	Bevingen	zettingen
<1900	middelmatig	zeer klein	middelmatig	middelmatig	klein	middelmatig
1900-1940	middelmatig	zeer klein	middelmatig	middelmatig	klein	middelmatig
1940-1970	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	Zeer klein	middelmatig
>1970	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	Klein	klein

Tabel 14.19c: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwjaarklasse

Uit tabellen 14.19a-14.19c blijken geen grote structurele verschillen in toerekenbaarheid aan ongelijkmatige zettingen in gebieden waar de (lokale) bodemdaling relatief groot is of waar relatief grotere peilaanpassingen zijn gedaan.

14.4.3 Gebieden met stijve versus slappe ondiepe ondergrond

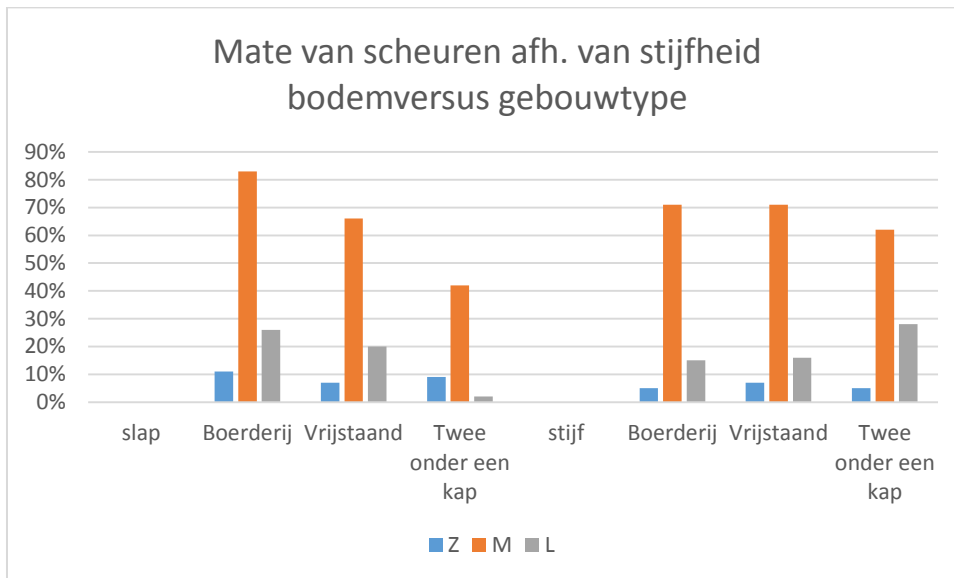
Ten behoeve van de analyse naar de invloed van de stijfheid van de bodem is onderscheid op pandniveau tussen relatief stijve ondiepe ondergrond/draagkrachtige ondiepe ondergrond versus relatief slappe ondiepe ondergrond. Voor de splitsing op objectniveau wordt verwezen naar bijlage G. Tabellen 14.20a-14.20b geven een overzicht van de classificatie en locatie van de schade. De figuren 14.14a tot en met 14.14d geven een grafische weergave.

	Stijfheid bodem klein					Stijfheid bodem groot				
	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu
B	11%	83%	26%	42%	58%	5%	71%	15%	53%	47%
V	7%	66%	20%	41%	59%	7%	71%	16%	43%	57%
T	9%	42%	2%	23%	77%	5%	62%	28%	66%	34%

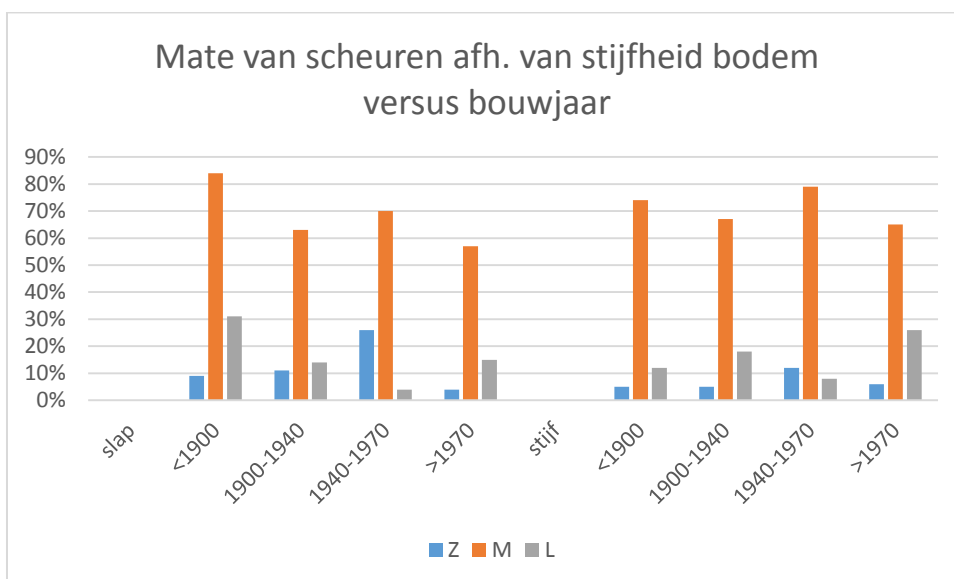
Tabel 14.20a: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden naar bouwtype. NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder één kap, Bi = binnen, Bu = buiten

	Stijfheid bodem klein					Stijfheid bodem groot				
	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu	Zwaar	Matig	Licht	Bi	Bu
<1900	9%	84%	31%	47%	53%	5%	74%	12%	57%	43%
1900-1940	11%	63%	14%	27%	73%	5%	67%	18%	34%	66%
1940-1970	26%	70%	4%	32%	68%	12%	79%	8%	23%	77%
>1970	4%	57%	15%	51%	49%	6%	65%	26%	70%	30%

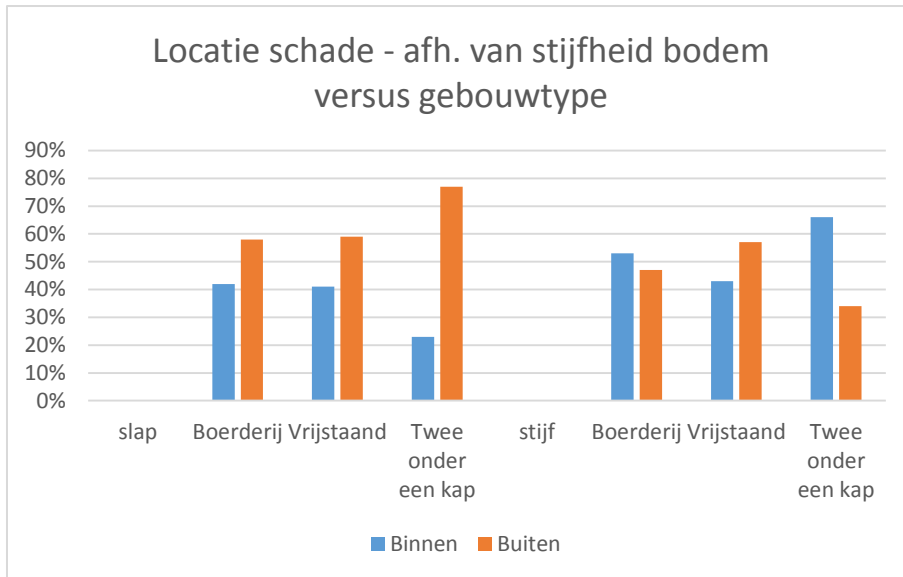
Tabel 14.20b: Overzicht van de classificatie en locatie van de schades in percentages over alle panden in een bouwjaarklasse. NB: Bi = binnen, Bu = buiten



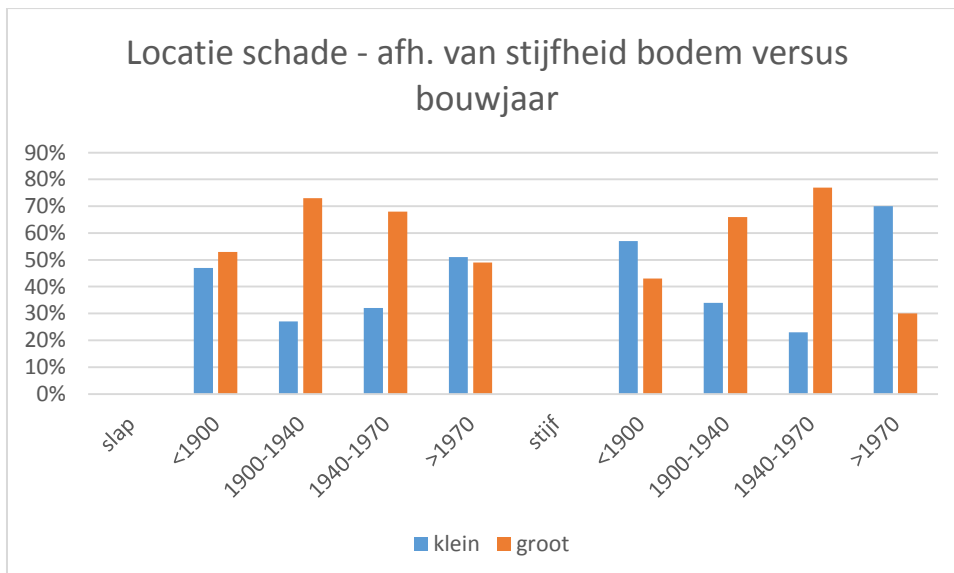
Figuur 14.14a: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages naar gebouwtype, afhankelijk van de stijfheid van de bodem



Figuur 14.14b: Overzicht van de classificatie van de schades in percentages naar bouwjaar, afhankelijk van de stijfheid van de bodem



Figuur 14.14c: Overzicht van de locatie van de schades in percentages naar gebouwtype, afhankelijk van de stijfheid van de bodem



Figuur 14.14d: Overzicht van de locatie van de schades in percentages naar bouwjaar, afhankelijk van de stijfheid van de bodem

In tabellen 14.21a en 14.21b is het gemiddelde aantal schades aangegeven per gebouwtype en bouwjaarklasse, afhankelijk van de omstandigheid van een stijve of slappe ondiepe ondergrond, en het percentage van de benoemde best verklarende scenario's. Figuren 14.15a en 14.15b geven een grafische weergave van deze resultaten.

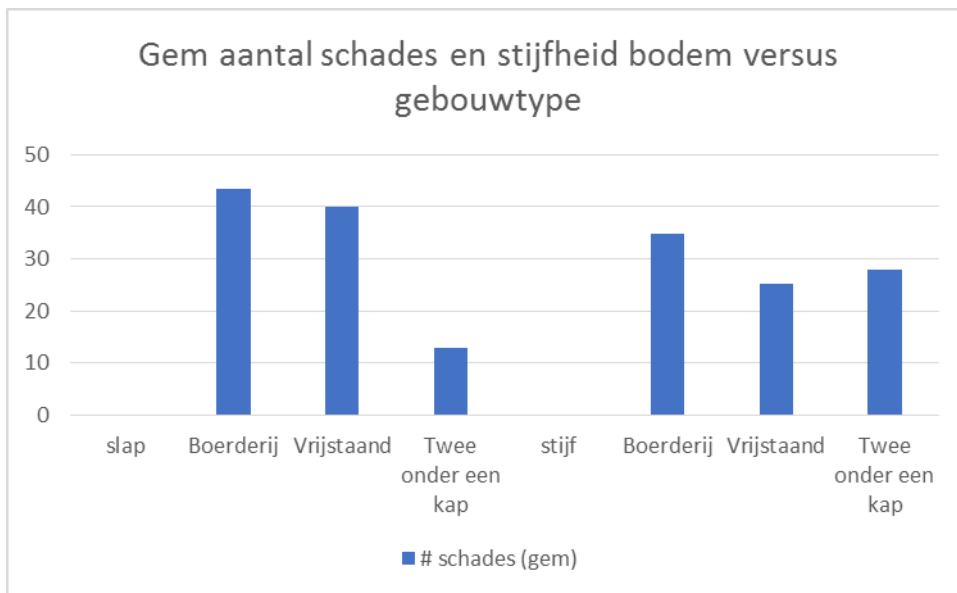
	Stijfheid bodem klein		Stijfheid bodem groot	
	# schades (gem)	% scenario's	# schades (gem)	% scenario's
Boerderij	43,4	60%	34,8	71%
Vrijstaand	40,0	71%	25,3	73%
Twee onder een kap	13,0	38%	27,9	75%

Tabel 14.21a: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar gebouwtype

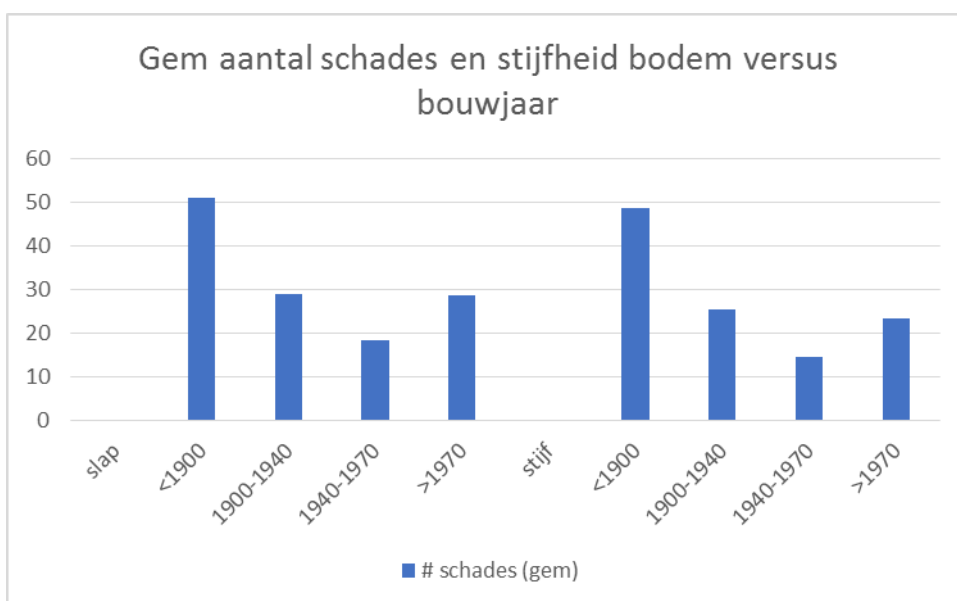
	Slappe bodem		Stijve bodem	
	# schades (gem)	% scenario's	# schades (gem)	% scenario's
<1900	51,1	72%	48,7	81%
1900-1940	28,9	71%	25,5	86%
1940-1970	18,5	73%	14,5	86%
>1970	28,8	76%	23,5	86%

Tabel 14.21b: Overzicht van de beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse

In de resultaten valt het gemiddeld lagere aantal schades op bij twee onder een kap-woningen en een geringe slappe bodem. De oorzaak ligt in de omstandigheid dat zich in deze klasse slechts één pand bevindt.



Figuur 14.15a: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar gebouwtype



Figuur 14.15b: Overzicht van het aantal beoordeelde schades per pand, verdeeld naar bouwjaarklasse

In tabellen 14.22a-14.22c is de toerekenbaarheid aan oorzaken in de best verklarende scenario's uitgesplitst naar de mate van stijfheid van de ondiepe ondergrond. Daarbij is een splitsing gemaakt naar de aanwezigheid van voldoende draagkrachtige zandlagen aan of nabij het oppervlak versus een opbouw van de ondiepe ondergrond voornamelijk bestaande uit klei en/of veen.

Stijfheid ondiepe ondergrond	Gebouwegebonden	bevingen	Ongelijkmatige zettingen
Klein	middelmatig	klein	middelmatig
Groot	middelmatig	zeer-klein	klein-middelmatig

Tabel 14.22a: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's naar de stijfheid van de ondiepe ondergrond

	stijfheid ondiepe ondergrond klein			Stijfheid ondiepe ondergrond groot		
	Gebouw gebonden	Bevingen	Zetting	Gebouw gebonden	Bevingen	zettingen
B	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	zeer klein	middelmatig
V	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	zeer klein	klein-middelmatig
T	middelmatig	middelmatig	klein	middelmatig	zeer klein	klein-middelmatig

Tabel 14.22b: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per gebouwtype. NB: B = Boerderij, V = Vrijstaand, T = Twee onder een kap.

	Stijfheid ondiepe ondergrond klein			Stijfheid ondiepe ondergrond groot		
	Gebouw gebonden	Bevingen	Zetting	Gebouw gebonden	Bevingen	zettingen
<1900	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	zeer klein	middelmatig
1900-1940	middelmatig	Zeer klein	middelmatig	middelmatig	zeer klein	middelmatig
1940-1970	middelmatig	klein	middelmatig	middelmatig	zeer klein	middelmatig
>1970	middelmatig	klein	middelmatig	groot	zeer klein	zeer klein

Tabel 14.22c: Overzicht van de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's per bouwjaarklasse

Wat ook hier opvalt, is dat voor panden uit de bouwjaarklasse vanaf 1970 verschilzettingen geen belangrijke component in de best verklarende scenario's vormen, met name bij de stijve bodem.

14.6 Gebouwcontext

De onderzoeksobjecten zijn geïnclassificeerd naar gebouwtype en bouwjaarklasse. Het algemene beeld is dat er een duidelijk onderscheid te maken valt naar de aangetroffen schades tussen oudere en nieuwere panden. Dit leidt voor de vergelijking tot een onderverdeling in slechts drie categorieën

Panden van na 1970

Panden gebouwd na circa 1970 hebben bouwtechnisch en funderingstechnisch overwegend andere eigenschappen dan uit eerdere bouwperiodes. Er zijn drie belangrijke verschillen:

1. De meeste panden gebouwd na 1970 zijn gefundeerd op een strokenfundering van gewapend beton. Deze strokenfundering van gewapend beton is meestal relatief diep aangelegd en biedt door de relatief grote breedte de mogelijkheid om de belasting beter te spreiden dan bij de daarvoor gebruikelijke funderingen in metselwerk, waarbij de voet van de fundering via een

zogenaamde vertanding is verbreed. De wapening van het beton door middel van betonstaal brengt bovendien een horizontaal verband aan op het onderste funderingsniveau, waardoor trekspanningen als gevolg van eventuele zettingsverschillen op het niveau van de fundering of trekspanningen als gevolg van de bevingen beter door de constructie opgevangen kunnen worden.

2. Het grondonderzoek en het funderingsadvies in de periode na 1970 zijn doorgaans uitgebreider, waardoor de eigenschappen van de ondergrond beter bekend zijn (onder meer door het maken van sonderingen) waardoor variaties in de ondergrond al in het ontwerpstadium konden worden herkend en passende maatregelen konden worden genomen.
3. De meeste panden van na circa 1970 zijn opgetrokken in metselwerk met een spouwconstructie. Het zogenaamde binnenblad bestaat uit gemetselde kalkzandsteen en de afgelopen decennia met name uit gelijmde kalkzandsteenblokken. Kalkzandsteenelementen zijn gevoelig voor fijne scheuren. Het buitenblad wordt vaak gemetseld met een cementhoudende mortel, die zich stijf gedraagt en weinig temperatuurvervormingen kan meemaken. De begane grond en verdiepingsvloeren zijn overwegend geprefabriceerde voorgespannen betonelementen. Het binnenspouwblad met de daaraan verbonden betonvloeren vormen een relatief stijf geheel. Het metselwerk buitenblad heeft geen constructieve functie en in het buitenblad zijn de afgelopen jaren doelbewust dilatatie aangebracht, om spanningen als gevolg van krimp, vocht of temperatuur te verminderen. In de verzameling onderzoeksobjecten zijn ook enkele panden aanwezig met een afwijkende opbouw van het binnenblad en draagconstructie, zoals houtskeletbouw.

De gebouwen in deze categorie, overwegend vrijstaande woningen, twee onder één kap of rijtjeswoningen, vertonen in de regel weinig verschilzettingen over de fundering. De meerderheid van de gemelde schade in deze panden wordt aangetroffen als scheuren van betrekkelijk geringe scheurwijdte in het binnenblad van de spouwmuren, in aansluitingen tussen gevelmuren en binnenmuren of in aansluitingen van muren en de betonnen vloeren.

De best verklarende scenario's bevatten bij deze panden overwegend oorzaken zoals verhinderde en opgelegde vervormingen en additioneel in veel scenario's de invloed van bevingen.

Panden van voor 1970 (exclusief boerderijen)

Panden voor 1970, en zeker panden van voor 1940, hebben doorgaans een relatief hoog aangelegde en gemetselde fundering, die minder voordelen biedt in termen van belastingspreiding op de ondergrond en slechter is staat is om trekspanningen als gevolg van verschilzettingen of als gevolg van bevingen op te nemen. Daarmee zijn deze funderingen veel gevoeliger voor ongelijkmatige stijfheid van de funderingsgrondslag, en dus voor ongelijkmatige zettingen en voor het ontstaan van scheuren.

De funderingen van oudere panden hebben soms een zeer ondiep aanlegniveau, waardoor de draagkracht van de fundering laag is en deze bovendien gevoelig is voor niet homogene samenstelling van de funderingsgrondslag. Bij panden voor 1970 worden veel meer schades waargenomen, die te herleiden zijn tot verschilzettingen in de fundering dan bij panden van na 1970.

De vloeren van deze gebouwen zijn in de regel van hout en bieden daarmee een veel flexibeler invulling van het gebouw waardoor eventuele deformatie van muren als gevolg van externe belastingen of van zettingen met minder grote spanningen gepaard gaat. Een ander opvallende constatering is dat bij deze bouwjaarklassen de aantallen schades in muren ongeveer gelijk verdeeld zijn aan binnenzijde of aan buitenzijde van het gebouw.

Specifiek kenmerk is dat veel van de gebouwen van voor 1970, en zeker van voor 1940, lokaal een kelder hebben. Doordat een kelder dieper is gefundeerd (vaak onder het aanlegniveau van de overige fundering) en een relatief groot oppervlak heeft, is er ter plaatse van de kelder een geringere druk op de fundering. De kelder zakt hierdoor minder dan de overige fundering van het pand en vormt een relatief stijf punt onder het gebouw. Het gevolg hiervan is dat vaak nabij kelders zettingsschade wordt geconstateerd waarbij naastgelegen funderingen met een relatief hogere belasting op de ondergrond een grotere zetting hebben vertoond dan de kelder.

De best verklarende scenario's bevatten bij deze panden overwegend oorzaken als verhinderde en opgelegde vervormingen en autonome zettingen, vaak in combinatie met de invloed van verbouwingen en uitbreidingen, en in veel scenario's ook de invloed van bevingen.

Boerderijen (bouwjaar voor 1940)

Boerderijen – woonhuis annex schuur of stal - vormen een bijzondere categorie, met name door de afmetingen van de gebouwen en de verschillende functies die er in zijn ondergebracht.

Het woongedeelte van de meeste boerderijen met bouwjaar voor 1940 vertoont kenmerken zoals hiervoor onder de categorie panden van voor 1970 al beschreven. Hun opbouw is in de meeste gebieden vergelijkbaar, gemetselde fundering en wanden, houten verdiepingsvloeren en houten kapconstructie. Het voorhuis van boerderijen is in de regel geheel of gedeeltelijk onderkelderd. De keldervloer ligt in de regel op circa 1 m onder maaiveld. De achterliggende schuur heeft doorgaans lange en lage zijmuren in steens metselwerk, op een ondiepere fundering. De lengte van de zijmuren van de schuur is vaak aanzienlijk (orde 20 m) op regelmatige afstand voorzien van stalramen. De achtergevel van de schuur is vervolgens weer hoger opgetrokken en voorzien van enkele grote deuren. In veel gevallen is de houten kapconstructie van de schuur bedoeld om vrijdragend te zijn. Niettemin draagt de kap een deel van de belastingen (verticaal, maar ook horizontaal) af op de brandmuur tegen het voorhuis, op de achtergevel en op de lange zijgevels van de schuur. Deze gebouwdelen verzorgen in de praktijk een gedeelte van de stabiliteit van de kapconstructie. De mate waarin dit gebeurt, is onduidelijk en de bouwconstructie heeft hierdoor in termen van zijn krachtwerving een complex (statisch-onbepaald) karakter.

Kenmerkende en veel voorkomende schades zijn ongelijkmatige zettingen van het vaak volledig onderkelderde voorhuis. Voorts zettingsverschillen op de overgang van het onderkelderde en niet onderkelderde gedeelte, vaak waar de woning zich verbreedt naar achteren en tenslotte (verticale) scheuren in de stalmuren op min of meer regelmatige afstanden.

De best verklarende scenario's bevatten bij deze panden overwegend oorzaken als: verhinderde vervormingen, opgelegde vervormingen en autonome zettingen, vaak in combinatie met de invloed van verbouwingen en uitbreidingen, en in veel scenario's ook de invloed van bevingen. Door de dominante invloed van andere oorzaken, is het percentage best verklarende scenario's waarin de beving ook een rol speelt bij boerderijen iets geringer dan bij andere bouwtypen.

14.7 Omgevingscontext

14.7.1 Inleiding

De onderzoeksgebieden in de provincie Groningen (zie bijlage A) zijn bij aanvang van het onderzoek zodanig gekozen, dat er

- (a) Voldoende ruimtelijke spreiding is rondom de zgn. voormalige contour, waar in het verleden de schadeafhandeling door NAM ophield.

- (b) Voldoende spreiding is in bodemeigenschappen, waarbij een redelijk balans is gezocht in gebieden met vooral holocene, weinig draagkrachtige bovenlaag in het noordelijk gebied van de provincie en gebieden met een hoger liggende zandige ondergrond in het zuidelijk gebied van de provincie Groningen.
- (c) Voldoende onderscheid is in afstand tot de epicentra van de bevingen, waardoor er verschil is in de mate van trillingen die in de gebieden in het verleden zijn opgetreden.
- (d) Voldoende onderscheid is in de mate van diepe bodemdaling in de gebieden door de winning uit het Groningenveld.
- (e) De invloed van lokale mijnbouwactiviteiten op verschillende plaatsen in de provincie (met name: nabij Veendam, Winschoten en Zuidhorn), kan ook worden beschouwd.

Het is duidelijk dat dit tamelijk kwalitatieve criteria zijn die bij aanvang van het onderzoek uitgebreid met de begeleidingsgroep en de klankbordgroep van het onderzoek zijn besproken. De onderzoeksgebieden zijn bovendien qua oppervlakte ruim gekozen. Verder wordt opgemerkt dat het proces waarin vervolgens de objecten voor het onderzoek zijn aangemeld en de gehanteerde selectiecriteria voor de objecten niet automatisch zorgen voor een goede ruimtelijke spreiding van de onderzoeksobjecten in het gebied. Deze toevalsfactor in het onderzoek is bij aanvang geaccepteerd.

In het onderzoek zijn de belangrijkste context-elementen van de gekozen 9 onderzoeksgebieden verder in kaart gebracht, zie bijlage A. Onderstaand kader vat de belangrijkste contextelementen van de gebieden samen.

Afstand tot epicentra

Gebieden De Marne, Zuidhorn, Groningen/Haren, Veendam, Winschoten en Woldendorp op grote afstand en gebieden Bedum, Slochteren en 't Zandt op korte afstand.

Bodemeigenschappen (stijfheid bodem)

- Weinig draagkrachtige bodem met complexe opbouw met name in De Marne, Bedum, 't Zandt, Woldendorp; wisselend in Slochteren, Winschoten, Zuidhorn, relatief draagkrachtige bodem in Groningen/Haren en Veendam.

Aanwezigheid van lokale mijnbouwactiviteiten en gestapelde mijnbouwactiviteiten

- Specifiek in de gebieden Zuidhorn, Veendam en Winschoten

Mate en omvang van diepe bodemdaling

- Gebieden B, S, T, D (grote invloed Groningenveld), gebieden De Marne, Zuidhorn, Veendam, Winschoten, Groningen/Haren (geringere invloed Groningenveld)

Waterhuishouding

- Grootschalige oppervlaktewaterpeilaanpassingen in Bedum, Slochteren, 't Zandt, Woldendorp, Winschoten. Kleinschalige aanpassingen in Veendam, geen aanpassingen in De Marne, Zuidhorn en Groningen/Haren
- Wijzigingen van de relatieve grondwaterpeilen zijn door de diepe bodemdaling in alle gebieden aan de orde.

De onderzoeksobjecten zijn zodanig gekozen, dat in vrijwel alle gebieden vergelijkbare gebouwen (gebouwtype) en vergelijkbare bouwjaarklassen aanwezig zijn. Door het wisselende aanbod zijn er overigens wel verschillen, zo zijn bijvoorbeeld in de noordelijke onderzoeksgebieden de boerderijen sterker vertegenwoordigd dan in de zuidelijke onderzoeksgebieden.

14.7.2 Algemene observaties

De beoordeling van de diverse schades leidt tot de volgende algemene observaties, waar het de relatie met de onderzoeksgebieden betreft:

1) Mate van schade

Rekening houdende met bouwtype en bouwjaarklasse, worden er geen significante identificeerbare verschillen aangetroffen in de schadekenmerken van de panden tussen de 9 onderzoeksgebieden. Dit geldt ondanks de grote verschillen tussen de 9 gebieden in termen van opgetreden trillingssterkte als gevolg van de bevingen.

2) Best verklarende scenario's

Ook de samenstelling van best verklarende scenario's toont geen structurele verschillen tussen de 9 onderzoeksgebieden, ook als rekening wordt gehouden met bouwtype en bouwjaarklasse. Wel wordt opgemerkt dat op grote afstand van de epicentra van de zwaardere bevingen er relatief vaker best verklarende scenario's voorkomen, waarin de beving geen rol speelt.

3) Toerekenbaarheid aan bevingen in de best verklarende scenario's

In de onderzoeksgebieden op kortere afstand tot de epicentra van de bevingen (B, S, T) is de toerekenbaarheid aan de oorzaak bevingen in het algemeen groter dan in de andere gebieden. Dit is volledig te wijten aan de daar opgetreden hogere trillingsnelheid; de toerekenbaarheid kan immers niet worden vastgesteld op basis van alleen de kenmerken van de schade.

14.7.3 Bespreking van de gebieden afzonderlijk

In alle gebieden en bij alle panden is een belangrijk deel van de schade gebouwgebonden en niet gerelateerd aan externe effecten, zoals bijvoorbeeld mijnbouwwinning, wijziging van grondwaterstanden, etc.

B - Bedum e.o.

De belangrijkste aspecten in Bedum e.o. zijn:

- de geringe draagkracht van de ondiepe ondergrond, die uit een dunne bovenlaag stijve klei bestaat en daaronder een pakket zeer slappe klei.
- de grotere gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijziging in bovenbelastingen
- de relatieve nabijheid van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de bevingen
- peilaanpassingen van de boezem (Electraboezem, 2^e schil)
- lokale waterwinning nabij Bedum
- diepe bodemdaling als gevolg van de gaswinning uit het Groningenveld

De funderingsomstandigheden in Bedum e.o. zijn een punt van aandacht. Ongelijkmatige zettingen vormen een belangrijke oorzaak in de schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand. De invloed van de historische bevingen in Bedum is relatief groot ten opzichte van andere gebieden door zowel bodemgesteldheid als nabijheid tot epicentra. Het aandeel van bevingen in de schade in termen van toerekenbaarheid is voor bijna alle panden gekwalificeerd als klein tot middelmatig of middelmatig. Dat betekent dat de bevingen een aanzienlijke invloed op de schade hebben (gehad). Bij een aantal complexe panden (met name boerderijen) zijn indicaties dat de respons van de bouwconstructie invloed heeft gehad op enkele schades, anders dan alleen de krachtswerking in het vlak van bouwdelen. Dit geldt met name de

interactie tussen de kap van schuren en een muren van de schuur en in geval van een korenmodel en interactie tussen opgaand muurwerk en de fundering. De peilaanpassingen van de boezem in de omgeving Bedum compenseren binnen een marge van ongeveer 0,07 m de ontstane bodemdaling en gegeven de bodemgesteldheid (vooral klei) wordt hiervan vrijwel geen invloed verwacht. Gegeven de opbouw van de ondiepe ondergrond bestaat in Bedum e.o. veel onduidelijkheid over de invloed van de lokale grondwaterdynamiek. Ook de invloed van lokale winning in Bedum (Friesland Campina) op de grondwaterdynamiek is onvoldoende duidelijk om hierover conclusies te trekken. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen of hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden in termen van rekken, krommingen of hellingen..

D - Woldendorp e.o.

De belangrijkste aspecten in Woldendorp e.o. zijn:

- wisselende ondergrondomstandigheden met lokaal geringe draagkracht van de ondiepe ondergrond, die uit een dunne bovenlaag stijve klei bestaat en daaronder een pakket klei en/of veen.
- de grotere gevoeligheid van deze bodemopbouw voor een wijziging in bovenbelastingen
- de relatieve grote afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de bevingen
- aanpassingen van polderpeilen in het verleden
- diverse wierdeliggingen
- diepe bodemdaling als gevolg van de gaswinning uit het Groningenveld
- waterinjectie in het kader van de gaswinning bij Borgsweer

De funderingsomstandigheden in Woldendorp e.o. zijn een punt van aandacht. Ongelijkmatige zettingen vormen een belangrijke factor in de meeste best verklarende schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand, met name de opbouw van de ondiepe ondergrond. De invloed van de historische bevingen is in Woldendorp e.o. relatief klein ten opzichte van andere gebieden door de afstand tot epicentra. In twee gevallen zijn er indicaties dat de respons van de bouwconstructies als gevolg van de bevingen invloed heeft gehad op de schade, anders dan alleen de krachtwerking in het vlak van gebouwdelen. Dit betreft twee heel specifieke gevallen met reeds aanwezige schade en die situaties hebben geen algemene geldigheid voor het gebied. Bezien over het gehele gebied, is er een zeer klein aandeel van de bevingen in termen van technische toerekenbaarheid. Diverse polderpeilaanpassingen in dit gebied (met name rond het dorp Woldendorp) hebben naar verwachting invloed gehad op de regionale grondwaterstanden. In de beoordeling kon echter niet worden vastgesteld welke invloed dit heeft op de zettingen van de panden. Geen invloed wordt verwacht van infiltratie van water in zeer diepe bodemlagen die in dit gebied plaatsvindt (Borgsweer). In de grondwaterregistraties in de ondiepe ondergrond is die invloed althans niet gebleken. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen of hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden in termen van rekken, krommingen of hellingen.

H - Groningen/Haren.

De belangrijkste aspecten in Groningen/Haren e.o. zijn:

- draagkrachtige ondiepe ondergrond met lokaal en op geringe diepte lagen of insluitingen van veen of klei
- de geringere gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in de bovenbelasting
- de relatieve grote afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de bevingen
- nauwelijks aanpassingen van boezem en polderpeilen in het verleden in verband met de bodemdaling
- geringe diepe bodemdaling als gevolg van het Groningenveld, nabijheid van enkele kleinere gasvelden

De funderingsomstandigheden in Groningen/Haren zijn over het algemeen goed, draagkrachtig zand komt op geringe diepte (1 à 1,5 m) voor. Ongelijkmatige zettingen vormen in dit gebied een minder belangrijke factor in de schadescenario's. Verder bevat de selectie van panden in dit gebied relatief veel nieuwe panden. Waar dit toch aan de orde is zijn eventuele zettingsverschillen te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand, bijvoorbeeld verschillen in funderingsdruk. De invloed van de historische bevingen in Groningen/Haren is relatief klein ten opzichte van andere gebieden door de grote afstand tot epicentra van de zwaardere bevingen. Het aandeel van bevingen in de schade in termen van toerekening is gekwalificeerd als (vrijwel) geen. Aangezien in dit gebied de oppervlaktewaterpeilen niet zijn aangepast en toch als gevolg van de bodemdaling enige vernatting op (orde 0,10 m). Gegeven de samenstelling van de bodem (vooral zand) wordt hiervan geen invloed verwacht. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen of hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schade en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden in termen van rekken, krommingen of hellingen.

M - De Marne

De belangrijkste aspecten in De Marne zijn:

- wisselende ondergrond omstandigheden met lokaal geringe draagkracht van de ondiepe ondergrond, die uit een dunne bovenlaag stijve klei bestaat en daaronder een pakket klei en en/of veen.
- de grotere gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in bovenbelasting
- de relatieve grote afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de zwaardere bevingen
- zeer beperkte aanpassingen van polderpeilen in het verleden
- geen aanpassingen in het boezempeil als gevolg van diepe bodemdaling
- beperkte diepe bodemdaling als gevolg van het Groningenveld en enige lokale diepe bodemdaling als gevolg van winning in kleinere velden.

De funderingsomstandigheden in De Marne zijn een punt van aandacht. De meeste panden zijn op staal gefundeerd op de bovenste stijve kleilaag. Ongelijkmatige zettingen vormen een belangrijke factor in de best verklarende scenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand, met name de samenstelling van de ondiepe ondergrond. De invloed van de historische bevingen is in De Marne relatief klein ten opzichte van andere gebieden door de grote afstand tot de epicentra van de zwaardere bevingen. Het aandeel van bevingen in de schade in termen van toerekenbaarheid is voor bijna alle panden gekwalificeerd als (vrijwel) geen of in enkele gevallen als zeer klein. In die enkele gevallen speelde een specifieke gevoeligheid van het pand een rol. In het gebied zijn geen aanpassingen van de boezempeilen uitgevoerd, noch van de polderpeilen. Dit leidt in het gebied tot een beperkte mate van vernatting, ter grootte van de diepe bodemdaling

(maximaal 0,1 m). Gegeven de samenstelling van de ondergrond (vooral klei) is niet helemaal duidelijk welke effecten dat heeft op de draagkracht van de bodem en op het zettingsgedrag van de panden. Bij veel panden in dit gebied is de grondwatersituatie voor de beoordeelde panden zeer specifiek. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen of hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden in termen van rekken, krommingen of hellingen.

S - Slochteren e.o.

De belangrijkste aspecten in Slochteren e.o. zijn:

- plaatselijk goed draagkrachtige bodem (zand en leem op geringe diepte), plaatselijk ook dikkere kleipakketten.
- in verband hiermee een wisselende gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in de bovenbelasting (zeer locatie-specifiek)
- de relatieve korte afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de zwaardere bevingen
- aanpassing van boezempeil in het verleden en enkele aanpassingen van polderpeilen in het verleden
- grote diepe bodemdaling vrijwel uitsluitend door de winning uit het Groningenveld.

Ondanks de gunstige ondergrond omstandigheden, vormen ongelijkmatige zettingen een belangrijke factor in de meeste schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand zoals bijv. verschillen in funderingsdruk. De invloed van de historische bevingen is in Slochteren e.o. relatief groot ten opzichte van andere gebieden door de korte afstand tot epicentra. Het aandeel van bevingen in de schade in termen van toerekenbaarheid is voor bijna alle panden gekwalificeerd als klein tot middelmatig of middelmatig. Dat betekent dat de bevingen een aanzienlijke invloed op de schade hebben (gehad). Bij een aantal panden zijn indicaties dat de respons van de bouwconstructie als gevolg van bevingen invloed heeft gehad op enkele schades, anders dan uitsluitend de krachtswerking in het vlak van bouwdelen. Die schadesituaties zijn zeer specifiek. In die enkele gevallen speelde een specifieke gevoeligheid van het pand een rol. De onderzochte cases in Slochteren liggen alle in poldergebieden. De peilaanpassingen van de boezem in Slochteren e.o. (voor zover doorgevoerd) hebben hierop dus geen invloed. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen of hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden in termen van rekken, krommingen of hellingen.

T - 't Zandt e.o.

De belangrijkste aspecten in 't Zandt e.o. zijn:

- plaatselijk goed draagkrachtige bodem (zand en leem op geringe diepte), plaatselijk ook dikkere kleipakketten.
- gelet op bovenstaande een wisselende gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in de bovenbelasting
- de relatieve korte afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de zwaardere bevingen
- beperkte aanpassingen van boezempeilen en polderpeilen in het verleden
- grote diepe bodemdaling, voornamelijk als gevolg van het Groningenveld

Ondanks de vaak gunstige ondergrond omstandigheden, vormen ongelijkmatige zettingen een belangrijke factor in de meeste schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand. De invloed van de historische bevingen is in 't Zandt relatief groot ten opzichte van andere gebieden door de korte afstand tot epicentra. Het aandeel van bevingen in de schade in termen van toerekenbaarheid is voor bijna alle panden gekwalificeerd als klein tot middelmatig. Dat betekent dat de bevingen een aanzienlijke invloed op de schade hebben (gehad). Bij een aantal panden zijn indicaties dat de respons van de bouwconstructie als gevolg van bevingen invloed heeft gehad op de schade, anders dan alleen de krachtswerking in het vlak van het bouwdeel. De boezempeilaanpassingen van de boezem in 't Zandt e.o. compenseren binnen 0,1 m de ontstane bodemdaling en gegeven de bodemgesteldheid wordt hiervan geen grote invloed verwacht. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken of krommingen, hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden in termen van rekken, hellingen of krommingen.

V - Veendam e.o.

De belangrijkste aspecten in Veendam e.o. zijn:

- plaatselijk goed draagkrachtige bodem (zand en leem op geringe diepte), plaatselijk ook veeninsluitingen op geringe diepte
- in het algemeen een geringere gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in de bovenbelasting, behalve wanneer veeninsluitingen aanwezig zijn.
- de relatieve grote afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de zwaardere bevingen, kleine afstand tot epicentra van lichtere bevingen (Annerveense veld)
- belangrijke plaatselijke aanpassingen in de waterhuishouding en aanpassing van polderpeilen in het verleden
- relatief geringe diepe bodemdaling als gevolg van de gaswinning (Groningenveld, Annerveense veld)
- op enkele plaatsen relatief grote en lokale diepe bodemdaling als gevolg van o.m. zoutwinning Nedmag, zoutwinning AKZO en gasopslag Gasunie.
- op enkele plaatsen belangrijke plaatselijke aanpassingen van de oppervlaktepeilen als gevolg van of met het oog op de lokale diepe bodemdaling

Ondanks de gunstige ondergrond omstandigheden, vormen ongelijkmatige zettingen een belangrijke factor in de meeste schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand, zoals de opbouw van de ondiepe ondergrond (met name de aanwezigheid van veenlagen of veenlenzen onder de fundering) en verschillen in funderingsdruk. De invloed van de historische bevingen is in Veendam relatief klein ten opzichte van andere gebieden door de grote afstand tot epicentra van de zwaardere bevingen. Een uitzondering wordt gemaakt voor het Annerveenseveld en met name panden in Wildervank of aan de noordzijde van het onderzoeksgebied (Sappemeer). De rol van de bevingen voor enkele panden in bijzondere omstandigheden (nabijheid tot bevingen) is gekwalificeerd als klein, voor de overigens panden is deze gekwalificeerd als (vrijwel) geen. Enkele polderpeilaanpassingen die in Veendam zijn doorgevoerd ter compensatie van de lokale diepe bodemdaling, met name bij Nedmag, en deze hebben waarschijnlijk invloed op de ondiepe bodemdaling bij een aantal panden. Er is naar verwachting ook invloed van historische peilaanpassingen in een verder verleden. Deze impact van deze verschillende oorzaken kan echter niet goed van elkaar gescheiden worden. Recente lokale

wijzigingen in de oppervlaktepeilen in het gebied Veendam houden onder meer verband met de lokale winningsactiviteiten van Nedmag bij Borgercompagnie en AKZO (bij Zuidwending en Heiligerlee) en voorts gasopslag activiteiten van Gasunie (eveneens bij Zuidwending en Heiligerlee). De invloed hiervan is ook moeilijk te scheiden van de invloed van andere historische peilaanpassingen. Een aantal panden, met name in de omgeving van de diepe bodemdaling van Nedmag, hebben een kwetsbare funderingssituatie. Bovenstaande leidt er toe dat in dit gebied voorzichtigheid is geboden bij het aanpassen van oppervlaktewaterpeilen. Vanwege de gevoeligheid van panden, de specifieke ondergrondcondities en dus het schade-risico, zou de monitoring van de effecten in dit gebied geïntensiveerd moeten worden. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen, hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden (noch van gaswinning, noch van de lokale activiteiten in Veendam).

W - Winschoten

De belangrijkste aspecten in Winschoten e.o. zijn:

- Plaatselijk goed draagkrachtige bodem (zand en leem op geringe diepte), plaatselijk ook dikkere kleipakketten.
- Gelet op bovenstaande een variërende gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in de bovenbelasting
- de relatieve grote afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de zwaardere bevingen
- aanpassingen van boezempeilen met het oog op de diepe bodemdaling in het verleden
- relatief geringe diepe bodemdaling als gevolg van de winning uit het Groningenveld
- zeer lokale diepe bodemdaling nabij Heiligerlee
- zeer lokale aanpassingen van oppervlaktewaterpeilen nabij Heiligerlee

De ondergrond omstandigheden in Winschoten e.o. zijn enigszins wisselend. Op veel plaatsen is op geringe diepte draagkrachtig zand beschikbaar. Op sommige plaatsen bestaat de ondergrond vooral uit klei. Onder de zandlaag is in veel gevallen ook weer klei aanwezig. In beide omstandigheden zijn ongelijkmatige zettingen toch een belangrijke factor in de meeste schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand. De invloed van de historische bevingen is in Winschoten relatief klein ten opzichte van andere gebieden door de grote afstand tot epicentra van de zwaardere bevingen. De rol van de bevingen voor vrijwel alle panden in dit onderzoeksgebied gekwalificeerd als (vrijwel) geen. Er zijn beperkte peilaanpassingen uitgevoerd in de boezem te Winschoten. Deze compenseren de bodemdaling binnen een marge van 0,05 m. Nabij Heiligerlee zijn specifieke peilaanpassingen gedaan in verband met bodemdaling door lokale mijnbouwactiviteiten, die hebben echter geen impact op de daar onderzochte panden. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen of hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden, noch van gaswinning in het Groningenveld, noch van de lokale winningsactiviteiten bij Heiligerlee.

Zuidhorn

De belangrijkste aspecten in Zuidhorn zijn:

- plaatselijk goed draagkrachtige bodem (zand en leem op geringe diepte), plaatselijk ook dikkere kleipakketten.

- gelet op bovenstaande een variërende gevoeligheid van deze bodemopbouw voor wijzigingen in de bovenbelasting
- de relatieve grote afstand van dit gebied ten opzichte van de epicentra van de bevingen
- beperkte aanpassingen van boezempeilen en polderpeilen in het verleden
- geringe diepe bodemdaling als gevolg van de winningen uit het Groningenveld, diepe bodemdaling met name door lokale winning
- opslag van gas in een voormalig winningsveld bij Grijpskerk
- situaties met panden op een wierdeligging en taludligging

De ondergrond omstandigheden in Zuidhorn wisselen sterk. Ongelijkmatige zettingen zijn een belangrijke factor in de meeste schadescenario's. In de meeste gevallen zijn deze te herleiden tot specifieke omstandigheden bij het pand. De invloed van de historische bevingen is in Zuidhorn relatief klein ten opzichte van andere gebieden door de grote afstand tot epicentra van de zwaardere bevingen. De rol van de bevingen voor vrijwel alle panden in dit onderzoeksgebied gekwalificeerd als (vrijwel) geen. Er zijn geen peilaanpassingen van de boezem Zuidhorn. Hierdoor is in combinatie met de opgetreden bodemdaling over een langere tijd een geringe vernatting opgetreden (maximaal plaatselijk in de orde van 0,1 m). Gegeven de grondgesteldheid (in veel gevallen klei) is niet helemaal duidelijk wat de effecten hiervan zijn op de draagkracht van de bodem en op het zettingsgedrag van panden. Sommige panden hebben een zeer specifieke grondwatersituatie, enkele panden hebben een wierde of taludligging waardoor zij ook gevoelig zijn voor grondwaterstandfluctuaties en voor het kruipgedrag van de (klei)bodem. De directe invloed van diepe bodemdaling (in termen van rekken, krommingen, hellingen) is in een eerder stadium gefalsificeerd. Bij de beoordeling van de schades en ook uit de ondersteunende informatie (InSAR) zijn geen observaties gedaan die op enige invloed van diepe bodemdaling duiden. Meer in het bijzonder kan geen verband worden gelegd tussen het gebruik van de gasopslag nabij Grijpskerk op de bodembewegingen bij de onderzochte panden.

14.8 Samenvattend beeld m.b.t. de rol van mijnbouwactiviteiten

14.8.1 Invloed van diepe bodemdaling

Deformatie van de bodem door gaswinning uit Groningenveld

In de analyse van de schadeoorzaken in de diverse gebieden wordt geen onderscheid aangetroffen op basis van de mate van diepe bodemdaling. De effecten zijn bepaald in termen van krommingen en spanningen in de bodem die op het gebouw worden overgedragen en effecten zoals scheefstanden. Op de berekende effecten zijn in het onderzoek zeer strenge falsificatiecriteria toegepast. In alle gebieden met diepe bodemdaling als gevolg van de winning in het Groningenveld liggen de opgetreden spanningen, krommingen en scheefstanden bepaald op basis van de monitorrapportages van de NAM ruim onder de falsificatiecriteria en daarmee ruim onder de waarden van spanningen die in bouwconstructies kunnen ontstaan door tal van vaak voorkomende andere invloeden. Deze invloedfactor is dermate klein, dat deze ook als bijkomende oorzaak in scenario's niet aan de orde is.

De InSAR data geven in geen van de gevallen indicaties dat de zakking van de op staal gefundeerde panden afwijkt van de zakking van de omliggende bodem. De zakkingsnelheden bepaald via InSAR en via de NAM monitorrapportages stemmen in goede mate overeen.

Deformatie van de bodem door lokale mijnbouwactiviteiten

Lokale mijnbouwactiviteiten worden uitgevoerd in de onderzoeksgebieden Veendam en Winschoten.

De extractie van zout uit diepe lagen (Borgercompagnie) leidt tot volumevermindering in de diepe ondergrond en daardoor tot lokale (diepe) bodemdaling. Het winnen van zout door het vormen van cavernes (Zuidwending, Heiligerlee) leidt tot spanningsveranderingen en kruip in de diepe ondergrond, en daardoor ook tot diepe bodemdaling, echter in veel mindere mate. Ook de opslag van gas, en met name de gehanteerde gasdrukken, in cavernes die zijn ontstaan door de zoutwinning (Zuidwending, Heiligerlee), leiden ook tot bodemdalingseffecten. De mate en snelheid van diepe bodemdaling is afhankelijk van de gehanteerde zoutwinningstechniek en is bij Borgercompagnie aanzienlijk groter dan bij de winningen in Zuidwending en Heiligerlee.

De spanningsveranderingen, krommingen en hellingen als gevolg van deze lokale mijnbouwactiviteiten zijn bepaald aan de hand van de monitorrapportages van de deformaties aan het aardoppervlak zoals opgemaakt door de desbetreffende concessiehouders. Deze zijn eveneens getoetst aan de gehanteerde falsificatiecriteria en leiden ook voor deze activiteiten tot de conclusie dat de directe effecten van diepe bodemdaling bij deze lokale winning onder de falsificatiegrenzen liggen. Bij deze lokale bodemdaling zijn krommingen en rekken als gevolg van de diepe bodemdaling echter een orde groter dan bij de grootschalige bodemdaling als gevolg van winning in het Groningenveld. Hoewel de effecten in termen van krommingen en rekken nog steeds klein zijn, is nabij lokale bodemdalingsgebieden per schade aanvullend getoetst of de diepe bodemdaling schade met een andere achterliggende oorzaak zou hebben kunnen versterkt of verergerd.

De InSAR data geven in geen van de gevallen indicaties dat de zakking van de panden afwijkt van de zakking van de omliggende bodem. De zakkingsnelheden bepaald via InSAR en via de monitorrapportages stemmen ook hier in goede mate overeen.

Specifiek voor de omgeving van de winningslocaties bij Veendam en Winschoten is via de InSAR data nagegaan of er lokale of tijdgebonden afwijkingen waarneembaar zijn in het zettings- of krommingspatronen aan het aardoppervlak rondom een pand. Dat is niet gebleken binnen de nauwkeurigheid van deze techniek (ca. $\pm 0,5$ mm/jaar).

Wijziging van de waterhuishouding

Onder de waterhuishouding wordt in deze rapportage verstaan de beheersing van de oppervlaktewaterpeilen en grondwaterpeilen, inclusief hun onderlinge wisselwerking. De waterhuishouding is afhankelijk van invloeden van weer en klimaat (neerslag) en van de hydrologie in de bodem (de interactie tussen grondwater en bodem, zoals capillaire werking, grondwaterstromingen, aan- en afvoer, infiltratie, verdamping en kwel). Dit is van belang, omdat de grondwaterstanden een invloed kunnen hebben op de sterkte (draagkracht) en stijfheid (zakking) van de ondergrond, die mede bepaald wordt door vochtgehalte en (capillaire) spanningen.

Grondwaterpeilen kunnen worden beïnvloed door (1) wijzigingen in het afvoerend vermogen (door drainage of door aanleg van afwateringsloten), (2) peilaanpassingen van het oppervlaktewaterpeil, (3) of door directe bemaling (oppompen) van het grondwater of (4) beïnvloeding van stijghoogte in diepere watervoerende pakketten, bijvoorbeeld door diepe bemaling of waterwinning.

Waar diepe bodemdaling als gevolg van mijnbouwactiviteiten optreedt, zal de relatieve grondwaterstand (dat is de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld) wijzigen. Immers als gevolg van de bodemdaling zal er een verandering optreden tussen maaiveldhoogte en de freatische stijghoogten van het grondwater in de bodem en het oppervlaktewaterpeil. De oppervlaktepeilen

worden in bodemdalingsgebieden regelmatig aangepast, uit oogpunt van beheersing van vrije doorvaarthoogte, veilige hoogte van waterkeringen (dijken en kaden), efficiënte afvoer van overtollig water, voldoende drooglegging en ontwateringsdiepte in de gebouwde omgeving. Hiertoe worden door waterschappen zogenaamde peilbesluiten genomen.

Geconstateerd wordt dat in gebieden met significante bodemdaling, door de waterschappen peilaanpassingen zijn gerealiseerd met als doel de oppervlaktewaterpeilen en de grondwaterstanden te beheersen. Daaronder wordt verstaan dat waterpeilen zo ver worden verlaagd dat de drooglegging binnen een bepaalde periode gemiddeld zo weinig mogelijk verandert. De stappen van de peilaanpassingen van de boezem zijn in de regel kleiner dan 0,05 m, om schade aan panden te voorkomen. Wijzigingen van polderpeilen vinden (met name bij lokale diepe bodemdaling) soms in grotere stappen plaats. Over het algemeen worden de effecten van bodemdaling voor het oppervlaktewaterpeil (en zeker voor de boezem) binnen tamelijk smalle marges goed beheerst. Ook polderpeilen worden in de regel goed beheerst.

Naast deze aanpassingen zijn er twee belangrijke fenomenen, die aandacht verdienen.

- (a) De grondwaterstand, met name in gebieden met slappe holocene bovenlagen, is maar in beperkte mate afhankelijk van de oppervlaktepeilen. Neerslag, verdamping, infiltratie naar diepere lagen of kwel uit diepere lagen speelt hier een grote rol. Een aanzienlijke wijziging van de hoogteligging van het maaiveld kan deze processen beïnvloeden en daarmee de effectieve ontwateringsdiepte. Dit zijn in de regel lokale omstandigheden. De monitoring van grondwaterstanden is in de provincie Groningen tamelijk grofmazig en het is daardoor moeilijk uitspraken te doen over het historische verloop van de grondwaterstanden en over effectieve wijziging van grondwaterstanden bij afzonderlijke panden als gevolg van de bodemdaling. Dit vormt een grote onzekerheid bij het interpreteren van schadeoorzaken in dit onderzoek.
- (b) De grondwaterstand bij gebouwen met een verhoogde ligging, zoals op wierden, is eveneens complex. De potentiële variatie van de grondwaterstand in de wierde is groot, omdat deze vooral afhankelijk is van neerslag en infiltratie of kwel en van de regionale (diepere) grondwaterstand. Daarnaast is over het hydrologisch gedrag van het ophogingsmateriaal vaak weinig bekend.

De invloed van bovenstaande aspecten op de waterhuishouding is complex en dat geldt dus eveneens voor de doorwerking op de eigenschappen, de draagkracht en de spanningen in de bodem en op de doorwerking hiervan op gebouwen.

We constateren dat bij de meeste onderzochte objecten maar zeer beperkt informatie over de grondwaterstanden en het historisch verloop van grondwaterstanden beschikbaar is. Dat maakt dat de grondwaterstand (actueel en historisch) één van de meest onzekere factoren in de onderhavige beoordeling van de schades is.

14.8.2 Invloed van bevingen

Drie van de negen onderzoeksgebieden liggen nabij het gebied met epicentra van bevingen in het Groningenveld. Op basis van het uitgevoerde onderzoek is er een groot verschil in het niveau van de trillingen, die panden in deze gebieden (Slochteren, Bedum en 't Zandt) hebben ondervonden, ten opzichte van de objecten in de andere gebieden. Dat verschil is in de orde van een factor 10.

De trillingssterkte als gevolg van de bevingen is op de locaties van de objecten door middel van rekenmodellen bepaald. Die rekenmodellen zijn gevalideerd aan waarnemingen in het meetnet van KNMI en van TNO, maar bevatten wel inherente onzekerheden (spreiding). Die spreiding is

gekwantificeerd en is bij de bepaling van de opgetreden trillingen meegenomen. De trillingen zijn voor alle historische geïnduceerde bevingen sinds 1986 bepaald, waardoor ook per locatie een indruk is verkregen van het aantal historische geïnduceerde bevingen dat betekenisvolle trillingen heeft veroorzaakt.

Bij alle onderzoeksobjecten, dus ook in de gebieden op grote afstand van de epicentra, is het vooraf gestelde falsificatiecriterium overschreden. Trillingen als gevolg van bevingen zijn dus niet gefalsificeerd. Als gevolg hiervan is bij elk schadegeval voor het opstellen van plausible oorzaken en scenario's de invloed van de trillingen als gevolg van de bevingen beschouwd. Anderzijds is bij het beoordelingsproces van de afzonderlijke schades gebleken dat bij de meeste objecten de invloed van trillingen als gevolg van bevingen ook niet geverifieerd kan worden. In veel van de best verklarende scenario's komen bevingen als medeoorzaak voor. In de toerekening van de schade aan de oorzaken in de best verklarende scenario's hebben de bevingen gemiddeld over alle aanwezige schades in de panden in de gebieden Bedum, Slochteren en 't Zandt een klein aandeel, in Woldendorp e.o., Veendam e.o., Groningen/Haren en De Marne een zeer klein aandeel, en in de gebieden Zuidhorn en Winschoten (vrijwel) geen aandeel.

15. Beantwoording van onderzoeksvragen, conclusies en aanbevelingen

15.1 Inzichten in veel voorkomende schades, oorzaken en toerekenbaarheid bij de onderzochte panden

Dit onderzoek richt zich op de mogelijke oorzaken van de schade aan gebouwen, ook daar waar bevingen niet de (enige) oorzaak kunnen zijn. De hoofdvraag in het onderzoek luidde: Wat is de (meest waarschijnlijke) oorzaak of wat zijn de (meest waarschijnlijke) oorzaken van de gemelde schades in het onderzoeksgebied? Hierna worden de onderzoeksvragen beantwoord in de vorm van conclusies en aanbevelingen.

Welk inzicht biedt de beoordeling van de cases over vaak aanwezige soorten schade, hun voornaamste plausibele oorzaken en de grote lijnen van de overwegingen met betrekking tot de toerekenbaarheid?

15.1.1 Het beoordelingsproces

Het vaststellen van de causaliteit op basis van best verklarende scenario's in een groot aantal gevallen mogelijk

Over het totaal van het aantal schades, is in 70 % van de gevallen op basis van schadeopname rapporten een best verklarend scenario en dus een oordeel over de causaliteit vastgesteld. Bij de afweging in de vorm van de scenario's komen fundamentele onzekerheden in de afweging expliciet naar voren. Indien meer dan 2 scenario's even waarschijnlijk zijn, is in het onderzoek de conclusie getrokken dat geen best verklarend scenario vastgesteld kan worden. Indien de achtergrondgegevens onvoldoende waren om scenario's op te stellen, is eveneens geen best verklarend scenario vastgesteld. Onvoldoende gegevens, vooral met betrekking tot de vastlegging van de schade in de schadeopname rapporten en een te groot aantal mogelijke scenario's blijken in deze studie de aanleiding te zijn dat geen best verklarend scenario kon worden bepaald.

De toerekenbaarheid van schade aan afzonderlijke oorzaken is alleen in indicatieve en kwalitatieve zin mogelijk

In deze studie is het begrip technische toerekenbaarheid gehanteerd. De technische toerekenbaarheid van de schade betreft het aandeel van een oorzaak in de spanningen of rekken van een bouwdeel of constructiedeel, wanneer de schade is ontstaan. De technische toerekenbaarheid gaat dus over een fysieke bijdrage van een oorzaak aan de spanningen die leiden tot het ontstaan van de schade en gaat niet over de *kans* dat die oorzaak en rol speelt. De benaming technische toerekenbaarheid is gehanteerd opdat geen vermenging of verwarring plaatsvindt met eventuele juridische of financiële toerekenbaarheid.

De beoordeling van de technische toerekenbaarheid leverde bij het onderzoek de grootste hoofdbreken op. Een kwantitatieve vaststelling vereist gedetailleerde informatie over de ontwikkeling van spanningen en vervormingen in een bouwconstructie, bij voorkeur in combinatie met een bouwkundige vooropname voordat de schade werd gedetecteerd. Die invloed van afzonderlijke oorzaken is maar zeer moeizaam kwantitatief onderbouwd vast te stellen. Om die reden is alleen een kwalitatieve schatting over de toerekenbaarheid gegeven. De kwalitatieve beoordeling van de toerekenbaarheid aan de oorzaak trillingen is in dit onderzoek vooral gebaseerd op de opgetreden sterkte van de trillingen ter plaatse van de onderzochte panden.

Over de technische toerekenbaarheid zijn in deze studie alleen indicatieve uitspraken gedaan. De schattingen van de technische toerekenbaarheid zijn kwalitatief geformuleerd. Onderstaande tabel geeft een toelichting op de kwalificaties en de bedoelde orde van grootte.

Tabel 15.1: Bij de beoordeling gehanteerde kwalitatieve schaal voor de technische toerekenbaarheid

Kwalificatie	Orde van grootte
<i>(vrijwel) geen</i>	<i>minder dan 1 %</i>
<i>zeer klein</i>	<i>tussen 1 % en 10 %</i>
<i>klein</i>	<i>tussen 10 % en 33 %</i>
<i>middelmatig</i>	<i>tussen 33 % en 66 %</i>
<i>groot</i>	<i>tussen 66 % en 90 %</i>
<i>zeer groot</i>	<i>tussen 90 % en 99 %</i>
<i>(vrijwel) volledig</i>	<i>groter dan 99 %</i>

Het systematisch hanteren van een brede set schadeoorzaken en denken in scenario's werkt goed

De gehanteerde beoordelingsmethodiek met scenario's beoogt alle schadeoorzaken in beeld te houden, tenzij hun invloed expliciet kan worden gefalsificeerd. Deze aanpak heeft in het onderzoek goed gewerkt en dwingt de beoordelaars breed te blijven kijken en te expliciteren waarom zij bepaalde oorzaken wel en niet passend vinden bij een waargenomen schade. De scenario-aanpak in het onderzoek dwingt de beoordelaars scenario's met enkelvoudige maar ook met meervoudige, dus samenkomende, oorzaken te formuleren en een expliciete afweging te maken welke scenario's gegeven het schadebeeld het meest plausibel zijn. Vanzelfsprekend is een analyse van samenstelde scenario's veel bewerklijker dan van afzonderlijke en enkelvoudige oorzaken.

De falsificatie van schadeoorzaken (het uitsluiten van oorzaken) is maar beperkt mogelijk

Op basis van objectieve gegevens is getracht zo veel mogelijk schadeoorzaken uit te sluiten als onderdeel van scenario's die de schade veroorzaken. Bij deze falsificatie is het gewenst oorzaken met voldoende zekerheid te kunnen uitsluiten. De falsificatiecriteria moeten dus aan de behoudende (dus strenge) kant gekozen worden. Door deze strenge falsificatiecriteria kon bijvoorbeeld de oorzaak 'trillingen door bevingen' bij geen enkel pand buiten beschouwing blijven en is daarom deze oorzaak consequent en expliciet in de scenario's van schade oorzaken beschouwd. Gebleken is dat door de strenge falsificatie criteria een groot aantal oorzaken overbleven die expliciet in de beoordeling meegenomen moesten worden.

15.1.2 De schade in de onderzochte objecten, de causaliteit en toerekenbaarheid

Aantal, mate en locatie van schade is afhankelijk van bouwtype, bouwjaar en ligging

Het aantal schades, de mate van schade (scheurwijdte), het type schade (scheurtype) en de locatie van schade (binnen of buitenzijde van het gebouw) blijkt een verband te hebben met het bouwtype en met de bouwjaarklasse:

- Wanneer onderscheid wordt gemaakt naar bouwjaarklasse, zijn er in alle vier gehanteerde bouwjaarklassen gemiddeld meer schades per pand in gebieden op kleine afstand tot de epicentra van zware bevingen dan in de gebieden op grote afstand tot de epicentra.
- Panden van na 1970 blijken relatief meer schade aan de binnenzijde van de woning te hebben dan aan de buitenzijde. Dit verschil wordt ook aangetroffen bij twee-onder-een-kap woningen. Dit houdt verband met de constructiewijze van deze (veelal) nieuwere panden en houdt geen verband met hun ligging ten opzichte van de epicentra.
- Panden van voor 1940 vertonen in de regel meer schades dan panden van na 1940. Boerderijen (woonhuis inclusief de daaraan gekoppelde schuur) vertonen in de regel meer schades dan vrijstaande woningen en twee-onder-een-kap woningen, hetgeen verklaarbaar is vanwege de grotere omvang van boerderijen.

Er is geen duidelijk identificeerbare relatie tussen het aantal schades, de mate van schade (scheurwijdte) het type schade (scheurtype) en de locatie van schade (binnen of buitenzijde van het gebouw) met het onderzoeksgebied of de funderingsgrondslag.

Causaliteit - samenstelling van de schade scenario's

De beoordeling van de schade van veel onderzoeksobjecten geeft aan dat veel schades meer dan één samenkomende oorzaken hebben. In dit rapport zijn de vastgestelde oorzaken geclusterd volgens de indeling (1) gebouwgebonden oorzaken, (2) bevingen en (3) ongelijkmatige zettingen.

Met *gebouwgebonden* oorzaken wordt in dit onderzoek bedoeld de oorzaken die hun oorsprong vinden in opbouw, toegepaste materialen en krachtswerking van het gebouw, zoals onvoldoende weerstand tegen een belasting, opgelegde en verhinderde vervormingen (zoals belemmerde drogingskrimping van kalkzandsteen of belemmerde thermische vervorming van baksteen), veroudering etcetera. In de hier gehanteerde systematiek zijn gebouwgebonden oorzaken uitsluitend afhankelijk van opbouw, toegepaste materialen, geometrie en krachtswerking in het gebouw en hebben zij dus geen relatie met de fundering, de locatie of de omgeving van het gebouw.

Ongelijkmatige zettingen kunnen een interne en externe aanleiding hebben. Intern is het geval bij zettingen die uitsluitend het gevolg zijn van de interactie tussen de belasting uit de fundering van het gebouw en de ondergrond. Extern is het geval, indien de ongelijkmatige zettingen worden aangedreven door een externe oorzaak (zoals grondwaterstandaanpassingen of grondwaterstandveranderingen door diepe bodemdaling). Andere externe oorzaken zijn vervormingen aan het aardoppervlak door de diepe bodemdaling en trillingen door bevingen.

De meest voorkomende oorzaken in de best verklarende scenario's blijken bij panden van voor 1970 zowel gebouwgebonden oorzaken als ongelijkmatige zettingen met een interne aanleiding te zijn. Er blijken geen identificeerbare verschillen tussen de samenstelling van de best verklarende scenario's wanneer wordt gekeken naar de bouwjaarklassen of bouwwerktype. Gebouwgebonden oorzaken en ongelijkmatige zettingen zijn qua aantallen ongeveer gelijk vertegenwoordigd in de best verklarende scenario's van panden voor 1970.

De uitzondering betreffen twee onder één kap woningen en panden van na 1970: hier worden relatief meer gebouwgebonden oorzaken aangetroffen en deze panden hebben relatief minder vaak ongelijkmatige zettingen als oorzaak dan panden van voor 1970.

Uit het onderzoek blijkt verder geen identificeerbaar systematisch verschil in de samenstelling van de best verklarende scenario's tussen de afzonderlijke onderzoeksgebieden. Ook wanneer wordt gekeken naar een onderscheid in (a) grote en kleine afstand tot de epicentra van de zware bevingen, in (b) mate van diepe bodemdaling of lokale peilaanpassingen of (c) naar de stijfheid van de bodem blijken geen identificeerbare verschillen tussen de samenstelling van de best verklarende scenario's van schade in de panden.

Toerekenbaarheid – aandeel van verschillende oorzaken

De (technische) toerekenbaarheid is per schade scenario geschat. Ook de toerekenbaarheid is gepresenteerd voor drie clusters aan oorzaken: (1) gebouwgebonden oorzaken, (2) bevingen en (3) ongelijkmatige zettingen. De toerekenbaarheid zoals hier gepresenteerd, is gemiddeld over alle schades in een pand. In de presentatie van de resultaten is onderscheid gemaakt naar onderzoeksgebied, bouwtype, bouwjaarklasse en naar de hierboven genoemde drie verschillende onderscheiden omstandigheden, te weten (a) de afstand tot epicentra zware bevingen, (b) grote plaatselijke diepe bodemdaling of aanpassingen van het oppervlaktewaterpeil en (c) de stijfheid van de bodem.

Behoudens kleine verschillen, is het beeld dat in alle onderzoeksgebieden bij gebouwen van voor 1970 gebouwgebonden oorzaken en ongelijkmatige zettingen beide een *middelmatig* aandeel hebben (middelmatig betekent een orde van grootte tussen 33 % en 66 %). Dit zijn daarmee de twee belangrijkste oorzaken in termen van toerekenbaarheid in de best verklarende scenario's.

Twee onder één kap woningen en gebouwen van na 1970 wijken van dit beeld af, in de zin dat de toerekening van de schade aan zettingen hier aanzienlijk geringer is en als *klein* wordt gekwalificeerd (orde van grootte 10 % tot 33 %).

De toerekening van de schade aan de invloed bevingen verschilt tussen de gebieden op kleine afstand tot de epicentra van de zware bevingen en op grote afstand. Op kleine afstand – dit betreft de onderzoeksgebieden binnen de voormalige contour - is de technische toerekenbaarheid gekwalificeerd als *klein – middelmatig* (orde van grootte 33 %) gemiddeld over de onderzochte panden.

Op grote afstand tot de epicentra van zware bevingen – dit betreft de onderzoeksgebieden buiten de voormalige contour – is de technische toerekenbaarheid gekwalificeerd als (*vrijwel*) *geen* (orde van grootte: minder dan 1 %) tot *zeer klein* (orde van grootte 1 % tot 10 %) gemiddeld over de onderzochte panden.

Deze verschillen tussen (*vrijwel*) *geen* en *zeer klein* ontstaan, doordat bij sommige kleinere gasvelden of lokale winningsactiviteiten (lichte) geïnduceerde bevingen blijken op te treden, die bij panden in de directe nabijheid sterkere trillingen veroorzaken dan de zwaardere bevingen op grote afstand. De invloed van deze lichte bevingen op zeer kleine afstand is in veel eerdere schadeonderzoeken niet beschouwd.

15.2 Gemeenschappelijke kenmerken van schade in relatie tot sterkte van de trillingen door geïnduceerde bevingen

Welke gemeenschappelijke kenmerken zijn aanwezig bij verzamelingen van cases die vergelijkbare niveaus van trillingen als gevolg van de historische bevingen hebben ondervonden (en die dus gemeenschappelijke kenmerken zouden kunnen hebben als gevolg van de bevingen).

Geen of beperkte relatie tussen trillingen door bevingen en het waargenomen schadepatroon

Geconcludeerd wordt dat de invloed van lichte bevingen bij een expert beoordeling niet is vast te stellen op basis van uitsluitend het schadepatroon. Bij niet al te sterke trillingen treedt niet een schadebeeld op dat 'typisch is voor aardbevingen'. In plaats daarvan treden schadebeelden op die vooral gedomineerd worden door andere onderliggende en samenkomende oorzaken. Dat dergelijke schadebeelden zo ontstaan, blijkt ook uit de uitgevoerde simulatieberekeningen. Daarbij speelt waarschijnlijk de triggerwerking van de bevingen een belangrijke rol.

Invloed van bevingen is moeilijk te falsificeren en eveneens moeilijk te verifiëren

De invloed van de beving kan op basis van de sterkte van de opgetreden trillingen op voorhand niet worden gefalsificeerd. Vervolgens blijkt bij de beoordeling van afzonderlijke schades dat die invloed ook niet eenduidig kan worden geverifieerd, omdat bij lichte bevingen geen koppeling kan worden gemaakt met het schadebeeld. Geconcludeerd wordt dat de invloed van een beving op de schade (in termen van toerekenbaarheid) moeilijk te duiden is, zeker op grote afstand tot de epicentra van zware bevingen. Kennis over het moment van het ontstaan van de schade is van groot belang voor het betrouwbaarder bepalen van de invloed van een beving.

Slechts bij een zeer beperkt aantal afzonderlijke schades is vastgesteld dat deze uitsluitend door de bevingen kunnen zijn veroorzaakt. Deze schades komen voor bij enkele cases binnen de voormalige contour, daar waar in het verleden sterkte trillingen als gevolg van de bevingen zijn opgetreden.

Inzicht door simulatieberekeningen in schademechanisme door trillingen als gevolg van bevingen

In het onderzoek is nagegaan via welke mechanismen gebouwen door laagfrequente trillingen als gevolg van geïnduceerde bevingen beschadigd kunnen raken. Een aardbeving veroorzaakt spanningsgolven in de bodem. Aan het aardoppervlak zijn die spanningsgolven waarneembaar in de zin van verticale en horizontale bodembewegingen. Daarnaast treden in de bodem krommingen en rekken op bij het passeren van de spanningsgolven. Zeker op enige afstand van een epicentrum bevatten de bodembewegingen vooral zeer lage trillingsfrequenties (tot ca. 10 Hz).

Die bewegingen in een punt aan het aardoppervlak worden meestal gekwantificeerd in termen van versnellingen of snelheden van de bodembeweging. Bij het aardbevingsbestendig ontwerpen van gebouwen wordt de bouwconstructie vooral ontworpen op het opnemen van de optredende verticale en horizontale traagheidskrachten die als gevolg van de beving op een gebouw werkzaam zijn. Deze worden afgeleid van de bodemversnellingen. Bodemversnellingen kunnen – ook bij lage frequenties - eenvoudig en betrouwbaar worden gemeten.

De krommingen en rekken van het aardoppervlak zijn niet eenvoudig direct te meten. Bovendien worden die krommingen en rekken in het constructief aardbevingsbestendig ontwerp niet beschouwd. Maar het zijn juist deze krommingen en rekken die ook bij bevingen met geringere sterkte aanleiding kunnen geven tot het overschrijden van de treksterkte in metselwerk en dus tot het ontstaan van de eerste scheuren. Het onderzoek geeft aan dat vooral de horizontale bodemrekken van belang zijn, meer nog dan de optredende krommingen van het aardoppervlak. De rekken en krommingen in de bodem zijn direct gerelateerd aan de snelheid van de trilling (ook trillingssnelheid genoemd). Het onderzoek bevestigt hiermee dat de trillingssnelheid het beste criterium is voor het beoordelen van een schadelijke werking van een laagfrequente trilling op een gebouw.

Er blijkt een redelijke overeenstemming tussen de uitgevoerde simulatie berekeningen en inzichten uit normen, richtlijnen en praktijkevaluaties

Door middel van simulatieberekeningen is gekeken naar de invloed van initiële spanningen door verschillende belastingen in combinatie met de spanningen van trillingen door bevingen. Hieruit blijkt dat metselwerk wanden in een gebouw uitsluitend belast door eigen gewicht en rustende belasting trillingen tot de in SBR Richtlijn A genoemde grenswaarden (globaal 3 tot 5 mm/s voor gebouwen in metselwerk) zonder schade kunnen weerstaan. Hoewel deze kwantitatieve inzichten met voorzichtigheid gehanteerd moeten worden, stemmen zij overeen met een bredere praktijkervaring (zoals bijvoorbeeld vervat in de voorschriften van SBR Richtlijn A) en met de inzichten eerdere uit schade-evaluaties, onder meer bij de beving in Huizinge (2012).

Vermoeiing is naar verwachting niet relevant als schademechanisme

In het kader van de studie is een literatuurscan uitgevoerd op resultaten naar de invloed van vermoeiingsbelasting van metselwerk onder trekbelasting. Vermoeiing houdt in bij een zeer groot aantal belastingwisselingen breuk kan optreden bij een spanningsniveau dat ruim onder het spanningsniveau van een eenmalige belasting ligt. Deze literatuurscan heeft geen bruikbare gegevens opgeleverd. Voor zover er gegevens zijn over metselwerk onder wisselende belastingen, betreft dit in de regel metselwerk onder drukbelasting (met name gemetselde spoorwegviaducten). Er zijn in de literatuur geen indicaties voor vermoeiing van metselwerk door wisselende belastingen aangetroffen. Het aantal spanningswisselingen als gevolg van de historische geïnduceerde bevingen is per gebouw in kaart gebracht. Dit is in de regel te beperkt om dit fenomeen te laten optreden.

Degradatie-effecten kunnen een rol spelen bij het vergroten van bestaande schade

Voor zover bekend uit laboratoriumonderzoek neemt de kracht benodigd om een bestaande scheur te openen en te sluiten af met het aantal wisselingen. Dit duidt op een degradatie effect: in een bestaande scheur treedt door openen en sluiten waarschijnlijk enige vergruizing op, waardoor de scheur niet meer perfect sluit en vervolgens met geringere kracht weer te openen is. Dit effect lijkt niet groot te zijn, maar kan nog niet goed worden gekwantificeerd.

Triggerwerking is aan de orde als schademechanisme

Uit de simulatieberekeningen blijkt dat schade in de vorm van scheuren in muren kan ontstaan bij relatief geringe trillingssterkte. Indien bijvoorbeeld door zettingsverschillen in muren al een spanningssituatie aanwezig is die de uiterst opneembare spanning in het materiaal bereikt heeft of enigszins heeft overschreden, kunnen hier al enige onzichtbare microscheuren zijn ontstaan. In een

dergelijke situatie kan de beving de aanleiding zijn tot het feitelijk overschrijden van de sterkte en tot het ontstaan van een grotere, zichtbare scheur. Dit wordt een 'trigger-effect' genoemd. De simulatieberekeningen geven verder aan dat de scheurwijdte vervolgens nauwelijks afhankelijk is van de sterkte van de beving, wat er op duidt dat deze schade vooral is gerelateerd aan de andere, onderliggende oorzaak (bijv. de ongelijkmatige zetting). Deze triggerwerking is relevant voor het ontstaan of zichtbaar worden van schade in de provincie Groningen.

Andere effecten van trillingen door bevingen kunnen een rol spelen bij complexe gebouwen

Bij een beperkt aantal cases in deze studie, vooral gebouwen met een complexe geometrie en/of bijzondere ligging, zijn er indicaties dat de trillingen van de bevingen op een andere wijze tot schade hebben geleid dan door directe overdracht van spanningsgolven uit de bodem op gevel en muurvelden. Het gaat hier meestal om boerderijen. Hier worden in die gevallen schades aangetroffen die een relatie hebben met een interactie tussen verschillende onderdelen van het gebouw als gevolg van de trillingen, met name een grote dakconstructie enerzijds en de constructieonderdelen die voor de horizontale stabiliteit zorgen (meestal de buitenmuren en het voorhuis) anderzijds. Het grootste deel van deze cases ligt binnen de contour. Ook hier geldt dat deze invloed van een beving moeilijk is te verifiëren.

Het inzicht over de impact van trillingen door bevingen op gebouwen is nog beperkt.

Met de resultaten van de simulatieberekeningen zijn betere inschattingen gemaakt van het aandeel van bevingen bij het ontstaan van schade. Dit geldt zowel voor de invloed van de beving als afzonderlijke en zelfstandige oorzaak, maar ook voor de invloed die bevingen samen met andere oorzaken kunnen hebben bij het ontstaan van schade. Hoewel hierdoor het begrip van het ontstaan van schade door trillingen is verbeterd, liggen op dit punt nog veel vragen open, bijvoorbeeld in termen van de invloed van verschillende gebouw- en gevelgeometrieën, de invloed van de driedimensionale werking van het gebouw, de genoemde interactie tussen verschillende bouwdelen, de sterkteparameters van de toegepaste bouwmaterialen, et cetera.

15.3. Inzichten in veel voorkomende schades, oorzaken en toerekenbaarheid in algemene zin

Welk inzicht biedt de beoordeling van deze cases in veel voorkomende soorten schade, hun voornaamste plausibele oorzaken en de grote lijnen van de overwegingen met betrekking tot de toerekenbaarheid over de schades die bij bouwkundige constructies in bredere zin zijn te verwachten?

15.3.1 Invloed van diepe bodemdaling op schade

Diepe bodemdaling is geen belangrijke schadeoorzaak in termen van veroorzaakte hellingen, krommingen en rekken

Als gevolg van diverse mijnbouwactiviteiten treedt aantoonbaar diepe bodemdaling op in de provincie Groningen. Uniforme diepe bodemdaling heeft geen gevolgen voor bouwkundige objecten. De diepe bodemdaling verloopt echter niet volledig uniform, waardoor er krommingen en hellingen optreden in de bodem en dientengevolge spanningen in bouwkundige constructies. Op basis van de openbare gegevens over deze diepe bodemdaling en aanvullende satellietdata is nagegaan in welke mate krommingen, hellingen en rekken als gevolg van diepe bodemdaling optreden. Bezien is of zij

ook in combinatie met andere omstandigheden tot schade aanleiding kunnen geven. Hiervoor is een streng falsificatiecriterium gehanteerd. Voor alle cases en locaties zijn de afgeleide krommingen, hellingen en rekken zodanig klein dat geen invloed van diepe bodemdaling wordt verwacht, ook niet in combinatie met andere oorzaken of reeds aanwezig schade.

Wel wordt opgemerkt dat in gebieden met plaatselijk optredende bodemdaling (zoals bij kleine gasvelden of bij zoutwinning zoals nabij Veendam en Winschoten), de krommingen en rekken in de bodem een orde groter zijn dan die ten gevolge van de diepe bodemdaling van het Groningenveld. Om die reden is deze potentiële oorzaak bij de objecten in die gebieden toch nog expliciet beschouwd bij de beoordeling van de afzonderlijke schades, ook al liggen de rekken onder het falsificatiecriterium. Ook die extra stap in de beoordeling heeft geen aanwijzingen opgeleverd dat er effecten van de bodemvervormingen door diepe bodemdaling zijn. Dit geldt ook voor die plaatsen waar zgn. gestapelde mijnbouwactiviteiten plaatsvinden.

Diepe bodemdaling kan een rol spelen als indirecte schadeoorzaak, vanwege aangepaste oppervlaktewaterpeilen en de doorwerking daarvan in de grondwaterstanden

In enkele afzonderlijke gevallen in het onderzoek is geconcludeerd dat aanpassingen van oppervlaktepeilen met het oog op lokale diepe bodemdaling door mijnbouwactiviteiten een invloed hebben gehad op de grondwaterstand en daarmee op ongelijkmatige zettingen. Het gaat in alle gevallen om heel specifieke situaties, onder meer met een inhomogene funderingsgrondslag en een zettingsgevoelige fundering. De invloed van de oppervlaktewaterpeilaanpassingen op de mate van (ongelijkmatige) zettingen is in deze gevallen echter moeilijk te kwantificeren. Gelet op toekomstige aanpassingen van de oppervlaktewaterpeilen in verband met verdergaande diepe bodemdaling is aanscherping van de monitoring van grondwaterstanden en van de risico inventarisatie van mogelijke toekomstige effecten op de desbetreffende panden en in die situaties op zijn plaats.

15.3.2 Gevoeligheid voor schade naar bouwtype en bouwjaarklassen

Het belangrijkste onderscheid in schade naar bouwtype betreft panden voor en na 1970

Het meest significante onderscheid dat in de studie naar voren komt, is het verschil in schadekenmerken en schadeoorzaken tussen woningen van na (circa) 1970 en daarvoor. Hoewel dit jaartal niet als een harde scheiding mag worden beschouwd, kenmerken gebouwen van na die datum zich overwegend door een andere (betere) funderingswijze en door een ander bouwsysteem dan woningen van eerdere perioden.

De voornaamste verschillen:

- Fundering op palen met gewapend betonnen funderingsbalken of fundering op gewapend betonnen funderingsstroken versus volledig gemetselde funderingsstroken in de voorgaande periode.
- Begane grondvloeren en verdiepingsvloeren van geprefabriceerde betonelementen versus houten vloeren in voorgaande periode
- Spouwconstructies met dragend binnenblad, gemetselde kalkzandsteen of gelijmde kalkzandsteenblokken ten opzichte van halfsteens en steens muren in de eerdere perioden.

Geconstateerd wordt dat de panden na 1970 in het algemeen:

- een betere fundering hebben (betere belastingspreiding, op grondverbetering of op palen) en minder zettingsverschillen vertonen. De toerekenbaarheid van de schade aan zettingsverschillen

is voor deze bouwcategorie *zeer klein*, in tegenstelling tot *middelmatig* voor de oudere gebouwen.

- De samenhang in het bouwwerk op niveau van de begane grond is groter door de gewapend betonnen funderingsbalken of stroken (de fundering kan trekspanningen beter opnemen)
- De draagconstructie (wanden en vloeren) vormen een stijver en meer samenhangend geheel.

Dit komt naar voren in mate en locatie van de schades. In de nieuwere panden is het aandeel schades aan de binnenzijde van de woning aanzienlijk groter dan aan de buitenzijde. De schades aan de binnenzijde kenmerken zich in het algemeen door geringere scheurwijdten. De schades concentreren zich vaak op aansluitingen van bouw delen (zoals wanden, wanden en vloeren).

15.3.3 Andere observaties op basis van het onderzoek

Een groot aantal schades zijn het gevolg van gebouwontwerp en krachtswerking en zijn niet gerelateerd aan de Groningse omstandigheden

De wijze waarop in Groningen is gebouwd is redelijk goed vergelijkbaar met de in Nederland toegepaste ontwerp-, berekenings- en bouw wijzen. Dit geldt zeker na de jaren 30 waarin overal gemeentelijk bouwtoezicht aanwezig was en door opleiding de architect en/of constructeur over een landelijk vergelijkbaar kennisniveau beschikte. Een groot aantal schades in de onderzochte objecten is terug te voeren tot het ontwerp van het gebouw, de fundering of de gehanteerde constructiewijze. Dit betreft algemener voorkomende gebouwgebonden schades, zoals ten gevolge van verhinderde vervormingen en opgelegde vervormingen, overbelasting of onvoldoende sterkte. Deze gebouwgebonden oorzaken zijn niet gerelateerd aan specifiek Groningse omstandigheden.

Zettingsgevoelige fundering en bijzondere ligging maken gebouwen kwetsbaar

Het merendeel van de onderzochte objecten heeft een ondiepe fundering op stroken of op in de bodem uitgebouwde en verbrede muren (zgn. fundering op staal). Slechts enkele objecten van recenter bouwjaar die in het onderzoek zijn betrokken, zijn gefundeerd op palen. De fundering op staal was in het verleden de gangbare funderingswijze. Indien mogelijk werd de fundering verdiept tot op het zand (indien en voor zover aanwezig), of tot op een voldoende draagkrachtig beschouwde klei- of leemlaag.

Veel van de onderzochte objecten van voor circa 1970 hebben een funderingswijze in combinatie met een ondergrond, die naar de huidige inzichten niet passend is. Deze funderingen zijn daardoor zeer gevoelig voor (ongelijkmatige) zettingen. Die zettingen treden op door het gewicht van het object, door verschillen in stijfheid van de bodem en die kan ook weer beïnvloed worden door wisselingen in de grondwaterstand. Opgemerkt wordt dat bij panden van na circa 1970 vaak uitgebreider grondonderzoek is uitgevoerd en het funderingsontwerp beter is, waardoor de gevoeligheid voor verschilzettingen aanzienlijk minder is.

Daarnaast heeft een aantal gebouwen een ligging op een talud of op een wierde. In taluds, hellingen en wierden treedt door de spanningen in de bodem een in de tijd (langzaam) doorgaand vervormingsproces op (zgn. kruip). Bij een bodem (voornamelijk) bestaande uit klei is op dergelijke locaties de grondwaterstand en het vochtgehalte in klei vaak zeer variabel. De grondwaterstand en het vochtgehalte in klei heeft invloed op de (kruip)eigenschappen van klei en dus op dit vervormingsproces. Een belangrijke indicatie uit dit onderzoek is dat deze aspecten bij veel panden met een zettingsgevoelige fundering aan de orde zijn. Het is echter niet goed mogelijk deze invloeden te kwantificeren.

Onduidelijkheid over grondwaterstand en de invloed hiervan op het gebouw is een fundamentele kwestie bij het beoordelen van oorzaken van zettingschade

Aanpassingen in de waterhuishouding (wijziging oppervlaktepeilen, wijzigen waterlopen, drainage, bemalingen, waterwinning etc.) kunnen aanleiding geven tot ongelijkmatige zettingen. Met name door grotere en langdurige verlaging van de grondwaterstand kunnen grondlagen worden samengedrukt en kunnen veenlagen die boven de grondwaterspiegel zijn gelegen oxideren en in volume sterk afnemen. Dit kan zettingen van de ondiepe ondergrond veroorzaken. In geval van zettingen bij een inhomogene grondslag kan dit leiden tot ongelijkmatige zettingen en daardoor extra spanningen in een bouwconstructie. In bepaalde gevallen kunnen ook verhogingen van de grondwaterstand leiden tot afname van de stijfheid en van de weerstand van de bodem en dus tot zettingen.

De natuurlijke dynamiek van neerslag en verdamping is in veel gebieden met een slecht doorlatende ondiepe ondergrond van groot belang voor de grondwaterstand of voor het vochtgehalte van de bodem. Hoewel geen onderwerp van studie in het onderhavige onderzoek, bestaat de indruk dat het inzicht in de grondwaterdynamiek als gevolg van neerslag en verdamping voor veel locaties zeer beperkt is.

Ten slotte kunnen lokale omstandigheden van grote invloed zijn op de seizoenvariatie van grondwaterstand en het vochtgehalte van de grond. Dit is bijvoorbeeld het geval indien hoge bomen in de omgeving van een gebouw staan.

Bij veel van de onderzoeksobjecten bestaat grote onduidelijkheid over de opgetreden feitelijke grondwaterstanden in het verre verleden maar ook over het afgelopen decennium. In combinatie met een zettingsgevoelige fundering is dit één van de fundamentele overblijvende onzekerheden in de beoordeling van de schade bij die onderzoeksobjecten.

15.4 Lessen te trekken uit het beoordelingsproces

Welke lessen zijn te leren uit het beoordelingsproces, die hun plaats zouden moeten vinden in procedures en methodieken voor een betere beoordeling van complexe schadegevallen in het algemeen?

15.4.1 Beoordelingsproces

Vanuit het proces van het opstellen van de plausibele scenario's en best verklarende scenario's en de bepaling van de toerekenbaarheid worden de volgende aandachtspunten gemeld:

Brede expertise in team van beoordelaars noodzakelijk

Beoordelaars hebben vaak hun eigen ervaringen en expertise. Het is gewenst dat een beoordelaar expertise heeft op het gebied van constructief gedrag van (historische) metselwerkconstructies, invloed van belastingen, waaronder aardbevingen en het gedrag van funderingen bij uiteenlopende grondslag. Indien kenniselementen ontbreken bij de beoordelaar dient dit te worden opgevangen door het team uit te breiden met personen met de benodigde expertise.

Goed ingekaderde methodiek noodzakelijk

Beoordelaars hebben in sommige gevallen de neiging om een persoonlijke methodiek met eigen definities aan te houden en in sommige gevallen om tevreden te zijn wanneer een plausibele oorzaak

is aan te wijzen. Voor een eenduidige beoordeling is in dit onderzoek gewerkt met een analyseprotocol (dat in overleg tussentijds kon worden bijgesteld), voorafgaande instructie van de beoordelaars, tussentijds bespreken van knelpunten met beoordelaars en voor meer dan 90% van de cases met een integrale controle van de analyse door een onafhankelijke tweede beoordelaar. Om eenduidigheid en betrouwbaarheid te verhogen, adviseert het onderzoeksteam vergelijkbare borgingsmaatregelen in het analyseproces op te nemen.

Bespreking en discussie van beoordelingskwesaties goede basis voor oordeelsvorming

Bij bespreking van afzonderlijke schadegevallen met een team van experts is gebleken dat er in het algemeen tot een rijker oordeel werd gekomen betreffende de plausibele oorzaken. Bespreking in een team van experts van afzonderlijke schades is echter zeer tijdsintensief. Voor een gerechtvaardigde tijdsinspanning per schade dient dit beperkt te blijven tot twijfelgevallen.

Ondersteunende rekenkundige analyse ter onderbouwing oordeel

Voor het betrouwbaarder verifiëren van potentiële oorzaken en bepalen van toerekenbaarheid is het gewenst om deze afzonderlijk en in samenhang te modelleren en zo een rekenkundige onderbouwing te geven van het expert judgement. Echter, bij kleine schades staat de benodigde tijdsinspanning niet in verhouding tot de hoogte van de schade. Een aanpak van een aantal standaardsituaties en standaardgevelconfiguraties geeft een beeld van de orde grootte verhoudingen en kan richtinggevend zijn. Modelvorming maakt het mogelijk om de grote variaties die er zijn in materiaaleigenschappen, belastingen en geometrieën mee te nemen. Modelvorming en simulatieberekeningen geven meer inzicht, maar geen absolute zekerheid.

Meer inzicht gewenst in de effectiviteit van borgingsmaatregelen

De betrouwbaarheid van de beoordeling door middel van expert judgement kan worden verhoogd door bovenstaande borgingsmaatregelen. Wanneer deze borging achterwege wordt gelaten is de variabiliteit in de beoordeling naar de mening van het onderzoeksteam onacceptabel hoog. Echter, een oordeel op basis van expert judgement houdt altijd een subjectief karakter en levert daarmee over het algemeen geen onaantastbare feiten op. Nader onderzoek naar de effectiviteit van deze en andere borgingsmaatregelen is gewenst.

15.4.2 Gegevensverzameling

Vanuit het proces van gegevensverzameling en de presentatie van de gegevens ten behoeve van de voorbereiding van een beoordeling worden de volgende aandachtspunten gemeld:

Dossiers met bouwkundige informatie zijn belangrijk, maar in een aantal gevallen onvolledig of niet beschikbaar

De beschikbaarheid van tekeningen die op schaal de bouwconstructie weergeven en daarmee inzicht bieden in geometrie en opbouw van een gebouw, toegepaste constructieprincipes en bouwmaterialen en die daardoor inzicht geven in de krachtswerking is onontbeerlijk bij een gedegen beoordeling van bouwkundige schades.

Deze informatie is zoveel mogelijk ontleend aan de dossiers van het gemeentelijk bouwtoezicht. De beschikbaarheid van deze dossiers begint tussen 1920 en 1930. Maar ook van panden die ver na die periode zijn gebouwd, zijn soms geen gegevens te vinden of ontbreken belangrijke gegevens, zoals

bijvoorbeeld funderingsgegevens. In totaal in 5 gevallen in het onderzoek is via aanvullende opmetingen ter plaatse een beeld gevormd van de geometrie en opbouw van de bouwconstructie.

Kwaliteit van de beschikbare schadeopname rapporten is vaak onvoldoende voor een adequate beoordeling van de schade

In het onderzoek is primair gebruik gemaakt van de vastlegging van de schade in reeds beschikbare schadeopname rapporten. Hoewel de selectie van de onderzoeksobjecten mede is gebaseerd op basis van de kwaliteit van de schadeopname rapporten, viel de kwaliteit van de oudere schade opname rapporten (voor 2016) toch vaak tegen. Het fotowerk, de omschrijving en de plaatsaanduiding van schades waren soms onvoldoende duidelijk. Hierdoor konden niet alle schades goed worden getraceerd. Dit is zoveel mogelijk door aanvullende inspecties en bezoeken ter plaatse gecompenseerd. De kwaliteit van de schadeopname rapporten is een belangrijke oorzaak dat in een aantal gevallen geen goede beoordeling van de oorzaken van de schade kon worden uitgevoerd en geen best verklarende scenario kon worden vastgesteld.

Resultaten van aanvullend onderzoek ter plaatse in de vorm van lintvoegwaterpassingen, vaststelling van funderingsbreedte en –diepte, en grondboringen zijn cruciaal voor de beoordeling

Bij alle gebouwen is aanvullend onderzoek ter plaatse uitgevoerd. Bij alle 69 gebouwen zijn lintvoegwaterpassingen uitgevoerd om ongelijkmatige zettingen te kwantificeren, die sinds de bouw zijn ontstaan. Deze vorm van aanvullende informatie is voor de beoordeling van de schade bij veel objecten cruciaal gebleken. Bij 50 van de 69 gebouwen is verder de aanlegdiepte en -breedte van de fundering vastgesteld. Dit gegeven ontbreekt vaak in de bouwdocumentatie. In deze gevallen zijn ook grondboringen verricht om de opbouw en homogeniteit van de ondiepe ondergrond (in de regel de bovenste 3 meter) vast te stellen. Ook die gegevens zijn van groot belang gebleken bij de beoordeling van de schade.

Gegevens over bodemdaling op gebouwniveau via satellietwaarneming (InSAR) zijn goed bruikbaar

De monitorrapportages van de mijnbouwexploitanten geven een beeld van de diepe bodemdaling over een groot gebied. De mate van detail in deze monitorrapportages is vooral bruikbaar voor het bepalen van de bodemdaling bijvoorbeeld voor besluiten over oppervlaktewater peil aanpassingen. De monitorrapportages zijn echter onvoldoende afgestemd op de beoordeling van effecten op gebouwen. De monitorgegevens zouden daartoe gepresenteerd moeten worden in termen van krommingen en hellingen van het aardoppervlak en bij voorkeur aangevuld met op basis daarvan te verwachten horizontale rekken in de ondergrond, zowel door kromming als door de hoekverdraaiing. In dit onderzoek is dit zoveel mogelijk ondervangen door aanvullend ook gebruik te maken van objectgerichte informatie op basis van satellietwaarnemingen. De gehanteerde InSAR techniek maakt het mogelijk de bodemdaling ter plaatse van bouwkundige objecten redelijk nauwkeurig in beeld te brengen en ook een schatting te maken van de lokale helling en kromming van het bodemoppervlak.

Informatie over sterkte van historische geïnduceerde bevingen op gebouwniveau is noodzakelijk

De informatie over opgetreden geïnduceerde bevingen in Groningen wordt door KNMI onder zijn wettelijke opdracht verzameld en is openbaar beschikbaar. Het betreft gegevens over epicentra, diepte en magnitudes van bevingen. Meetnetten met versnellingsensoren van KNMI en TNO bieden een basis om breder over de provincie schattingen te kunnen maken van de opgetreden trillingen als gevolg van bevingen. In het onderzoek is nagegaan of betrouwbare uitspraken gedaan kunnen worden voor de in het verleden opgetreden trillingen ter plaatse van een schadeobject. Immers, meetresultaten op gebouwniveau zijn voor de onderzochte gebouwen niet beschikbaar. In deze

studie zijn rekenmodellen gebruikt om per locatie uitspraken te kunnen doen. Daarbij zijn alle historische geïnduceerde bevingen van 1986 meegenomen. Wel moet bedacht worden dat deze uitspraken over de trillingssterkte alleen gedaan kunnen worden in termen van een kans dat een bepaald trillingsniveau is overschreden. Er zijn immers onzekerheden verbonden aan de uitgevoerde interpolaties. Met behulp van de gehanteerde modellen kunnen nu schattingen met acceptabele nauwkeurigheid worden gegeven van de trillingen die bij historische bevingen op een willekeurige zijn opgetreden. Verdere verfijning van deze modellen is mogelijk en zeker wenselijk, maar is voor de beoordeling van aardbevingseffecten waarschijnlijk niet van doorslaggevend belang.

De beschikbare informatie over de ondergrond op basis van openbare bronnen vormt een goed uitgangspunt; gericht lokaal onderzoek naar ondergrondcondities is in veel gevallen toch noodzakelijk

Veel ondergrondgegevens in Nederland zijn beschikbaar via het DINO-loket. De afgelopen periode zijn door Deltares in de provincie Groningen nog nauwkeuriger gegevens van de ondergrond verzameld ten behoeve van het berekenen van de respons van de bodem als gevolg van aardbevingen. De informatie van de ondergrond via het DINO-loket bood voor deze studie in het algemeen een goed uitgangspunt, maar lokaal uitgevoerd grondonderzoek is meestal noodzakelijk om zicht te krijgen op de lokale situatie en ook op de lokale variaties.

Informatie over oppervlaktewaterpeilen is in de meeste gevallen beschikbaar en bruikbaar voor de beoordeling

De waterschappen zijn verantwoordelijk voor het peilbeheer in de Provincie Groningen. Locatiegebonden gegevens over de oppervlaktewaterpeilen en wijzigingen daarin gedurende de afgelopen 15 jaar zijn bij de waterschappen bekend en opvraagbaar. Recente peilbesluiten zijn openbaar en ook via internet beschikbaar. Voor oudere peilgegevens moeten in de regel reconstructies worden gemaakt via de waterstaatskaarten, welke beschikbaar zijn tot ca. 1980. Oppervlaktewaterpeilen in poldergebieden in bodemdalingsgebied vormen een bijzonderheid, aangezien het polderpeil hier in de regel mee zakt met de bodemdaling. Het polderpeil ten opzichte van het maaiveld blijft daardoor in het poldergebied ongewijzigd, maar het absolute polderpeil verandert door de bodemdaling wel ten opzichte van NAP. Die actueel ingemeten hoogten van het polderpeil ten opzichte van NAP zijn echter niet altijd voorhanden.

Informatie over grondwaterstanden is voor veel panden niet beschikbaar. Dit vormt een lacune bij de beoordeling van de schade.

Het genoemde DINO-loket bevat openbaar beschikbare informatie over de grondwaterstanden in diverse peilbuizen verspreid over Nederland. De dichtheid van dit meetnet verschilt aanzienlijk van plaats tot plaats. Ook de compleetheid en de bemonsteringsperiodes zijn vaak onvoldoende om een oordeel te geven over wijzigingen in de afgelopen decennia. Vaak zullen lokale of regionale grondwaterstudies uitgevoerd moeten worden, waarbij ook rekening wordt gehouden met oppervlaktewaterpeilveranderingen, neerslag en verdamping, om betrouwbare locatie gebonden uitspraken te kunnen doen over de grondwaterstand ter plaatse van een object. Dergelijke grondwaterstudies zijn in het kader van dit onderzoek niet uitgevoerd. De onzekerheid in de lokale grondwaterstand is in deze studie daardoor aanzienlijk. De invloed van grondwaterwinning en van bemalingen nu en in het verleden is een noodzakelijk onderdeel bij dergelijke studies naar (historische) grondwaterstanden. Deze lacune zou verder ingevuld moeten worden.

De informatie over gebruik en (her)inrichting van de omgeving is in veel gevallen adequaat voor de beoordeling van omgevingseffecten op de schade.

Gegevens over gebruik en herinrichting van de omgeving van gebouwen is beschikbaar op het niveau van topografische kaarten. Deze informatie is openbaar beschikbaar en biedt voor de afgelopen ruim 80 jaar een goed beeld van de veranderingen in termen van ruimtegebruik en bebouwing die bij de objecten hebben plaatsgevonden.

15.5 Aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek

In deze paragraaf is aangegeven welke aanbevelingen worden gedaan op basis van het beoordelingsproces. Een aantal van deze aanbevelingen zouden hun plaats moeten vinden in procedures en methodieken voor een betere beoordeling van complexe schadegevallen in het algemeen.

Leg bestaande schade aan panden beter vast.

Bij deze studie is gebleken dat de kwaliteit van de bouwkundige schadeopnamen gedurende de laatste paar jaar in Groningen sterk is verbeterd. Dat geldt de aspecten vastlegging, volledigheid, nauwkeurigheid en de opname van de context.

In deze studie zijn schades beoordeeld op basis van schadeopname rapporten. Van de meeste schades is echter niet bekend of niet zeker wanneer zij zijn ontstaan. Een ouderdomsbepaling van scheuren in metselwerk is moeilijk uitvoerbaar. De beschikbaarheid van een logboek met aanwezige schade (die de functie kan hebben van een bouwkundige vooropname) vergroot de duiding van de schade-oorzaken aanzienlijk. Overwogen zou moeten worden dit voor specifieke gebieden of specifieke kwetsbare panden in te voeren.

Grotere rol voor lintvoegwaterpassingen

De lintvoegwaterpassing moet worden toegevoegd als vast element bij de beoordeling van belangrijke schades waar ongelijkmatige zettingen mogelijk een rol spelen. De informatie uit de lintvoegwaterpassingen is cruciaal voor een goede beoordeling van de effecten van zettingsverschillen.

Maak onzekerheden in de beoordeling van bouwkundige schades expliciet

Het gevolgde beoordelingsproces legt door het expliciteren van oorzaken in de vorm van scenario's ook de onzekerheden bloot in de beoordeling. Aanbevolen wordt beoordelende deskundigen nadrukkelijk te vragen ook de onzekerheden in hun beoordeling expliciet te maken. Dat zal op termijn de kwaliteit van de beoordelingen vergroten en betere gegevensverzameling of onderzoek in gang kunnen zetten om de onzekerheden te verminderen.

Maak meer gebruik van modelvorming ter onderbouwing van de kans op schade

Modelvorming maakt het mogelijk om de grote variaties die er zijn in materiaaleigenschappen, belastingen en geometrieën mee te nemen. De modelvorming van gebouwen zou verder moeten worden uitgebreid voor meer bouwtypen en ondergrondsituaties. Dit geldt zowel de invloed van bevingen als van veel voorkomende situaties in gebouwen voor bijvoorbeeld zettingsverschillen, verhinderde vervormingen of opgelegde vervormingen. Ook de koppeling tussen een tweedimensionale beschouwing van de krachtswerking in gevel en muurvelen met de

driedimensionale beschouwing zou moeten worden gemaakt. Hierdoor ontstaat een completer en meer omvattend beeld van de spanningssituatie, zodat het ontstaan van schade beter kan worden onderbouwd en zgn. *fragility curves* voor het ontstaan van de eerste schades kunnen worden onderbouwd.

Breid bestaande monitoringprogramma's voor bodemdaling uit en maak meer gebruik van beschikbare nieuwe monitoringtechnologie.

De effecten van bodemdaling worden nu eenmaal per 5 jaar gerapporteerd, in de vorm van puntinformatie over grote gebieden. Een effectieve monitoring vraagt het individualiseren van de effecten van bodemdaling van vaste meetpunten in een gebied naar bodemdaling per afzonderlijk pand. Dit is door gebruik te maken van InSAR kosteneffectief mogelijk.

De effecten van bodemdaling zijn tot nu toe beperkt tot verticale zakking. Aanbevolen wordt op basis van betere meettechnieken de effecten bodembeweging per locatie breder te presenteren, dat wil zeggen naast verticaal ook horizontaal, en ook afgeleide grootheden zoals helling, kromming en rek te bepalen. Daarmee kunnen de effecten van diepe bodemdaling objectiever worden gepresenteerd en kan een directe verbinding met de effecten op een gebouw worden gelegd.

Bovenstaand is het meest gewenst bij mijnbouwactiviteiten met lokale diepe bodemdalingseffecten zoals kleinere gasvelden, de zoutwinning bij Veendam en Heiligerlee en de gasopslag bij Veendam en Heiligerlee.

Stel de beschikbare sensornetwerken voor het meten van trillingen open voor breder gebruik

Het KNMI- en TNO-sensornetwerk voor het meten van trillingen van bevingen is een belangrijk en uniek netwerk, door de ruimtelijke schaal (omvat de gehele provincie) en door het aantal sensoren dat in de netwerken is opgenomen. Met name de gegevens uit het grote en provincie dekkende sensornetwerk van TNO zouden (onder voorwaarden) beschikbaar gesteld moeten worden voor breder gebruik. Hierdoor kan de schatting van de trillingssterkte per beving verder worden geoptimaliseerd en kan de resterende onzekerheid in de nu gehanteerde modellen voor het bepalen van optreden trillingssterkten worden verminderd. Deze gegevens blijken bij de beoordeling van schades (zowel in termen van oorzakelijkheid als toerekenbaarheid) van groot belang te zijn.

Verbeter het inzicht in actuele grondwaterstanden bij kwetsbare objecten aanzienlijk

Beter inzicht is nodig in de grondwaterstanden bij kwetsbare objecten, i.e. objecten met funderingen op weinig draagkrachtige bodem. Hiertoe zou het meetnet van grondwaterstanden aanzienlijk moeten worden verdicht, eventueel met eenvoudiger meetpunten, eventueel specifiek gericht op panden met schade. Hierbij moet ook aandacht zijn voor de invloed van eventuele wijzigingen in het grondwater in diepere watervoerende pakketten.

Het verdichten van het grondwatermeetnet wordt aanbevolen in gebieden waar lokale aanpassingen van het oppervlaktewaterpeil worden doorgevoerd (vooral indien dit aanpassingen betreft als gevolg van diepe bodemdaling door mijnbouwactiviteiten).

De grondwaterdynamiek in situaties op hellingen van wierden en op taluds zou eveneens beter gemonitord moeten worden, om daarmee inzicht te krijgen in de mogelijke effecten hiervan op het vervormingsgedrag van hellingen van wierden en op taluds.

Verbeter het inzicht in de complexe wisselwerking tussen grondwaterstanden en ondiepe en diepe bodemdaling en bevingen

Door de frequente (wekelijkse) metingen in de tijd, bevatten de data van de satellietwaarnemingen een groot potentieel om informatie over de gevolgen de complexe interactie van grondwaterstanden, ondiepe en diepe bodemdaling op bebouwing en infrastructuur beter in kaart te brengen. Hiermee kan meer begrip worden gekregen voor de 'natuurlijke dynamiek' van de bodem en de bebouwing die er op is gefundeerd. Dit is in het bijzonder relevant voor gebouwen gelegen op hellingen, taluds of wierden of andere omstandigheden waarbij de draagkracht en/of stabiliteit van de bodem gevoelig is voor de grondwaterstand. Ook zouden deze data gebruikt kunnen worden om meer begrip te krijgen van de invloed van bevingen op deze processen en op de gevoeligheid voor schade van gebouwen als gevolg hiervan. Overwogen kan worden hiervoor in een onderzoeksprogramma een beperkt aantal onderzoeksobjecten te selecteren en op en nabij deze objecten intensiever relevante metingen uit te voeren, naar eigenschappen van bodem en grondwater, naar de stand van het gebouw en naar de effecten van bevingen.

Referenties

- [2.1] Rots, J.G. and P. Van Staalduinen, Voorstel onderzoek oorzaken bouwkundige schade Groningen. 2016, TU Delft: Delft.
- [2.2] De Vent, I.A.E., Prototype of a diagnostic decision support tool for structural damage in masonry. 2011, TU Delft: Delft.
- [2.3] De Lange, G., et al., Gebouwschade Loppersum. 2011, Deltares.
- [2.4] Stichting Bouw Research, Scheurvorming in gemetselde wanden. 1976: Alphen aan den Rijn.
- [2.5] Stichting Bouw Research, Scheuren in woningen. 1969: Alphen aan den Rijn.
- [2.6] Van Balen, K., et al., Expert system for the evaluation of the deterioration of ancient brick structures. 1999, European Commission.
- [2.7] Ratay, R.T., Forensic Structural Engineering handbook. 2 ed. 2009: McGraw Hill.
- [2.8] Parkinson, G., et al., Appraisal and repair of masonry. 1996, London: Thomas Telford Ltd.
- [2.9] Freeman, T.J., R.M.C. Driscoll, and G.S. Littlejohn, Has your house got cracks? 2002, London: Thomas Telford Publishing and BRE.
- [2.10] De Vent, I.A.E., Structural damage in masonry -developing diagnostic decisions support. 2011, TU Delft: Delft.
- [2.11] Borsje, H. and S.A.J. De Rlichemont, Methodiek voor onderzoek naar oorzaak van gebouwschade - versie 2. 2011, TNO: Delft.
- [2.12] Scheltens, S.J. and H. Laagland, Schadeonderzoek buitengebied - beoordelingsmethodiek. 2016, Witteveen en Bos: Deventer.
- [2.13] NAM, Handboek Aardbevingschade - Bevingschade in het Groningen-gasveld. 2015: Assen.
- [3.1] I.A.E. de Vent, Structural damage in masonry - Developing diagnostic decision support, Proefschrift TU Delft, Delft, 2011
- [3.2] I.A.E. de Vent, Prototype of a diagnostic decision support tool for Structural damage in masonry, Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Delft, 2011
- [3.3] Borsje, H. and S.A.J. De Rlichemont, Methodiek voor onderzoek naar oorzaak van gebouwschade - versie 2. 2011, TNO: Delft.
- [4.1] Borsje, H. and S.A.J. De Rlichemont, Methodiek voor onderzoek naar oorzaak van gebouwschade - versie 2. 2011, TNO: Delft.

- [4.2] I.A.E. de Vent, Structural damage in masonry - Developing diagnostic decision support, Proefschrift TU Delft, Delft, 2011
- [4.3] J.P. Pruiksmā, A. R3zszs, Vibration levels at foundations of houses in Groningen due to induced earthquakes, TNO rapport 2017 R 10493, 14 april 2017
- [4.4] Julian J Bommer, Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Peak Ground Velocity from Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion, November 2016
- [4.5] Julian J Bommer, Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, Empirical Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion Updated Model for Application to Smaller Earthquakes, November 2017
- [4.6a] Arcadis Onderzoeksrapport Hornhuizen-Noord (incl. Analyse + Bodem en Water)
- [4.6b] Arcadis Onderzoeksrapport Zuidhorn-Hornhuizen (incl. Aanvullende Analyse Zuidhorn-Hornhuizen en incl. Addendum Bodem & Water Zuidhorn-Hornhuizen)
- [4.6c] Arcadis Onderzoeksrapport Leek (incl. Analyse + Bodem en Water)
- [4.6d] Arcadis Onderzoeksrapport Groningen-West (inc. Aanvullende Analyse Groningen-West en incl. Addendum Bodem & Water Groningen-West)
- [4.6e] Arcadis Onderzoeksrapport Paterswolde-Glimmen (incl. Analyse + Bodem en Water)
- [4.6f] Arcadis Onderzoeksrapport Kropswolde (incl. Aanvullende Analyse Kropswolde en incl. Addendum Bodem & Water Kropswolde)
- [4.6g] Arcadis Onderzoeksrapport Kropswolde-Zuid (incl. Analyse + Bodem en Water)
- [4.6h] Arcadis Onderzoeksrapport Veendam (incl. Aanvullende Analyse Veendam en incl. Addendum Bodem & Water Veendam)
- [4.6i] Arcadis Onderzoeksrapport Meeden-Finsterwolde (incl. Analyse + Bodem en Water)
- [4.6j] Arcadis Onderzoeksrapport Finsterwolde (incl. Aanvullende Analyse Finsterwolde en incl. Addendum Bodem & Water Finsterwolde)
- [4.6k] Arcadis Onderzoeksrapport Oldambt (incl. Analyse + Bodem en Water)
- [4.7] Witteveen en Bos 'Schadeonderzoek Groningen Buitengebied – Technische Rapportage, ASN177-12/16-021.191 versie 19 november 2016.
- [5.1] Borsje, H. and S.A.J. De Richemont, Methodiek voor onderzoek naar oorzaak van gebouwschade - versie 2. 2011, TNO: Delft.
- [6.1.] Rots, J.G. and P. Van Staalduinen, Voorstel onderzoek oorzaken bouwkundige schade Groningen. 2016, TU Delft: Delft.

- [6.2] De Vent, I.A.E., Prototype of a diagnostic decision support tool for structural damage in masonry. 2011, TU Delft: Delft.
- [6.3] De Lange, G., et al., Gebouwschade Loppersum. 2011, Deltares.
- [6.4] Stichting Bouw Research, Scheurvorming in gemetselde wanden. 1976: Alphen aan den Rijn.
- [6.5] Stichting Bouw Research, Scheuren in woningen. 1969: Alphen aan den Rijn.
- [6.6] Van Balen, K., et al., Expert system for the evaluation of the deterioration of ancient brick structures. 1999, European Commission.
- [6.7] Ratay, R.T., Forensic Structural Engineering handbook. 2 ed. 2009: McGraw Hill.
- [6.8] Parkinson, G., et al., Appraisal and repair of masonry. 1996, London: Thomas Telford Ltd.
- [6.9] Freeman, T.J., R.M.C. Driscoll, and G.S. Littlejohn, Has your house got cracks? 2002, London: Thomas Telford Publishing and BRE.
- [6.10] De Vent, I.A.E., Structural damage in masonry -developing diagnostic decisions support. 2011, TU Delft: Delft.
- [6.11] Borsje, H. and S.A.J. De Richemont, Methodiek voor onderzoek naar oorzaak van gebouwschade - versie 2. 2011, TNO: Delft.
- [6.12] Scheltens, S.J. and H. Laagland, Schadeonderzoek buitengebied - beoordelingsmethodiek. 2016, Witteveen en Bos: Deventer.
- [6.13] NAM, Handboek Aardbevingschade - Bevingschade in het Groningen-gasveld. 2015: Assen.
- [6.14] Luckhardt, C.G. and W. Bechtel, How to do things with logic. 1994: Lawrence Elbroune Assoc.
- [6.15] Van Koppen, P., Overtuigend bewijs. 2011: Nieuw Amsterdam.
- [6.16] Bureau, A.T.S., Analysis, Causality and Proof in Safety Investigations. 2008: Canberra City.
- [6.17] Forensic Practices Committee Technical Council of Forensic Engineering, Guidelines for forensic engineering practice. 2 ed. 2012: ASCE.
- [6.18] Kahneman, D., Thinking fast and slow. 2011, London: Penguin Books.
- [6.19] ESReDA, Guidelines for safety investigations of accidents. 2009, European Safety, Reliability and Data Association.
- [6.20] Commissie bodemdaling door aardgaswinning, Criteria voor vaststellen van gebouwschade door bodemdaling. 2016: Groningen.
- [6.21] Boscardin, M.D. and E.J. Cording, Building Response to Excavation Induced Settlement. Journal of Geotechnical Engineering, 1989. 115(1): p. 1-21.
- [6.22] F3O, CURNET, and SBR, Richtlijn onderzoek en beoordeling van houten paalfunderingen onder gebouwen. 2011, F3O/CURNET/SBR.

- [6.23] Korff, M., et al., Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen - Quick scan naar de sterkte van de infrastructuur. 2013, Deltares: Delft.
- [6.24] Holscher, P., Literatuuronderzoek verdichting. 2016, Deltares: Delft.
- [6.25] Holscher, P. and D.A.d. Lange, Fragility curves voor verdichting door trillingen. 2016, Deltares: Delft.
- [6.26] Commissie bodemdaling, Studieresultaten betreffende onelijkmatige zakkingen in verband met aardgaswinning in de provincie Groningen. 1987: Groningen.
- [6.27] CROW, Richtlijn drempels, plateaus en uitritten. 2014: Ede.
- [6.28] TNO rapport R98-1403.
- [7.1] H. Borsje, J.P. Pruiksma, S.A.J. de Richefont, Monitoringsnetwerk gebouwtrillingen – Analyse aardbevingen in 2014 en 2015, TNO rapport R10217, Delft, 2016
- [7.2] H. Borsje, H., & E.A.F. Langius, TNO-rapport 2015 R10501 "Monitoring Network Building Vibrations".
- [7.3] J.P. Pruiksma, A. Rózsás, Vibration levels at foundations of houses in Groningen due to induced earthquakes, TNO rapport 2017 R 10493, 14 april 2017
- [7.4] Julian J Bommer, Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Peak Ground Velocity from Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion, November 2016
- [7.5] Julian J Bommer, Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, Empirical Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion Updated Model for Application to Smaller Earthquakes, November 2017
- [7.6] KNMI website – overzicht alle geïnduceerde bevingen <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus> (geraadpleegd 14 augustus 2017)
- [7.7] Witteveen en Bos 'Schadeonderzoek Groningen Buitengebied – Technische Rapportage, ASN177-12/16-021.191 versie 19 november 2016.
- [7.8] C.P.W. Geurts, Comparison between TNO sensor data and GMPE-PGV values, TNO briefrapportage TNO-2017-BF-0100311081 d.d. 18 december 2017
- [8.1] Statusrapport 2010 en Prognose tot het jaar 2070 - Bodemdaling door Aardgaswinning-NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe - EP Document Nummer: EP201006302236, datum September 2010, uitgave van NAM UIE/T/DPE (Bodembeweging) i.s.m. NAM ITUI/AW (Geodesie)
- [8.2] Statusrapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080, - Bodemdaling door Aardgaswinning-NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe - EP Document Nummer: EP201511213444 , datum December 2015, uitgave NAM B.V.

- [8.3] J.P. Pruiksmā, 'Vervorming van de bovengrond door NEDMAG zoutwinning en schade aan bebouwing', GeoDelft – rapport CO352471/07 Delft, juli 2001
- [8.4] J. Brinkman, Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing, Deltares Rapport 1221076-000, Delft 2016
- [8.5] A.J. Speelman, H.K. Hoentjen, Geodetisch onderzoek Aardgasbuffer Zuidwending Een vergelijking tussen de meetmethodieken; Optische waterpassing, Radarinterferometrie, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Antea groep, projectnummer 0404675.00 definitief revisie 01 18 augustus 2016 in opdracht van NV Nederlandse Gasunie
- [8.6] Resultaten monitoring bodembeweging Aardgasbuffer Zuidwending, periode Q3 - 2017 1 oktober 2013 - 30 september 2017 Antea rapport projectnummer 412762 definitief 9 oktober 2017
- [8.7] Geodetisch onderzoek Aardgasbuffer Zuidwending, Antea rapport 2697956, rev01, 15-7-2014.
- [8.8] Waterschap Hunze en Aa's – Peilbesluit Winschoten
- [8.9] Prof.dr.ir. R.F. Hanssen, Dr.ir. S. Samiei-Esfahany, Ir. Jeroen Kunnen, Address-based quick-scan of object stability using satellite radar interferometry - An analysis of building objects in the wider Groningen area, potentially affected by earthquake damage, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, report (status: draft)
- [8.10] S. Samiei-Esfahany, R.F. Hanssen, K. van Thienen-Visser, A. Muntendam-Bos, On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates, *S, Proc. 'Fringe 2009 Workshop'*, Frascati, Italy, 30 November – 4 December 2009 (ESA SP-677, March 2010)
- [8.11] H. Kratzsch, Bergschadenkunde, Springer, Berlin, 1974
- [9.1] J.R. Zoetendal, Y. de Leeuw, M.J. Zwaanswijk, 'Effectenstudie aardgaswinnings Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen – Waterhuishouding' - Projectnummer : 190920, Documentnummer : 06/0033, Grontmij Nederland bv, Drachten, 5 januari 2006
- [9.2] Bijngte, J.L., R. P. Boeije en J. W. M. Lambert (2012) Raaien onderzoek Electraboezem 2^e schil; Deltares, Delft.
- [9.3] Ebbers, E. (2013) Eindrapportage Electraboezem 2e schil. Eindrapportage van de grondwater- en oppervlaktewatermonitoring van Electraboezem 2e schil.; Tauw BV, Assen.
- [9.4] Dr. Ir. J.R. (Jos) von Asmuth, Ing. I. (Inke) Leunk, 'Hydrologisch meetnet Electraboezem 2e schil Effecten van boezempeilverlaging en bodemdaling', rapport KWR 2014.039, Opdrachtnummer A309697 / 400169, KWR Nieuwegein, Juli 2014, In opdracht van Waterschap Noorderzijlvest
- [9.5] GeoDelft 2007 – Onderzoek effecten peilverlaging Oude Pekela 414942-012, oktober 2007
- [9.6] Deltares 2008 – Toelaatbaarheid relatieve peilverlaging, 414943-0005

- [9.7] ir. M.J.M. van Houten , Hydrologisch onderzoek Wierden, IWACO rapport 2240630 Groningen. 3 mei 1999, opdrachtgever provincie Groningen.
- [9.8] Dr. ir. E.W. Meijles, Dr. G. Aalbersberg, Prof. dr. H.A. Groenendijk, Terp composition in respect to earthquake risk in Groningen, Rijksuniversiteit Groningen, maart 2016
- [9.9] (Arcadis) Watersysteemanalyse voor onderzoek gebouwschade bodemdalingsgebied Nedmag in opdracht van Waterschap Hunze en Aa's, 10 januari 2013 076815886:A – Definitief, Arcadis rapport C01022.100266.0200
- [9.10] B.D. de Jong, Verkennend onderzoek waterhuishouding Zuidwending – Analyse en maatregelen – Consortium Aardgasbuffer Zuidwening en Waterschap Hunze en Aa's - maart 2005 Arcadis rapport 110204/NA5/083/000525/010
- [9.11] Waterschap Hunze en Aa's – Peilbesluit Duurswold, november 2013
- [9.12] Waterschap Hunze en Aa's – Peilbesluit Oldambtboezem, augustus 2015
- [9.13] Waterschap Hunze en Aa's – Toelichting Peilbesluit Winschoten, februari 2017
- [9.14] Waterschap Hunze en Aa's – Peilbesluit Blauwestad, juni 2015
- [9.15] Waterschap Hunze en Aa's – Peilbesluit Veendam – Muntendam, mei 2016
- [9.16] Informatie verstrekt door Waterschap Noorderzijlvest.
- [9.17] J. Buma, H. Bootsma, Onderzoek naar fluctuaties in de grondwaterstand in relatie tot Gebouwschade – analyse van langjarige grondwatermodelberekening, Deltares rapportg 1210834-002, Deltares, Delft, 2017
- [10.1] P.C. van Staalduinen, J. van der Vecht, Schade aan bouwwerken door trillingen; meet- en beoordelingsrichtlijn, Stichting Bouwresearch, Rotterdam 1993
- [10.2] P.C. van Staalduinen, M.Th.J.H. Smits, Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen, TNO rapport B-90-822, opgesteld in opdracht van Stichting Bouwresearch, revisie januari 1993.
- [10.3] Waarts P.H., Ostendorf C.J. , SBR-richtlijn Meet en beoordelingsrichtlijn: Trillingen, deel A Schade aan gebouwen. Stichting Bouw Research, 2003
- [10.4] Mondelinge communicatie C. Geurts, 29 juni 2017
- [10.5] B. Raaijmakers Modelling van Constructies bij een Dynamische Excitatie via de fundering, TNO Bouw rapport 93-CON-R1383, januari 1994
- [10.6] P.H. Waarts, Kans op schade aan bouwwerken door trillingen, TNO Rapport 97-CON-R1698, december 1997
- [10.7] P.C. van Staalduinen, C.P.W. Geurts, De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland: inventarisatie, TNO rapport 97-CON-R1523-1 (1998)
- [10.8] W. Roos, P.H. Waarts en B.B.T. Wassing, Kalibratiestudie schade door aardbevingen, TNO rapport TNO-034-DTM-2009-04435 (2009)

- [10.9] B.B.T. Wassing, B. Dost, Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen, Integratie van Deelstudies. TNO/KNMI-rapport TNO 2012 R11139 (2012)
- [10.10] H. Borsje, J.N. Huibregtse, Analyse van de gevolgen van de aardbeving te Huizinge d.d. 16 augustus 2012, TNO-rapport 2012 R10227, 13 februari 2013
- [10.11] Arup: 2013: Groningen 2013 Seismic Risk Study –Earthquake Scenario –based Risk assessment (REP /229746/SR001, 29 november 2013)
- [10.12] C.P.W. Geurts en R.D.J.M Steenbergen, ‘Relatie tussen PGA waarden en kans op schade voor geïnduceerde aardbevingen in Groningen’, TNO notitie M0100296951 d.d. 13 juni 2016.
- [10.13] P. Korswagen Eguren, Analysis and Reproduction of Waarts’ Framework for Probability of Damage Initiation- TU Delft Report – Summary Version 1: 3rd of July of 2017
- [10.14] H. Borsje, J.P. Pruiksmann, S.A.J. de Richemont, Monitoringsnetwerk gebouwtrillingen – analyse aardbevingen in 2014 en 2015, TNO-rapport TNO 2017 R10217, 12 december 2016
- [10.15] Witteveen en Bos ‘Schadeonderzoek Groningen Buitengebied – Technische Rapportage, ASN177-12/16-021.191 versie 19 november 2016.
- [10.16] Julian J Bommer, Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Peak Ground Velocity from Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion, November 2016
- [10.17] J.P. Pruiksma, A. Rózsás, Vibration levels at foundations of houses in Groningen due to induced earthquakes, TNO rapport 2017 R 10493, 14 april 2017
- [10.18] P. Hölscher, Literatuuronderzoek Verdichting, Deltares rapport 1220511-000, Delft 2016
- [10.19] D.A. de Lange, P. Hölscher. Fragility curves voor verdichting door trillingen, Deltares rapport 1220511-000, Delft 2016
- [10.20] B. Das. Fundamentals of Soil Dynamics.: Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam / New York, 1983
- [10.21] R. Van der Salm, R., P. Hölscher, P. & A. Snethlage, SBR-A richtlijn niet eenduidig voor trillingsgevoelige funderingen. *Geotechniek*, 2012, Volume 3, pp. 8-11.
- [10.22] M. Korff, H.M.G. Kruse, T.P. Stoutjesdijk, J. Bredeveld, G.A. van den Ham, P. Holscher, G. de Lange, P. Meijers, E. Vastenburger, Vermaas, M.A.T. Visschedijk, Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen - Quick Scan naar de sterkte van de infrastructuur, Deltares rapport 1208149-000, Delft 2013
- [10.23] Kruse, G.A.M. (1998) Evaluatie van liquefactie door kleine ondiepe aardbevingen in Noord-Nederland. *Grondmechanica Delft*, CO-383750/13, november 1998
- [10.24] Borsje, H., & Langius, E. A. F., TNO-rapport 2015 R10501 "Monitoring Network Building Vibrations".
- [10.25] Cornelissen, H.A.W., Fatigue Failure of Concrete in Tension, *Delft University of Technology, HERON*, 29 (4), 1984 ISSN 0046-7316

- [10.26] D.L. Allaix, Fragility functions for damage in masonry structures caused by vibrations, TNO rapport 2017 R11272, TNO, Delft, januari 2017
- [10.27] L. Hellebrandt, C.P.W. Geurts, Herziening SBR Richtlijn A: Literatuurstudie, TNO rapport 2016 R10863, TNO, Delft, september 2016
- [10.28] L. Hellebrandt, Re-analysis of S-curves for damage to buildings due to vibrations, TNO rapport 2016 R10864, TNO, Delft, juni 2016
- [10.29] Deltares rapport 1209862-005-GEO-0004, Version 5, 16 March 2015, definitieve versie.
- [10.30] H.Y.Fang, Foundation Engineering handbook, second edition, 1991
- [10.31] SBR Trillingsrichtlijn A - Schade aan bouwwerken, SBRCURnet, Delft, 2017
- [11.1] B. Raaijmakers Modelling van Constructies bij een Dynamische Excitatie via de fundering, TNO Bouw rapport 93-CON-R1383, januari 1994
- [11.2] P.H. Waarts, Kans op schade aan bouwwerken door trillingen, TNO Rapport 97-CON-R1698, december 1997
- [11.3] Deltares rapport 1209862-005-GEO-0004, Versie 5, bijlage F, 16 March 2015
- [11.4] P. Korswagen Eguren – een nog op te publiceren paper over de parameter Ψ .
- [11.5] Nederlandse praktijkrichtlijn – NPR 9998, Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeren – Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: geïnduceerde aardbevingen, NEN, Delft, december 2015.
- [11.6] Giardina G., Marini A., Hendriks M.A.N., Rots J.G., Rizzardini F., Giuriani E., Experimental analysis of a masonry façade subject to tunnelling-induced settlement. *Engineering Structures* 45, pp. 421-434, 2012.
- [12.1] J.P. Pruiksmá, ‘Vervorming van de bovengrond door NEDMAG zoutwinning en schade aan bebouwing’, GeoDelft – rapport CO352471/07 Delft, juli 2001
- [12.2] J. Brinkman, Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing, Deltares Rapport 1221076-000, Delft 2016
- [12.3] Samenvattend Onderzoek Hoofdoorzaken Gebouwschade in het bodemdalingsgebied Nedmag, Arcadis Rapport 10 januari 2013.
- [12.4] Bodemdaling door aardgaswinning NAM-velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe - Status rapport 2015 en Prognose tot het jaar 2080, NAM, Assen, december 2015
- [12.5] S. de Lange, Partieel funderingsherstel van woningblokken - Het opstellen van een richtlijn voor partieel funderingsherstel, afstudeerscriptie, TU Delft, Delft, augustus 2011
- [12.6] J.B. Burland, B.B. Broms, V.F.B. de Mello, *Behaviour of foundations and structures*. Proc. of the IXth Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo. 1977.
- [12.7] Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, Criteria voor vaststellen van gebouwschade door bodemdaling, Notitie aan Nationaal Coordinator Groningen, 23 juni 2016.
- [12.8] M.D. Boscardin, E.J. Cording, ‘Building response to excavation-induced settlement’. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115 (1) 1-21, 1989

- [12.9] L. van Sambeek, An introduction to subsidence over salt en potash mining facilities, Solution Mining Research Institute, Fall 2000 Meeting, San Antonio, Texas, USA 15-18 October 2000
- [12.10] H. Kratzsch, Bergschadenkunde, Springer, Berlin, 1974
- [12.11] M. Son, E.J. Cording, Tunneling, building response and damage estimation. Tunnelling Underground Space Technology, 2001.
- [12.12] H.D. Netzel, *Building response due to ground movements*, Proefschrift TU Delft, Delft, 2009
- [12.13] G. Giardina 'Modelling of settlement induced building damage', Proefschrift TU Delft, Delft, 2013.
- [12.14] S. Jafari, J.G. Rots, R. Esposito, F. Messali, Characterizing the Material Properties of Dutch Unreinforced Masonry, Proc. International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures, Elsevier, 2017
- [12.15] M. Korff, M.P. Roggeveld (redactie), Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving, COB rapport F530-ER-12-49785, Gouda, z.j.
- [12.16] Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, Studieresultaten betreffende ongelijkmatige zakkings in verband met aardgaswinning in de provincie Groningen / deelstudie 1 – mogelijkheid van breukbeweging door gasproductie uit het Groningen Velden / deelstudie 2 – mogelijkheid van schade aan de bebouwing door wijzigingen in het peil van polder en boezemwater. Groningen, maart 1987.
- [12.17] J.L. Bijnagte, A.F. van Tol TU-Delft, R. Elprama, Het effect van grondwaterstijging op funderingen op staal Geotechniek, april 2006
- [12.18] ir. R. Elprama, Bodemdaling Groningen - Effecten peilverhoging op fundering op staal - Relatie afname draagvermogen en zakkingsfundering (projectfase 2), Gemeentewerken Rotterdam, Ingenieursbureau, Projectcode G4453 Rapportnummer 2000-0005/B, datum 14 oktober 2003, Opdrachtgever Commissie bodemdaling door aardgaswinning
- [12.19] ir. R. Elprama, Bodemdaling Groningen - Effecten peilverhoging op fundering op staal - Relatie afname draagvermogen en zakkingsfundering, Gemeentewerken Rotterdam, Ingenieursbureau, Projectcode G4453, Rapportnummer, 2000-005/B, Datum 7 januari 2004 Opdrachtgever Commissie bodemdaling door aardgaswinning
- [12.20] Effecten peilverhoging op fundering op staal Afname draagvermogen kleigrond (Groningen) Projectfase 1 - Gemeentewerken Rotterdam, Ingenieursbureau Rotterdam Marktgroep Haven & Transport - Productgroep Wegen en Ondergronds Bouwen Projectcode 2000-005/A, d.d. 19 januari 2000
- [12.21] J.L. Bijnagte Gebouwschade ten gevolge van peilverhoging - Geocheck rap. 2000-005/B GW Rotterdam + woning GeoDelft rapport nummer CO-414940-009 02 Januari 2005
- [12.22] Tcbb- Zettingschade bij grondwaterstijging, febr 2012.
- [12.23] COB F530, Aanbevelingen voor het ontwerpen van bouwkuipen in stedelijke omgeving, 2012
- [12.24] GeoDelft, Onderzoek effecten peilverlaging Oude Pekela, GeoDelft rapport 414942-0012, Delft, oktober 2007

- [12.25] Deltares, Toelaatbaarheid 50 mm relatieve peilverlaging, Deltares rapport 414942-0005, Delft, 2008
- [12.26] Barends, Dillingh, Hanssen, Van Onselen, Bodemdaling langs de Nederlandse kust, IOS-press, 2008
- [13.1] Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning, Studieresultaten betreffende ongelijkmatige zakkings in verband met aardgaswinning in de provincie Groningen / deelstudie 1 – mogelijkheid van breukbeweging door gasproductie uit het Groningen Velden / deelstudie 2 – mogelijkheid van schade aan de bebouwing door wijzigingen in het peil van polder en boezemwater. Groningen, maart 1987.
- [13.2] Commissie Bodemdaling, Studieresultaten betreffende ongelijkmatige zakkings in verband met aardgaswinning in de provincie Groningen. 1987: Groningen.
- [13.3] Korff, M., et al., Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen - Quick scan naar de sterkte van de infrastructuur. 2013, Deltares: Delft.
- [13.4] P. Hölscher, Literatuuronderzoek Verdichting, Deltares rapport 1220511-000, Delft 2016
- [13.5] D.A. de Lange, P. Hölscher. Fragility curves voor verdichting door trillingen, Deltares rapport 1220511-000, Delft 2016
- [13.6] Freeman, T.J., R.M.C. Driscoll, and G.S. Littlejohn, Has your house got cracks? 2002, London: Thomas Telford Publishing and BRE.
- [13.7] Scheltens, S.J.,H. Laagland, Schadeonderzoek buitengebied - beoordelingsmethodiek. 2016, Witteveen en Bos: Deventer
- [13.8] CROW, Richtlijn drempels, plateaus en uitritten. 2014: Ede.
- [13.9] TNO rapport R98-1403
- [13.10] M.D. Boscardin, E.J. Cording, 'Building response to excavation-induced settlement'. Journal of Geotechnical Engineering, 115 (1) 1-21, 1989
- [14.1] G. Giardina 'Modelling of settlement induced building damage', Proefschrift TU Delft, Delft, 2013.
- [14.2] I.A.E. de Vent, Structural damage in masonry - Developing diagnostic decision support, Proefschrift TU Delft, Delft, 2011