Staatstoezicht op de Mijnen
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Onderzoek naar het gebruik van de NPR 9998 en de HRA in de versterkingsopgave

Samenvatting

In de afgelopen jaren is in toenemende mate duidelijk geworden dat de toetsing aan de veiligheidsnorm conform het HRA-model leidt tot andere uitkomsten dan toetsing met de NPR 9998. Voor bewoners is dit verwarrend en verontrustend. Het ondermijnt het toch al broze vertrouwen in de aanpak van de versterking. Dit was eind 2018 voor het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) aanleiding om een onderzoek te starten naar de vergelijkbaarheid en vergelijking van de HRA enerzijds en de NPR 9998 anderzijds.

Het HRA-model en de NPR 9998:2018 zijn twee methodieken met verschillende doelen, aanpakken en die gebruik maken van verschillende aannames. In dit rapport vergelijkt SodM het HRA-model met de NPR 9998:2018 en beschrijft beide methoden. Het beantwoordt de volgende kernvragen: *in hoeverre kunnen beide methodes en de uitkomsten ervan met elkaar vergeleken worden*? *Voor zover een vergelijking mogelijk is, welke conclusies kunnen hieruit getrokken worden*? *Hoe toetsen ze aan de wettelijke veiligheidsnorm? Welke verbeteringen zijn er mogelijk in de methodieken en hun toepassing*?

Oorsprong en doel van de HRA en de NPR 9998

De HRA is een ontwikkeld uit de wettelijke plicht die NAM heeft om de veiligheidsrisico als gevolg van de gaswinning zo goed mogelijk te beheersen. Om de risico's te kunnen beheersen, is het noodzakelijk om deze risico's en de impact van maatregelen op de risico's te kunnen berekenen en binnen acceptabele grenzen te brengen. In januari 2014 brengt SodM een advies uit waarbij er wordt aangegeven dat een probabilistische dreiging (oftewel de *hazard*) en *risicoanalyse* de enige manier is om goed inzicht te krijgen in de seismische risico's van Groningen. In november 2015 komt de NAM met het zogenoemde Hazard and Risk Assessment model, ofwel de HRA-model. Met het HRA-model wordt uitgerekend hoe de kans op aardbevingen (en de sterkte daarvan) verandert als de gasproductie wordt aangepast. Met de kans op en sterkte van de aardbevingen kan de seismische dreiging, simpel gezegd de mate van grondbewegingen aan het oppervlak, worden uitgerekend. Het risico, uitgedrukt in de kans dat iemand komt te overlijden als gevolg van de gaswinning in Groningen, kan worden berekend door deze seismische dreiging te combineren met de kennis van de aanwezige gebouwen. De HRA geeft op basis van probabilistische berekeningen een *risico-inschatting* van alle gebouwen in het Groningenveld.

De NPR 9998 is ontwikkeld uit de behoefte om ontwerpen van zowel nieuw als bestaande gebouwen te beoordelen tegen de aardbevingsbelastingen die het gevolg zijn van geïnduceerde aardbevingen in het Groningenveld. Aangezien het feit dat er met geïnduceerde bevingen veel minder ervaring bestaat, alsmede het feit dat het grootste deel van de gebouwen in Groningen bestaat uit ongewapend metselwerk, heeft ertoe geleid dat deze richtlijn is opgesteld en in 2015 uitgebracht. De NPR 9998 is een bouwcode waarmee de *te verwachten prestatie* van één specifiek gebouw door een bepaalde grondbeweging veroorzaakt door een aardbeving uitgerekend kan worden. Het eindresultaat is gerelateerd aan de *structurele veiligheid* van dat gebouw en waarmee er bepaald kan worden of een gebouw versterkt moet worden of niet. De NPR 9998 wordt gebruikt voor de *veiligheidsevaluatie* van individuele gebouwen op basis van een maximale verwachte aardbeving met een terugkeerperiode van T = 2475 jaar.

Methodiek en detailniveau

De HRA geeft inzicht in de risico's voor een groot gebied, met meer dan 150.000 gebouwen, zonder de exacte eigenschappen van individuele gebouwen mee te nemen. De HRA is ontwikkeld om het risico voor het gehele gebied te bepalen. Het is niet bedoeld om het risico van één individueel gebouw te berekenen. De HRA is een keten van modellen ontwikkeld door de NAM die het veiligheidsrisico van alle gebouwen als gevolg van de gaswinning in Groningen ruwweg berekent. De HRA bestaat uit een serie van acht complexe, opeenvolgende modellen. De output van het ene model, is input voor het volgende model.

Deze trein van modellen is in staat om - weliswaar met grote onzekerheden – het risico te berekenen voor alle gebouwen in Groningen. Elk van deze modellen kent vele onzekerheden en

(model)keuzes en wordt zo goed mogelijk geijkt aan de beschikbare waarnemingen. Om te komen tot een zo goed mogelijke inschatting van de risico's bij het gebruik van een probabilistische aanpak, is het belangrijk dat *alle* onzekerheden met een realistische bandbreedte worden meegenomen. In de huidige modeltrein en bijbehorende berekeningen van NAM is dit echter niet het geval. In de modellen zitten nog veel bekende en onbekende onzekerheden die de uitkomst van de risicoberekeningen beïnvloeden. De HRA berekent elk jaar een nieuwe risico-inschatting gebaseerd op de gasproductie van dat jaar. Doordat zowel de gaswinning lager wordt en de modellen verbeterd worden, levert de HRA elk jaar een lagere risico-inschatting op. SodM ziet toe op de verbeteringen die de NAM doorvoert aan de modellenketen.

Op basis van de gemodelleerde seismische dreiging wordt het te verwachten veiligheidsrisico bepaald. Alle gebouwen boven en nabij het gasveld worden in kaart gebracht en worden geclassificeerd in de zogenoemde Exposure Database (EDB). Op basis van hun kenmerken worden de gebouwen onderverdeeld in verschillende gebouwtypen. Als het onbekend is tot precies welke typologie een gebouw behoort, of welke materiaaleigenschap een constructieonderdeel heeft, dan krijgt het een kans toebedeeld (bijvoorbeeld: 40% typologie A, 40% typologie B en 20% typologie C). De gegevens van deze gebouwen worden telkens bijgehouden en zo veel mogelijk verfijnd op grond van publiek beschikbare gegevens (die zijn opgeslagen in grote openbare databases), inspectie van tekeningen, observatie vanaf straatniveau en interne observatie (bij relatief klein aantal gebouwen). Echter sinds de inspecties niet meer worden uitgevoerd door de NAM (november 2015) worden de uitkomsten niet meer meegenomen in deze database. Er is dus een zekere mate van onzekerheid met betrekking tot de exacte eigenschappen van de meeste gebouwen. Op basis hiervan kan met de nodige onzekerheid de kwetsbaarheid van gebouwen bepaald worden, dat bepaalt hoeveel schade er op kan treden bij bepaalde grondbewegingen en in hoeverre een gebouw kan storten. De kans dat een persoon komt te overlijden wordt uitgerekend als een gevolg van de mate van grondbewegingen en de kwetsbaarheid van het gebouw.

SodM concludeerde al in een eerder advies dat voor *alle* deelmodellen van de HRA de meest recente en geactualiseerde versies in de HRA gebruikt kunnen en moeten worden om de onzekerheden te minimaliseren en om nieuwe informatie en inzichten over de sterkte van gebouwen mee te nemen in de classificatie van gebouwen. Anders dan de NPR 9998, kan de HRA niet gebruikt worden om de aardbevingsbestendigheid van een individueel gebouw te bepalen en te beoordeling of deze voldoende sterk is (of versterkt moet worden).

Voor de seismische beoordeling van een gebouw conform NPR 9998 wordt er gekeken naar zowel het instorten van het gehele gebouw als het bezwijken van belangrijke onderdelen van het gebouw: dit zijn de zogenaamde seismisch constructieve elementen en niet-constructieve elementen. Hiervoor moet een ingenieur (1) de bodemeigenschappen vaststellen; 2) de materiaaleigenschappen van de gebouw-elementen vaststellen; 3) de berekeningsmethode voor de representatie van de aardbevingsbelasting kiezen; 4) de berekeningsmethode voor de structurele analyse kiezen; 5) de maatgevende aardbevingsbelasting bepalen op de locatie van het gebouw; 6) het uitvoeren van de structurele analyse; en vervolgens 7) het toetsen aan de structurele criteria van de NPR 9998.

De genoemde gegevens (stap 1 t/m 5) worden samengebracht voor de berekening en bepaling van de sterkte-eigenschappen van een gebouw. De gegevens die van toepassing zijn op het gebouw worden als *input* gebruikt, waarmee vervolgens wiskundige formuleringen de nodige berekeningen uitvoeren in numerieke modellen. Op basis van de wiskundige vergelijking tussen de aardbevingsbelasting en de materiaalweerstand (van de constructieve elementen) van het gebouw, wordt de respons (*het gedrag*) van het gebouw berekend en uitgedrukt in termen van verplaatsing, inwendige spanningen in het materiaal, en eventuele schade aan de constructieve elementen.

Na de eerste jaren van berekeningen werden er discrepanties opgemerkt tussen de door het ingenieursbureau gemaakte aannames (stap 1 en 2) en besluiten voor het modelleren van de individuele gebouwen (stap 3 en 4). Als gevolg hiervan, maakte Centrum Veilig Wonen (CVW) de handleiding Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC)[1] voor uitvoerende ingenieursbureaus om ze te begeleiden tijdens het proces voor wat betreft het maken van uniforme seismische beoordelingen voor gebouwen en constructies in de regio Groningen, conform de NPR

[1] ABSC-NPR2018, Applicatiedocument beoordeling Seismische Capaciteit, CVW,doc.nr.: CVW-ABSC-NPR2018-UK, Version 1.0, November 29, 2018.

9998. Hiermee hoopte CVW dat een meer geharmoniseerde aanpak door verschillende partijen zou worden gebruikt.

Het ABSC document begeleidt ingenieurs bij het toepassen, interpreteren en verduidelijken van de NPR 9998 om redelijke beslissingen en aannames te maken in lijn met de denkwijze van de NPR 9998. Het ABSC biedt een beslissingskader over hoe technische aannames moeten worden gemaakt en geïmplementeerd wanneer de vereiste input, oftewel de invoergegevens onvoldoende, dubbelzinnig of niet beschikbaar is. De ABSC wordt sinds 1 januari 2019 gebruikt voor de versterkingsadviezen. Het ABSC is nu overgenomen door de Nationaal Coördinator Groningen (NCG). Het is de bedoeling dat de ABSC regelmatig bijgewerkt wordt en dat het document aangepast wordt op basis van de vereisten van de uitvoerende ingenieursbureaus en/of consultants die voor NCG werken. SodM heeft geen inzicht hoe de kwaliteit van dit document wordt geborgd.

Voor het bepalen van de maatgevende aardbevingsbelasting op de locatie van het gebouw (stap 5) wordt, in de huidige versterkingsadviezen van de NCG, gebruik gemaakt van de NEN-Webtool NPR 9998. Deze webtool is een hulpmiddel om inzicht te verkrijgen in de voorspelde aardbevings-bewegingen bij een gekozen herhalingstijd op een specifieke locatie in Groningen. De herhalingstijd is een omgekeerde maat voor de jaarlijkse kans op een extreme gebeurtenis. Hoe groter de herhalingstijd, hoe kleiner de jaarlijkse kans op de gebeurtenis. De huidige belastingen (en dus de maatgevende grondversnellingen) in de webtool komen vanuit zowel het NAM seismische model (HRA 2018) als het KNMI seismische model, en zijn geordend in drie tijdvakken (t1, t2 en t3). Deze tijdvakken met optredende belastingen zijn gekoppeld aan de afbouw van de gaswinning volgens het basispad voor het gemiddelde winterscenario zoals voorgeschreven in de Kamerbrief over gaswinning Groningen op d.d. 29 maart 2018[2]. Inmiddels is de afbouw van de gaswinning in Groningen versneld.[3] Daardoor sluiten de tijdvakken niet meer aan bij de verwachte seismische dreiging. Om te voorkomen dat onnodig zware versterkingsmaatregelen genomen worden, is het nodig om beoordelingen uit te voeren op basis van de afgenomen risico's. Het is daarom van belang dat de versterkingsadviezen uitgevoerd worden op een andere tijdvak dat beter aansluit met de verwachte seismische dreiging.

Het is voor SodM niet duidelijk geworden welke partij de structurele criteria in de NPR 9998 gekalibreerd heeft en op basis van welke beschikbare data, om een volledig oordeel te kunnen geven over de gebruikte kennis en inzichten. Door de kalibratie uit te voeren worden de nodige structurele criteria afgeleid om te kunnen voldoen aan de wettelijke veiligheidsnorm.

SodM merkt op dat er een meer consistente en adequate toepassing van de in de NPR 9998 genoemde berekeningsmethoden moet komen. Recente onderzoeken[4] hebben aangetoond dat het gebruik van verschillende berekeningsmethoden voor het uitvoeren van de structurele analyse, oftewel voor de bepaling van de seismische weerstand (zie stap 4 in paragraaf 3.1), met andere niveaus van detaillering tot significant verschillende resultaten kunnen leiden. De resultaten hiervan hebben invloed op de hoeveelheid en de mate van versterking.

Totstandkoming en doorontwikkeling

Ook de wijze van totstandkoming en doorontwikkeling van de HRA en de NPR 9998 verschillen van elkaar. De HRA is zoveel mogelijk gebaseerd op wetenschappelijke inzichten. Elk jaar past de NAM nieuwe inzichten toe en maakt daarbij gebruik van reviews van internationale experts. Daardoor wordt relatief snel gebruikt gemaakt van nieuwe inzichten. De NPR 9998 kent een geheel andere manier van totstandkoming en doorontwikkeling. Aanpassing van de NPR 9998 begint met de opdracht aan de NEN door de verantwoordelijke minister. De NEN stelt de NPR 9998 vast, maar doet dat niet alleen. NEN nodigt alle belanghebbende partijen uit om in een werkgroep mee te werken aan het proces van ontwikkeling. Dit gebeurt niet periodiek noch op voorspelbare momenten.

[2] Kamerbrief DGETM-EI / 18057375 van 29 maart 2018

[3] https://www.sodm.nl/sectoren/gaswinning-groningen/documenten/brieven/2020/02/24/advies-uitgangspunten-operationele-strategieen-en-hra-voor-het-gasjaar-2020-2021.

[4] Messali, F., Longo, M. (2019). Calibration of a mechanism-based method against NLFEA for NLPO analyses of URM terraced house units. Delft University of Technology. Report number 01, Version 01, 06 December 2019.

Hoe toetsen ze aan de wettelijke veiligheidsnorm van < 10^{-5} ?

Naar aanleiding van de aardbevingen en gevolgen daarvan heeft de toenmalig minister van EZ in 2015 de Commissie Meijdam gevraagd te adviseren over een veiligheidsnorm voor het aardbevingsrisico. De commissie neemt als uitgangspunt dat het geaccepteerde veiligheidsrisico voor de inwoners van Groningen niet hoger mag zijn dan elders in Nederland. De Commissie heeft dit vertaald naar een veiligheidsnorm voor het individueel risico (IR) ten gevolge van de geïnduceerde aardbevingen van 10^{-5} per jaar voor nieuwbouw en bestaande bebouwing. De wiskundige notatie van 10^{-5} betekent voor elk individu een jaarlijkse kans op overlijden van 1 op de 100.000.

Zowel de HRA 2018 als NPR 9998:2018 toetsen aan de geldende veiligheidsnorm of het individueel risico (IR) kleiner is dan 10^{-5} per jaar, maar geen van beide berekent (of verifieert) deze rechtstreeks voor elk gebouw. Dit wordt hieronder kort beschreven.

De HRA 2018 hanteert een volledige probabilistische berekening, waarbij voor de toetsing aan de veiligheidsnorm wordt uitgegaan van 100% aanwezigheid in gebouwen. De HRA is met deze aanpak conservatief. In de HRA wordt één gebouwtypologie of meerdere toegekend aan elk adres in het Groningen veld en 5 km buffer, zonder inspecties uit te voeren voor elk gebouw en zonder 100% zeker te weten of de veronderstelde typologie overeenkomt met de realiteit. Hierdoor kan je niet verifiëren dat risico kleiner is dan 10^{-5} voor dat specifiek gebouw. De HRA staat toe om de berekende waarde direct te vergelijken met de veiligheidsnorm, echter is de berekende waarde voor een type gebouw op die locatie, maar niet noodzakelijkerwijze voor een specifiek gebouw, omdat zaken zoals verbouwingen of staat van onderhoud niet worden meegenomen.

Anderzijds beoordeelt NPR 9998:2018 met een semi-probabilistisch berekening of een specifiek gebouw (inclusief de staat van onderhoud en verbouwingen) veilig is bij een bepaalde aardbevingsbelasting. Ook in de NPR 9998:2018 is het uitgangspunt dat het maximaal aanvaardbaar Individueel Risico 10^{-5} per jaar is.

De aanpak komt in essentie neer op twee stappen. Ten eerste wordt de zogenaamde maatgevende aardbeving bepaald. Dit is de aardbeving waarvan de kans dat deze voorkomt vermenigvuldigt met de kans op instorten van een gebouw en het overlijden van persoon in dat gebouw samen 10^{-5} is. Ten tweede wordt voor ieder gebouw in het gebied, op basis van de grondversnelling op de locatie van dat gebouw ten gevolge van de maatgevende aardbeving, bepaald of het deze maatgevende aardbeving kan weerstaan of niet. In het laatste geval moet het versterkt worden.

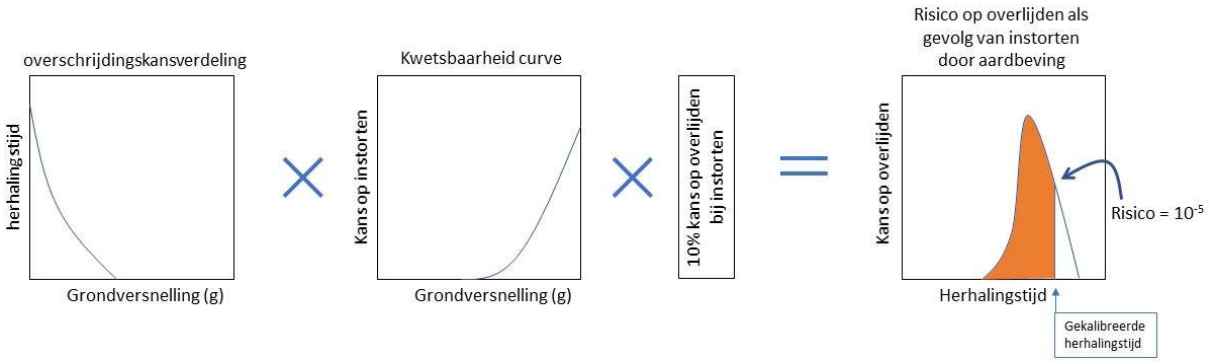
Voor de kalibratie in de NPR 9998 is er gebruikt gemaakt van de overschrijdingskansverdeling voor de maximale grondversnelling in het gebied. Deze curve beschrijft in feite de kans dat een bepaalde grondversnelling verwacht wordt. Deze kans wordt uitgedrukt in de duur van de periode waarin één keer een dergelijke grondversnelling verwacht wordt, de zogenoemde herhalingstijd. Voor lage grondversnellingen is de herhalingstijd relatief kort, omdat kleine aardbevingen vaker voorkomen dan zwaardere aardbevingen die een langere herhalingstijd hebben. De curve die hiervoor wordt gebruikt, is gebaseerd op een model dat de grondversnellingen uitrekent volgens de grondbewegingsvergelijking GMPE v2.[5] Dit model beschrijft de grondversnellingen voor iedere locatie in het gehele gebied. De overschrijdingskansverdeling die is gebruikt voor het bepalen van de maatgevende aardbeving correspondeert met de locatie van Loppersum en Delfzijl. Omdat de variaties in dreiging door het gebied relatief groot zijn is er wel wat af te dingen op deze aanpak. Het is SodM ook niet duidelijk hoe beide locaties, met een verschillend dreigingsniveau, gebruikt zijn om te komen tot het bepalen de overschrijdingskans per jaar (met een herhalingstijd van T = 2475 jr).

Om de kans op instorten van een gebouw te bepalen wordt er gebruik gemaakt van een kwetsbaarheidscurve. De kwetsbaarheidscurve beschrijft de kans op constructieve schade (DS: Damage State) afhankelijk van de maximale grondversnelling (SA: Spectral Acceleration). Bij bepalen van de maatgevende aardbeving is er gebruik gemaakt van één veronderstelde

[5] Bommer, J.J., B. Dost, B. Edwards, P.P. Kruiver, P. Meijers, M. Ntinalexis, B. Polidoro, A. Rodriguez-Marek & P.J. Stafford (2015). *Development of Version 2 GMPEs for Response Spectral Accelerations and Significant Durations from Induced Earthquakes in the Groningen Field*. A report prepared for NAM, Version 2, 29 October 2015, 515 pp.

kwetsbaarheidscurve.[6] Deze kwetsbaarheidscurve is niet gerelateerd aan één specifiek gebouw of typologie. Het is SodM niet duidelijk geworden wat de basis is geweest voor deze curve. Het gebruik in de NPR van deze werkwijze met één vorm van de kwetsbaarheidscurve voor alle gebouwen voor de bepaling van de maatgevende belasting is twijfelachtig. Verschillende gebouwen hebben een andere vorm van de kwetsbaarheidscurve en kunnen daarom leiden tot een andere maatgevende aardbeving bij kalibratie aan de veiligheidsnorm.

De overschrijdingskansverdeling voor de maximale grondversnelling is geïntegreerd met een gebouwen kwetsbaarheidscurve om het overlijdensrisico te berekenen. Hierbij is telkens met de herhalingstijd gevarieerd totdat dit resulteerde in een risico van 10^{-5} (Figuur 1). Op deze manier is de herhalingstijd bepaald (T = 2475 jaar) waarmee de maatgevende aardbeving wordt bepaald en die de basis is voor de beoordelingen van de gebouwen in Groningen.



Figuur 1. Schematische weergave van de kalibratie in de NPR 9998 om te komen tot de veiligheidsnorm van 10^{-5}

Hoe worden ze toegepast in de praktijk?

De HRA en NPR 9998 worden allebei toegepast voor de bepaling van de seismische risico en de versterkingsopgave in Groningen. De twee methoden worden ingezet om op verschillende schalen te reageren en met een ander detailniveau te kijken naar de versterkingsopgave (groep gebouwen versus individueel gebouw).

HRA

De HRA is gebruikt om een zo goed mogelijke inschatting van de veiligheidsrisico's van de gebouwen in Groningen. Bij het gebruik van een probabilistische aanpak, is het belangrijk dat alle onzekerheden met een realistische bandbreedte, oftewel de onzekerheidsmarge, worden meegenomen. In de huidige HRA modeltrein en bijbehorende berekeningen is dit echter niet het geval. Op dit moment worden nog niet alle bekende onzekerheden volledig en consistent meegenomen. Dit beïnvloedt de uitkomst van de risicoberekening. Deze onzekerheden kunnen leiden tot zowel een overschatting als een onderschatting van het berekende veiligheidsrisico. De uitkomst van de risicoanalyse is uitgedrukt in kansen dat een gebouw niet voldoet aan de verwachtingswaarde (de zogeheten Pmean[7]) en de P90. Deze waarden worden in het kader van de versterkingsoperatie omgezet in een verhoogd risicoprofiel (Pmean) of licht verhoogd risicoprofiel (P90).

Om consistentie met het Zeerijp-advies en de afbouwscenario's van de minister te borgen, heeft SodM geadviseerd voor dezelfde marge in de prioritering: om de P90 uit de HRA 2018 berekeningen van de NAM over te nemen. Uit de HRA 2018 kwamen 1.500 gebouwen met een verhoogd risico en 5.700 gebouwen met een licht verhoogd risico. Deze lijst is aangevuld met vergelijkbare panden zonder verhoogd risicoprofiel, huizen in stutten, huizen met veel schade en huizen van bewoners die om hulp hebben gevraagd bij de gemeente, de zogeheten schrijnende

[6] Steenbergen, R., Vrouwenvelder, A., Straalen, IJ. (2018). TNO Background Report NPR 9998:2018 Part A: Terminology and Safety.
[7] Pmean wordt ook wel Pverwachtingswaarde genoemd. In sommige gevallen wordt dit ook P50 genoemd. Dit laatste is statistisch niet correct, maar er wordt wel de zelfde groep mee bedoeld.

gevallen. Dit zijn in totaal ruim 26.000 gebouwen. Voor alle duidelijkheid: deze 26.000 adressen worden op sterkte beoordeeld op basis van gevalideerde beoordelingsmethodieken en worden versterkt als blijkt dat deze adressen versterkt moeten worden.

De NCG gebruikt het HRA-model voor de volgorde van de versterkingsopgave. Voor de veiligheid is het belangrijk dat eerst de gebouwen met een verhoogd risicoprofiel en vervolgens een licht verhoogd risicoprofiel worden opgenomen.

NPR 9998

De NPR 9998 richt zich specifiek op het ontwerpen en/of aanpassen van individuele gebouwen. Momenteel worden de bestaande gebouwen in Groningen gemodelleerd, en worden ze getoetst of ze aan de structurele criteria voldoen van de NPR 9998. Als ze niet hieraan voldoen, dan bepaalt het uitvoerende ingenieursbureau een passende versterkingsmaatregel zodat het gebouw wel aan de norm voldoet. Dit wordt vastgelegd in een versterkingsadvies (VA). Hiermee de verwachte seismische prestatie van een gebouw vastgesteld worden. SodM heeft 25 VA's geanalyseerd om te beoordelen hoe de NPR 9998 toegepast wordt om te komen tot versterkingsmaatregelen.

De NPR 9998 is een richtlijn die als leidraad moet worden gebruikt, maar het ligt aan de ingenieur om een beoordeling te maken *als* er wordt versterkt, *hoe* er wordt versterkt en *in welke mate* er wordt versterkt. In het geval waar de expertise en de technische beoordeling van de ingenieur in strijd is met de uitkomsten van de structurele criteria zoals vermeld in de bouwnorm NPR 9998, dan kan de ingenieur afwijken van de richtlijn. Dit moet onderbouwd zijn met numerieke modellen en de technische beoordeling moet gerapporteerd worden. SodM merkt op dat het van belang is dat alle versterkingsadviezen (inclusief de adviezen met afwijkende ontwerpkeuze van de NPR 9998) beoordeeld worden door een derde (controlerende) partij.

SodM merkt ook op dat ingenieurs vaak een conservatieve benadering hanteren om tot een acceptabele snelheid van de beoordeling te kunnen komen over de aardbevingsbestendigheid van individuele gebouwen. Dit vindt vooral plaats bij het maken van aannames tijdens opnames (vaststellen aan schade aan gebouwelementen, materiaaleigenschappen, kwaliteit van de gebouwelementen of verbinding).

SodM merkt voorts op dat sommige eigenschappen van het gebouw niet gemodelleerd kunnen worden door technische tekortkoming van het programma of als gevolg van vereenvoudiging van het model. Hierdoor worden benaderingen aangenomen die vraagtekens oproepen. Voorbeelden hiervan zijn in het geval van vervormingen van houtenbalken, hoe er om wordt gegaan met verbouwingen, invloed van verschillende bouwfasen van een woning, en het effect van omliggende gebouwen die samen één seismische eenheid kunnen vormen (interactie tijdens seismische gebeurtenis).

Bij de meerderheid van de VA's mist er een kritische terugblik op het gemodelleerde gebouw door de verantwoordelijke ingenieur. Het is opvallend dat in de door SodM onderzochte VA's de uiteindelijke seismische versterkingsmaatregelen gebaseerd zijn op een versterking van alle bezwijkende (constructieve en niet-constructieve) elementen. Dit is een conservatieve aanpak omdat waarschijnlijk bij het versterken van een deel van de bezwijkende elementen de andere elementen ook niet meer zouden bezwijken. Dit zou bepaald kunnen worden door incrementeel elementen te versterken. In vrijwel alle geanalyseerde VA's wordt deze incrementele benadering niet gehanteerd voordat daadwerkelijk alle bezwijkende elementen worden versterkt.

Prioritering voor de uitvoering

Op basis van de uitgewerkte VA's is het (nog) niet mogelijk om een oordeel te geven over de prioritering tijdens de uitvoering van de versterkingsopgave. Met de VA's kan er nog geen graad van urgentie worden aangegeven, er kan alleen getoetst worden of een gebouw wel of niet versterkt moet worden. In andere landen, zoals Italië, wordt een *risicoklasse* toegeschreven aan gebouwen op basis van het jaarlijkse economische verlies als gevolg van schade aan gebouwen, en er wordt een *veiligheidsindex* berekend voor gebouwen die uitdrukt wat de verhouding is tussen de gebouwcapaciteit in termen van PGA en de optredende PGA voor de locatie van dat gebouw zoals gespecificeerd in de nationale norm. SodM merkt op dat een veiligheidsindex een bijdrage zou kunnen leveren aan de prioriteringsmechanisme voor de uitvoering van de versterkingsoperatie. Dit is een element dat gekoppeld zou kunnen worden van het versterkingsadvies. SodM raadt aan

dat er gekeken wordt hoe dit concept vertaald kan worden en waarde kan bieden voor de uitvoering van de versterkingsoperatie in Groningen.

Advies over de verbetering van (het gebruik van) de HRA:2018 en de NPR 9998:2018

Op basis van de resultaten uit dit rapport geeft SodM de volgende adviezen:

i. Geef het verbeteren van de NPR 9998 de hoogste prioriteit. Daarmee is een grotere verbetering te bewerkstelligen dan met verbetering van de HRA. De HRA is al verder ontwikkeld dan de NPR 9998 ten aanzien van de toegepaste technische kennis. Bovendien is de toepassing van de HRA, als methode voor de bepaling van de grootte en prioritering van de versterkingsopgave, niet meer nodig. Immers, de versterking is reeds vastgezet op 26.000 huizen waarvoor de prioritering reeds is bepaald en waarmee de orde-grootte voor de versterkingsoperatie is bepaald. Een verbetering aan de HRA-model zal hieraan naar verwachting geen verandering in brengen.

ii. Zorg dat de nieuwste wetenschappelijke inzichten in de NPR 9998 en de Webtool NPR 9998 verwerkt worden. Een nieuwe versie waarin tekortkomingen die leiden tot onnodig conservatisme worden verbeterd, leidt tot een snellere uitvoering van de versterkingsopgave. Er wordt dan immers geen tijd en capaciteit besteed aan versterkingsmaatregelen die voor de veiligheid niet nodig zijn. De verbetering voor de uit-het-vlak sterkte-eigenschappen van metselwerk die in juli 2020 wordt toegevoegd aan de NPR 9998 is daar een goed voorbeeld van.

iii. Kalibreer de NPR 9998 opnieuw met behulp van de laatste wetenschappelijke inzichten aan de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5}. Onderzoek daarbij of de huidige methode om de NPR 9998 te kalibreren aan de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5} het beste manier is om te toetsen of gebouwen daadwerkelijk aan de veiligheidsnorm voldoen. Onderzoek ook of met de huidige stand van kennis deze kalibratiemethode passend is bij een afnemende seismische dreiging en voor de verschillende gebouwen(-typologien) in Groningen.

iv. Voor het berekenen van de constructieve veiligheid van gebouwen conform de NPR 9998 zijn de uitvoerende ingenieursbureaus afhankelijk van de beschikbare data uit de opnames van de individuele gebouwen. Om conservatieve aannames te minimaliseren is het belangrijk dat de opnames volledig zijn uitgewerkt. Hiervoor is het van belang dat de verantwoordelijke bouwkundige inspecteurs zodanig zijn opgeleid en de juiste ervaring hebben om een de juiste aannames te kunnen maken.

v. Bij het opstellen van de rekenmodellen in de VA's verwijzen uitvoerende ingenieursbureaus naar het Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC) voor het omgaan van onzekerheden bij het ontbreken van kennis of gegevens om zo tot acceptabele aannames te komen. Dit document wordt vrijwel door alle bureaus gebruikt bij de invoering van materiaaleigenschappen. Dit huidige document is zodanig opgesteld dat dit gelezen en toegepast wordt conform de NPR 9998:2018. SodM adviseert dat het ABSC document herzien wordt door een panel van experts, en dat dit document wordt bijgehouden met de laatste stand van kennis, en dat wijzigingen worden aangebracht zodra er een nieuwe versie van NPR 9998 beschikbaar is.

vi. Ontwikkel een gedragen proces waarmee de NPR 9998 en de Webtool NPR 9998 voldoende snel en op een navolgbare manier verbeterd kunnen worden. Periodieke verbeteringen van de NPR 9998 zorgt ervoor dat de meest recente inzichten zorgvuldig worden meegenomen door de ingenieursbureaus in het versterkingsproces.

vii. SodM merkt op dat hoewel de HRA geschikt is voor de prioritering van de opnames, deze niet leidend moet zijn voor de uitvoering van de VA's. De NPR 9998 levert een betere bijdrage aan een verstandige prioritering, waarmee de snelste veiligheid wordt bereikt, mits alle hierboven genoemde verbeteringen zijn doorgevoerd. SodM adviseert om de huidige informatie te beoordelen en om na te gaan of de ontwikkeling van bijvoorbeeld een veiligheidsindex ook een bijdrage kan leveren aan een verstandige prioritering van de uitvoering van de versterking in Groningen.

viii. De HRA is niet meer nodig voor het bepalen van de omvang en de prioritering van de versterkingsopgave. Echter, het is en blijft belangrijk om de HRA de komende periode te blijven herzien. Deze berekeningen blijven belangrijk om de ontwikkelingen in de

seismiciteit te kunnen duiden. Ook kan hiermee de verwachting getoetst worden dat de HRA tot geen veranderingen in de scope van de versterkingsopgave gaat leiden. Momenteel draagt NAM hier de verantwoordelijkheid voor en ziet SodM toe op de kwaliteit. Als in de toekomst de HRA in publieke handen genomen wordt door de minister, is het belangrijk dat de taken van de verschillende betrokken partijen duidelijk in de wet worden vastgelegd.

Samenvatting 1

Oorsprong en doel van de HRA en de NPR 9998 1

Methodiek en detailniveau 1

Totstandkoming en doorontwikkeling 3

Hoe toetsen ze aan de wettelijke veiligheidsnorm van < 10^{-5} ? 4

Hoe worden ze toegepast in de praktijk? 5
HRA 5
NPR 9998 6

Prioritering voor de uitvoering 6

Advies over de verbetering van (het gebruik van) de HRA:2018 en de NPR 9998:2018 7

1. Inleiding 11

Wat leest u in dit onderzoeksrapport? 13

2. Aanpak en methode van het SodM-onderzoek 14

3 Methodiek achter de NPR 9998:2018 en de HRA 2018 15

3.1 NPR 9998 Nederlandse Praktijkrichtlijn voor aardbevingsbestendig bouwen 15
Naar welke delen van het gebouw wordt gekeken? 15
Op welke manier toetst de NPR aan de wettelijke veiligheidsnorm? 16
Hoe werkt een NPR-toetsing? 17

3.2 Aandachtspunten van de NPR 9998 20

3.3 HRA : Hazard & Risk Assessment 21
Probabilistische risicobeoordeling en de Exposure Database 23

3.4 Aandachtspunten van de HRA 24

3.5 Totstandkoming en doorontwikkeling van NPR 9998:2018 en de HRA 2018 25

3.5 Conclusie 25

4 Veiligheidsnorm en toetsingsmethode 27

4.1 Welke definities van risico worden gehanteerd in het aardbevingsgebied? 27

4.2 Wettelijk veiligheidsnorm 27

4.3 Veiligheidsnorm in de HRA 28

4.4 Veiligheidsnorm in de NPR 9998 28

4.5 Conclusie 30

5 Toepassing van HRA 2018 en NPR 9998:2018 32

5.1 HRA 32
Niveau van gaswinning: 12 miljard Nm^3 per jaar 32
Prioritering 32
Aandachtspunten bij de toepassing van HRA 2018 33

5.2 NPR 9998:2018 34
Opname van gebouwen 34
Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC) 35
Structurele verificatie 35
Versterkingsadviezen 36
Aandachtspunten bij de toepassing van NPR 9998 37

5.4 Conclusie *37*

6. Conclusie en aanbevelingen **39**

6.1 Conclusie SodM over vergelijking HRA 2018 en NPR 9998:2018 ..... *39*

6.2 Advies over de verbetering van (het gebruik van) de HRA:2018 en de NPR 9998:2018 ..... *40*

Afkortingenlijst **42**

Bijlage A: Ontstaan van aardbevingen door gaswinning en het effect op gebouwen **44**

Bijlage B: NPR 9998 - Nederlandse Praktijkrichtlijn voor aardbevingsbestendig bouwen **45**

Bijlage C: HRA- model **46**

Bijlage D: Inventarisatie van de gebruikte versterkingsadviezen **48**

1. Inleiding

In 1959 werd het Groningen-gasveld ontdekt en in 1963 verleende de Staat der Nederlanden een eeuwigdurende concessie aan de Nederlandse Aardoliemaatschappij (NAM). Gaswinning zorgt voor aardbevingen in het noordelijk deel van Nederland. De eerste aardbeving vond plaats bij Assen op 26 december 1986, en in december 1991 werd de eerste beving in Groningen geregistreerd door het KNMI. Deze beving vond plaats nabij Middelstum en had een kracht van 2,4 op de schaal van Richter.

In toenemende mate hebben de aardbevingen in Groningen schade veroorzaakt aan gebouwen. Na verloop van tijd werd duidelijk dat ook beduidend sterkere aardbevingen (magnitude M_L groter dan 3.9) niet uitgesloten konden worden.[8] [9] Hiermee werd ook duidelijk dat er een veiligheidsrisico verbonden was aan deze aardbevingen. Op 22 januari 2013 adviseerde het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) aan de minister van Economische Zaken en Klimaat (hierna: de minister) om de gaswinning zo veel als mogelijk en zo snel als mogelijk terug te brengen[10].

Op 22 januari 2014 deelde de minister de Tweede Kamer mee dat het kabinet onder meer had besloten tot gerichte vermindering van de gaswinning ten behoeve van de veiligheid en grootschalige preventieve versterking van woningen, gebouwen en infrastructuur.[11] [12] In de jaren daaropvolgend werd de gaswinning stapsgewijs steeds verder afgebouwd. Op 1 februari 2018 adviseerde SodM opnieuw om de gaswinning zo snel mogelijk onder de 12 miljard Nm^3 per jaar af te bouwen[13]. Hierbij overwoog de SodM dat onder dit niveau van gaswinning én het versterken van de gebouwen die dat nodig hebben, naar verwachting voor enige tijd aan de veiligheidsnorm voldaan zou worden. De minister heeft op 12 september 2019 besloten de gaswinning in het gasjaar 2019-2020 af te bouwen naar 11,8 miljard Nm^3 per jaar.[14] Daarmee komt de gaswinning onder het door SodM geadviseerde niveau van 12 miljard Nm3.[15] De minister maakte eveneens bekend de gaswinning in het Groningen veld in 2022 af te willen bouwen naar nul.

De NAM heeft de wettelijke plicht de veiligheidsrisico's als gevolg van de gaswinning zo goed mogelijk te beheersen. SodM houdt toezicht op deze verplichting. Om de risico's te kunnen beheersen, is het noodzakelijk om deze risico's en de impact van maatregelen op de risico's te kunnen berekenen en binnen acceptabele grenzen te brengen.[16] In 2013 ontwikkelt de NAM een probabilistische dreigingsanalyse, naar aanleiding van het advies[17] van SodM en de vragen van de minister van EZK omtrent de Mmax. SodM brengt een advies uit in januari 2014 waarbij er wordt aangegeven dat een probabilistische dreiging (oftewel de *hazard*) en risico analyse de enige manier is om goed inzicht te krijgen in de seismische risico's van Groningen. Vervolgens is de NAM de dreigingsanalyse gaan uitbreiden met de risico analyse en in november 2015 publiceren ze de eerste kwantitatieve[18] zogenoemde Hazard and Risk Assessment model, ofwel de HRA-model. Met het HRA-model wordt uitgerekend hoe de kans op aardbevingen (en de sterkte daarvan) verandert als de gasproductie wordt aangepast. Bijvoorbeeld door de gasproductie te verminderen of door de verdeling van de gasproductie over de diverse gasputten in het Groningen-gasveld aan te passen. Met de kans op en sterkte van de aardbevingen kan de seismische dreiging, simpel gezegd de mate van grondbewegingen aan het oppervlak, worden uitgerekend. Het risico, zoals de kans dat iemand komt te overlijden als gevolg van de gaswinning in Groningen, kan worden

[8] Muntendam-Bos, A.G. and J.A. de Waal, 2013. Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field. SodM technical report. State Supervision of Mines (The Hague).
[9] B. Dost and D. Kraaijpoel, *The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen)*, KNMI, januari 2013.
[10] SodM, Aardbevingen in de provincie Groningen, kenmerk: 13010015, 22 januari 2013.
[11] Kamerstukken II 2013/2014: 33529 nr. 1.
[12] Kamerstukken II: 2013/2014: 33529 nr. 28.
[13] https://www.sodm.nl/documenten/publicaties/2018/02/01/advies-groningen-gasveld-n.a.v.-aardbeving-zeerijp-van-8-januari-2018
[14] Nm^3 betekent: Normaal kubieke meter. Bij getallen van hoeveelheden gas hoort aangegeven te worden bij welke druk en temperatuur de hoeveelheid is gemeten. Bij een "normaal" kubieke meter gas hoort een druk van 101,325 kiloPascal (1 atmosfeer) en een temperatuur van 0 graden Celsius.
[15] Brief met kenmerk: DGKE-PGG/ 19190924.
[16] Artikel 52d, tweede lid, onderdeel a, van de Mijnbouwwet.
[17] https://www.sodm.nl/documenten/rapporten/2013/01/25/sodm-advies-om-de-gasproductie-in-groningen-zo-snel-mogelijk-te-verlagen-2013
[18] In mei 2015 was er al een kwalitatieve HRA-model van de NAM ontwikkeld.

berekend door deze seismische dreiging te combineren met de kennis van de aanwezige gebouwen.

Ieder jaar is deze analysemethode verbeterd door gebruik te maken van de beschikbare wetenschappelijke inzichten en technieken. De eerste volledige[19] HRA is in november 2015 ingediend bij SodM en bij het ministerie van Economische Zaken. SodM houdt toezicht op deze ontwikkeling en heeft de afgelopen jaren verschillende verbetermogelijkheden aan NAM meegegeven. Deze zijn steeds doorgevoerd door NAM. Ondanks de continue doorontwikkeling zijn de onzekerheden in de modellen groot en bevat het HRA-model onvolledige informatie omtrent individuele gebouwen in het gebied.

SodM is van oordeel dat de HRA de laatste wetenschappelijke inzichten goed heeft gevolgd, geïdentificeerde verbetermogelijkheden worden voorbereid en opgenomen in volgende versies. Ook onderschrijft SodM dat het de juiste methodiek is om de risico's als gevolg van de gaswinning uit het Groningen-gasveld te berekenen. Wel heeft SodM er op gewezen[20] dat, vanwege het feit dat niet alle onzekerheden bekend zijn of worden meegenomen, het nodig is om een veiligheidsmarge te gebruiken bij het bepalen van maatregelen. Dit advies is overgenomen door de minister. Met deze veiligheidsmarge gebruikt SodM daarom, ondanks de genoemde significante beperkingen, de uitkomsten van de HRA voor haar advisering aan de minister.[21] Het gaat dan om de adviezen van SodM met betrekking tot zowel het productieniveau van gaswinning uit het Groningen-gasveld als over de inschatting van de omvang van de versterkingsopgave en de wijze waarop deze opgave geprioriteerd kan worden.

Met behulp van de uitkomsten van het HRA-model gecombineerd met logica regels is een keuze gemaakt voor de omvang van de versterkingsopgave. De verwachting was dat alle te versterken gebouwen in deze groep zouden zitten, maar dat er ook gebouwen in zouden zitten die geen versterking nodig hebben. Daarom moet bepaald worden of een specifiek gebouw daadwerkelijk versterkt moet worden. Elk gebouw uit de versterkingsopgave wordt geïnspecteerd ('opgenomen') en daarna beoordeeld door middel van modelberekeningen. In deze beoordeling wordt bepaald of een gebouw stevig genoeg is om de aardbevingsbelasting te weerstaan. Is het gebouw niet stevig genoeg, dan worden versterkingsmaatregelen bepaald.

Voor deze berekeningen is op verzoek van de minister in 2015 een richtlijn, de zogenaamde NPR 9998:2015 opgesteld voor zowel nieuwbouw, verbouw als bestaande bouw. Door het toepassen van deze richtlijn moeten gevaarlijke situaties (instortingen) worden voorkomen. De NPR 9998 is opgesteld onder toezicht van de NEN-normcommissie 'Technische Grondslagen voor Bouwconstructies' [22]. Op grond van deze richtlijn kunnen constructeurs berekenen hoe sterk een gebouw moet zijn om te voldoen aan de Nederlandse veiligheidsnorm. De NPR-methodiek is sinds 2015 in ontwikkeling. De steeds betere inzichten in de constructieve eigenschappen van gebouwen in de regio, alsook de voortschrijdende inzichten omtrent de dreiging in termen van grondversnellingen als gevolg van de aardbevingen, hebben in de afgelopen jaren tot opeenvolgende versies van de NPR-methodiek geleid. De meest actuele versie bij het schrijven van dit advies is de NPR 9998:2018.

In de afgelopen jaren is in toenemende mate duidelijk geworden dat de toetsing aan de veiligheidsnorm conform het HRA-model leidt tot andere uitkomsten dan toetsing met de NPR 9998. Voor bewoners is dit verwarrend en verontrustend. Het ondermijnt het toch al broze vertrouwen in de aanpak van de versterkingsoperatie. Dit was eind 2018 voor SodM aanleiding om een onderzoek te starten naar de vergelijkbaarheid en vergelijking van de HRA enerzijds en de NPR 9998 anderzijds. De aanbesteding en start van dit onderzoek werd vertraagd door de onderzoeken naar de KNMI-metingen, toen begin 2019 een aantal problemen met de metingen en het gebruik daarvan naar voren kwamen. Het onderzoek naar de vergelijking van de HRA en NPR is uiteindelijk in de tweede helft van 2019 gestart en inmiddels afgerond.

---

[19] Volledig in de zin dat alle elementen van de risicoberekening zijn opgenomen in de modellen, dat zo goed als mogelijk de onzekerheden meegenomen worden in de berekening en dat zo veel als mogelijk de deelmodellen getoetst zijn aan de beschikbare metingen.
[20] Brief met kenmerk: 18018656, datum 1 februari 2018.
[21] SodM volgt hierbij de uitspraak van de Raad van State van november 2017. (https://www.raadvanstate.nl/@109356/201608211-1-a1/.) https://www.sodm.nl/documenten/vragen-en-antwoorden/waarom-gebruikt-sodm-het-hra-model-terwijl-er-nog-onzekerheden-in-het-model-zitten
[22] De NPR 9998:2015 is gepubliceerd op 18 december 2015.

Ook het Adviescollege Veiligheid Groningen (hierna: ACVG) heeft zich gebogen over de vraag waarom het HRA-model leidt tot deels andere resultaten dan de NPR. Dat 'ACVG advies over HRA en NPR' [23] en het voorliggende onderzoek van SodM vullen elkaar aan.

Wat leest u in dit onderzoeksrapport?

In dit rapport vergelijkt SodM het HRA-model met de NPR 9998:2018 en beschrijft beide methoden. Het beantwoordt de volgende kernvragen: in hoeverre kunnen beide methodes en de uitkomsten ervan met elkaar vergeleken worden? Voor zover een vergelijking mogelijk is, welke conclusies kunnen hieruit getrokken worden? Welke verbeteringen zijn er mogelijk in de methodieken en hun toepassing?

In hoofdstuk 2 worden de onderzoeksopzet van SodM en de gemaakte analyses kort beschreven. Om de kernvragen te kunnen beantwoorden, beschrijft SodM in dit rapport eerst het doel waarvoor beide methodieken zijn ontwikkeld en vervolgens hoe beide methodieken functioneren (hoofdstuk 3). Op grond van deze analyse worden conclusies getrokken omtrent de vergelijkbaarheid van beide methodes. Ook worden suggesties voor verdere verbeteringen gedaan. Omdat beide methoden de door de wetgever vastgestelde veiligheidsnorm als ijkpunt nemen, analyseert SodM in dit rapport vervolgens hoe en in welke mate beide methodieken dit consistent doen (hoofdstuk 4). Deze analyse leidt tot conclusies en aanbevelingen voor verbetering. Daarna analyseert dit rapport ook hoe beide methodes in de praktijk worden toegepast en of deze toepassing consistent is met de opzet van beide methodieken (hoofdstuk 5). Ten slotte worden de conclusies en antwoorden op de kernvragen in hoofdstuk 6 samengebracht en aanbevelingen gedaan aan de verantwoordelijke ministers van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK). Met dit onderzoeksrapport hoopt SodM bovendien meer helderheid over de HRA en de NPR 9998 te verschaffen aan een ieder die betrokken is bij de aardbevingsproblematiek in Groningen.

[23] Brief met kenmerk: ACVG/202004-01. Verschillen tussen de NPR:9998 en de HRA- oorzaken en aanbevelingen, publicatiedatum 26 mei 2020, zie https://www.adviescollegeveiligheidgroningen.nl/adviezen.

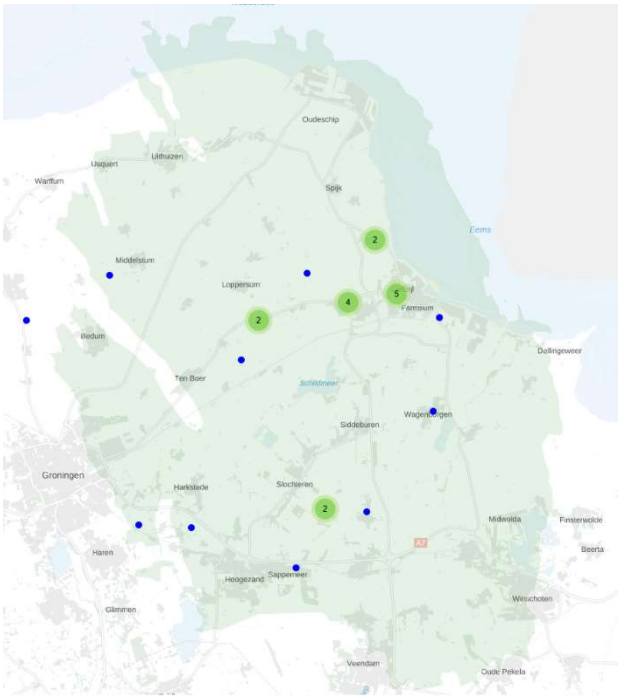
2. Aanpak en methode van het SodM-onderzoek

SodM houdt onder andere toezicht of de NAM haar verantwoordelijkheid neemt om de risico's ten gevolge van de gaswinning in Groningen grondig te analyseren. Alleen zo kan de NAM de risico's adequaat identificeren en vervolgens beheersen. SodM houdt toezicht op de ontwikkeling van deze risicoanalyse, de genoemde Hazard & Risk berekeningsmethodiek, kortgezegd HRA. Dit rapport steunt daarom in belangrijke mate op de eerder door SodM opgedane kennis en uitgevoerde analyses.

Eind 2018 is SodM gestart met de analyse van de NPR 9998 voor dit rapport. Specifiek voor dit onderzoek heeft SodM documentatie bestudeerd en gesprekken gevoerd met verschillende kennispartijen, waaronder het Adviescollege Veiligheid Groningen (ACVG), de Nationaal Coördinator Groningen (NCG), TNO en TU Delft.

SodM heeft ook de resultaten van de beoordeling van 25 gebouwen op basis van de NPR 9998 geanalyseerd. Daartoe heeft SodM uit de volledige lijst van te versterken gebouwen van de NCG meer dan 3.000 adressen verkregen waarvan beoordelingen ('versterkingsadviezen': VA's) zijn gemaakt conform de NPR 9998:2018. SodM heeft deze lijst opgevraagd in het kader van haar wettelijke taak om toezicht te houden op de versterking uit oogpunt van veiligheid en haar taak als adviseur van de minister. SodM heeft deze lijst bestudeerd en 25 gebouwen geselecteerd om de bijbehorende VA's voor dit rapport verder te onderzoeken (zie Bijlage D). Deze selectie is gemaakt op basis van de volgende drie criteria:

i. Locatie binnen het Groningen-gasveld, met het doel om gebouwen te analyseren die verspreid staan over het hele veld (Figuur 2 geeft de ligging van de onderzochte gebouwen);
ii. Gebruikte berekeningsmethode, met het doel om de meest gebruikte berekeningsmethode die aan bod komen (en hun toepassing) in de VA's te bestuderen;
iii. De verschillende ingenieursbureaus die de berekeningen hebben gemaakt, met het doel om ten minste één VA te bestuderen die gemaakt is door elke ingenieursbureau om inzicht te krijgen in hun werkwijze.



Figuur 2 – Locaties van de 25 gebouwen en bijbehoren VA's die SodM heeft bestudeerd voor dit onderzoek (blauwe en groene stippen)

3 Methodiek achter de NPR 9998:2018 en de HRA 2018

De HRA en de NPR 9998 zijn verschillende beoordelingsmethodieken afkomstig van verschillende partijen (resp. NAM en NEN). Zowel de HRA als de NPR 9998 bekijken de veiligheid van constructies bij aardbevingsbelastingen. Beide methodieken hebben echter hun eigen doelen en gebruiken daarom verschillende methoden en aannames. In dit hoofdstuk worden beide methodes besproken. Daarbij wordt gekeken waarvoor beide methodes ontwikkeld zijn.

3.1 NPR 9998 Nederlandse Praktijkrichtlijn voor aardbevingsbestendig bouwen

De NPR 9998 is de Nederlandse praktijkrichtlijn voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en bestaande bouw bij (geïnduceerde) aardbevingsbelastingen. Zie Bijlage B voor een overzicht van de NPR 9998.

Deze Nederlandse praktijkrichtlijn (NPR 9998) geeft richtlijnen om te beoordelen of:

i. Nieuw te bouwen gebouwen voldoende aardbevingsbestendig zijn,
ii. Bestaande gebouwen voldoende aardbevingsbestendig zijn, en
iii. Bestaande gebouwen na versterking voldoende aardbevingsbestendig zijn

Naar welke delen van het gebouw wordt gekeken?

Voor de beoordeling hiervan wordt er gekeken naar zowel het instorten van het gehele gebouw als het bezwijken van belangrijke onderdelen van het gebouw: dit zijn de zogenaamde constructieve elementen en niet-constructieve elementen (zie het blauwe tekstvak voor een omschrijving van de verschillende gebouwelementen).

Definitie van de gebouwelementen volgens de NPR 9998:2018

Primair seismisch element

Dit is een constructief element dat beschouwd wordt als onderdeel van het constructieve systeem om de aardbevingsbelasting te weerstaan. Primaire seismische elementen zijn in het constructieve model de primaire bijdragers ten aanzien van menselijke veiligheid tijdens aardbevingsbelastingen. De volgende constructieve elementen worden beschouwd als primaire seismische onderdelen:

1. *Vloeren, daken en elementen die zowel zijdelingse als verticale ondersteuning bieden;*
2. *Scheidingswanden die verticale en / of laterale sterkte en stijfheid bieden;*
3. *Gebouwonderdelen die weerstand bieden aan vloeren en de bijbehorende verticale componenten (kernen, stabiliteitsverbanden, ankers, etc.);*
4. *Alle verbindingen die cruciaal zijn om het gebouw bij elkaar te houden en waarvan hun bezwijken zou leiden tot disproportionele instorting;*
5. *Funderingen.*

Secundair seismisch element

Dit is een constructief element dat de verticale belastingen afkomstig van zijn eigen gewicht en aangrenzende elementen afdraagt naar de fundering en geen bijdrage levert aan het opnemen van de horizontale aardbevingsbelasting, maar waarvan bezwijken wel leidt tot voortschrijdende instorting. Bijvoorbeeld, tussenliggende kolommen.

Niet-seismisch constructief element

Constructief element dat niet bedoeld is de aardbevingsbelasting anders dan het gevolg van zijn eigen gewicht gecombineerd met de relevante quasi-blijvende belasting af te dragen naar de fundering, waarbij bezwijken van het constructieve element niet leidt tot voortschrijdende instorting. Voorbeelden zijn schoorstenen, topgevels, niet-dragende scheidingswanden, niet-verticaal kracht afdragende spouwbladen, buitenspouwbladen, balkons, galerijen, balustrades, borstweringen, decoratieve constructieve elementen, pinakels, ramen (glas).

Niet-constructieve elementen

Niet-constructieve elementen bieden geen constructieve weerstand tegen voortschrijdende instorting van de constructie, ze maken geen deel uit van het constructief systeem. Voorbeelden zijn verlaagde plafonds, leidingen, kasten, opslagrekken, apparatuur, liftcabines, enz. Niet-constructieve elementen maken geen deel uit van paragraaf 2.1 van Bouwbesluit 2012.

Op welke manier toetst de NPR aan de wettelijke veiligheidsnorm?

De NPR 9998 wordt op grond van Artikel 3 van het Besluit versterken gebouwen Groningen gebruikt om te beoordelen of een gebouw aan de wettelijke veiligheidsnorm[24] voldoet. De veiligheidsnorm is een maximaal risico op het overlijden van een individu door het bezwijken van een gebouw, als gevolg van bodembeweging veroorzaakt door de winning van gas uit het Groningenveld, van 1 op de 100.000 per jaar.[25]

Hoewel het veiligheidsdoel in de NPR 9998 uitgedrukt kan worden in dezelfde termen van de risicoanalyse (bijv. individueel aardbevingsrisico: IR), is het belangrijk om te realiseren dat de NPR 9998 geen berekeningsmethode voor het aardbevingsrisico beschrijft. Het is dan ook niet mogelijk om met de NPR 9998 rechtstreeks te controleren of een individueel gebouw werkelijk aan de veiligheidsnorm voldoet.

Met de NPR 9998 kan wel beoordeeld worden of een gebouw wel of niet (gedeeltelijk) bezwijkt zoals verwacht, gegeven een bepaalde mate van grondbeweging. De NPR 9998 geeft een beschrijving hoe op basis van berekeningen men het structureel gedrag van één gebouw kan voorspellen tijdens een gegeven seismische last (aardbeving). De NPR 9998 beoordeelt of een gebouw aan de norm voldoet door te kijken of deze niet te veel vervormt of ernstig beschadigd worden tijdens een specifieke seismische last. Meer technisch gezegd: De NPR beoordeelt of de structurele rekenwaarde van de seismische ontwerpweerstand van een gebouw niet wordt overschreden door de rekenwaarde van de seismische belasting.

De veiligheidscontrole in de NPR 9998 wordt daarmee niet uitgedrukt in termen van een risico-eenheid, maar in termen van een verificatie of het gebouw bestand is tegen een gegeven seismische belasting. Als dit niet het geval is, dan wordt er in de NPR 9998 aangeraden om het gebouw te versterken. De NPR 9998 noemt ook enkele voorbeelden op van versterkingsmaatregelen (zie Bijlage B), maar laat ruimte over aan de uitvoerende ingenieursbureaus om zelf een keuze te maken in de versterkende maatregelen.

Sinds 2015 is de NPR 9998 meermalen herzien en gepubliceerd. Momenteel wordt er gewerkt aan een herziende versie van het huidige NPR 9998:2018.

NORM	Gepubliceerd op
NPR 9998:2015 nl	18-12-2015
NPR 9998:2017 Ontw. Nl	01-06-2017
NPR 9998:2018	01-11-2018
NPR 9998:2018+C1:2020 nl	01-02-2020

De NPR 9998 gaat uitsluitend over constructieve aspecten en kan niet gebruikt worden om schade aan gebouwen te voorkomen als gevolg van seismische gebeurtenissen. De NPR 9998 kan wel worden gebruikt om de schade te beperken tot een niveau met een acceptabel individueel risico: aldus waarbij het huis kans heeft op bezwijken, maar niet instort. Scheurvorming als gevolg van aardbevingsbelastingen kan ondanks gebruikmaking van de NPR 9998 optreden. Scheurvorming die reeds heeft plaatsgevonden, speelt een rol bij de bepaling van de weerstand tegen aardbevingsbelastingen.

[24] Voorheen bekend als de Meijdamnorm.
[25] https://wetten.overheid.nl/jci1.3:c:BWBR0042265&z=2019-06-05&g=2019-06-05.

Hoe werkt een NPR-toetsing?

Om het gebouw seismisch te beoordelen moet een ingenieur hiervoor: 1) de bodemeigenschappen vaststellen; 2) de materiaaleigenschappen van de gebouw-elementen vaststellen; 3) de berekeningsmethode voor de representatie van de aardbevingsbelasting kiezen; 4) de berekeningsmethode voor de structurele analyse kiezen; 5) de maatgevende aardbevingsbelasting bepalen op de locatie van het gebouw; 6) het uitvoeren van de structurele analyse; en vervolgens 7) het toetsen aan de structurele criteria van de NPR 9998. Hierna worden deze stappen één voor één besproken.

1) Bodemeigenschappen vaststellen

Voor het uitvoeren van een beoordeling volgens NPR 9998 is informatie over de ondergrond nodig om de nodige fundering- en geotechnische controles uit te voeren. Uit het grondonderzoek moet de grondopbouw voor de berekeningen worden bepaald. De benodigde parameters zijn afhankelijk van het type berekening en de daarin gebruikte grondmodellen. Voor te verbouwen of bestaande gebouwen kan gebruik worden gemaakt van een gebiedsgerichte aanpak, waarbij van grof naar fijn het grondonderzoek in een heel gebied kan worden opgezet. Bij het toepassen van een geavanceerde berekeningsaanpak moeten seismische sonderingen (SCPT's) beschikbaar zijn dan wel worden uitgevoerd. Deze gegevens worden gebruikt als invoer gegevens (*input*) om de structurele analyse uit te kunnen voeren in een vervolgstap (stap 6).
De CVW heeft grondonderzoek laten uitvoeren op basis van een gebiedsgerichte aanpak om op een efficiënte manier informatie over de ondergrond te verzamelen. SodM heeft deze uitgevoerde grondonderzoeken niet beoordeeld.

2) Materiaaleigenschappen vaststellen

In deze stap moeten de materiaaleigenschappen van de verschillende gebouwelementen (dus de primaire seismisch-, secundair seismisch, niet-seismisch constructief-, en niet-constructieve elementen). De NPR 9998 verwijst naar andere bouwnormen voor de bepaling van de materiaaleigenschappen voor beton, staal en hout, die afhankelijk is of het gaat om nieuwbouw of bestaande en van de nodige structurele verificatie (berekening). Bij de beoordeling van bestaande steenconstructies (metselwerk) geeft de NPR 9998 aan dat de karakteristieke waarden bepaald kunnen worden uit een tabel met gemiddelde waarden; met de ondergrenswaarden; experimenteel; en door middel van in-situ toetsen. Deze gegevens worden ook gebruikt als invoer gegevens om de structurele analyse uit te voeren (stap 6).

3) Rekenmethoden aardbevingsbelasting kiezen

Afhankelijk van de constructieve eigenschappen van het gebouw (de opbouw) mag voor het bepalen van de aardbevingsbelasting op de constructie gebruik worden gemaakt van één van de volgende twee soorten lineair-elastische berekeningsmethoden:

a) de 'berekening volgens de zijdelingse belastingsmethode' en
b) de 'berekening volgens het modale-responsspectrum' (MRS),

Als alternatief voor een lineaire berekeningsmethode mag ook een niet-lineaire methode worden gebruikt, zoals:

c) niet-lineaire (statische) push-over-berekening (NLPO), of
d) niet-lineaire (dynamische) tijdsdomeinberekening (NLTH).

In het geval van een niet-lineaire berekening moet het rekenmodel ook de weerstand van de bouwconstructie op adequate wijze beschrijven.
Aan de hand van één van de gekozen berekeningsmethode wordt hiermee verder gerekend in stap 6.

SodM heeft vijfentwintig versterkingsadviezen (VA's) bestudeerd, waaruit blijkt dat de meest gebruikte berekeningsmethoden voor de bepaling van de aardbevingsbelasting zijn: MRS, NLPO, en NLTH of een combinatie van twee van deze methoden (zie onderstaande tekstvak). De keuze voor de methode wordt per gebouw aan het begin van een project gemaakt en hangt af van zowel de complexiteit van het gebouw als de beschikbare data over het gebouw.

Berekeningsmethoden gebruikt voor bepaling van de aardbevingsbelasting in VA's

***NLPO**: Niet-lineaire push-over-berekening*

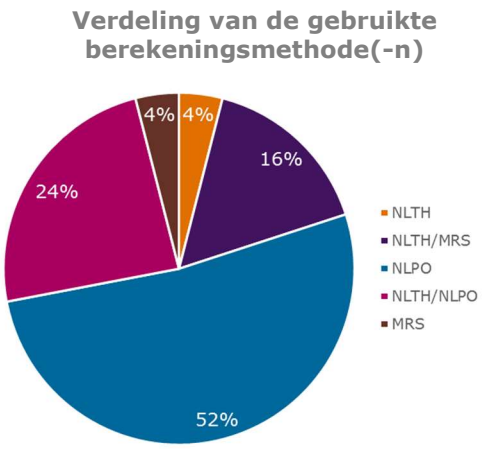
De NLPO is een algemeen gebruikte berekeningsprocedure voor de beoordeling van de seismische weerstand van bestaande constructies en wordt ook gezien als het startpunt van de technische inspanning.

***NLTH**: Niet-lineaire (dynamische) tijdsdomeinberekening*

De meest geavanceerde methode is de NLTH. Deze methode vraagt per object om een groot aantal simulaties en is daarom zeer duur en tijdrovend. Bovendien mogen de resultaten alleen als voldoende betrouwbaar worden beschouwd indien de rekenprogramma's zijn gevalideerd, dan wel gekalibreerd aan representatieve proefresultaten. NLTH worden toegepast indien voldoende data aanwezig is.

***MRS**: Modale-responsspectrumberekening (of* lineaire dynamische berekening)

Deze methode moet tot een minimum worden beperkt in het geval van toetsing van dragende constructies van metselwerk, aangezien dit een zeer conservatieve versterkingsmaatregel kan opleveren. De responsspectra-analyseprocedure is gebaseerd op de aanname dat de dynamische respons van een structureel model kan worden benaderd als een samenvatting van de reacties van de onafhankelijke dynamische modi van het model.



Figuur 3: Berekeningsmethode gebruikt in 25 VA's die SodM heeft bestudeerd

4) Berekeningsmethode voor het uitvoeren van de structurele analyse kiezen

Verificatie van een gebouw conform NPR 9998 wordt uitgevoerd op basis van handmatige berekeningen of op basis van meer complexe en verfijnde berekeningsmethoden. Voor complexe berekeningsmethoden, zoals de eindige-elementenmethode (FEM: Finite Element Method), gebruiken ingenieurs commerciële pakketten met specifieke software.

Meest gebruikte methoden voor de berekening van sterkte-eigenschappen van gebouwen

***FEM**: Finite Element Method*

De eindige-elementenmethode (e.e.m.) is een berekeningsmethode waarmee partiële differentiaalvergelijkingen en integraalvergelijkingen kunnen worden opgelost. De methode is ontwikkeld, omdat analytische berekeningsmethoden onvoldoende mogelijkheden bieden, of te complexe berekeningen vergen. De methode vindt zijn toepassing bij sterkteberekeningen van gebouwen.

Macro element model

Dit is een van de meest eenvoudige berekeningsmethode waar een enkel macro-element wordt gebruikt om het gedrag van een gemetselde constructie-onderdeel te modelleren.

5) Maatgevende aardbevingsbelasting bepalen op de locatie van het gebouw

In deze stap wordt de maatgevende aardbevingsbelasting bepaald voor de specifieke locatie van het te beoordelen gebouw. Deze aardbevingsbelasting verschilt per locatie omdat bijvoorbeeld de

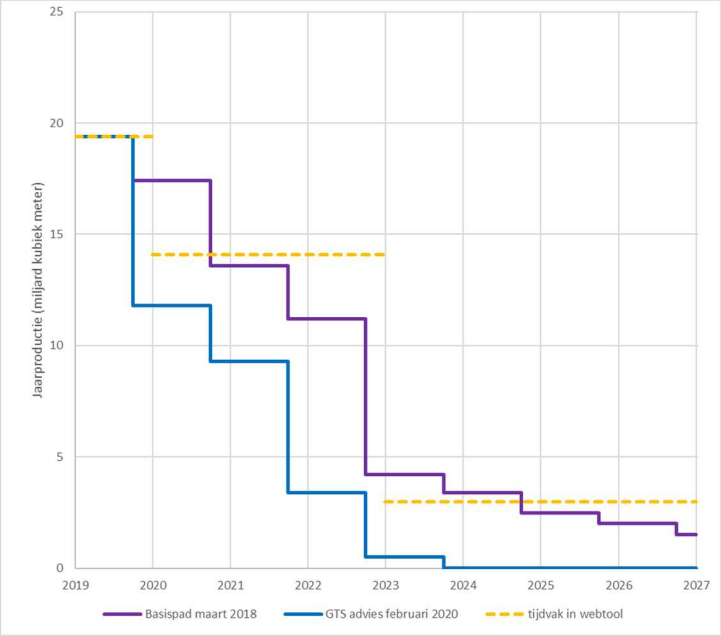
kans op aardbevingen verschilt over het gebied en omdat ook de grondsamenstelling tot 100 meter diepte verschilt door het gebied. Deze grondsamenstelling kan de grondversnellingen ten gevolge van een aardbeving dempen of juist versterken. De maatgevende grondversnelling wordt gebruikt voor het beoordelen van het gebouw. Echter, de intensiteit van de grondversnellingen alleen is onvoldoende om te bepalen of een gebouw bijvoorbeeld instort of niet. De maatgevende grondversnelling wordt gebruikt als een invoergegeven voor het uitvoeren van de structurele analyse in de volgende stap (stap 6), waarmee berekend kan worden hoe de grondversnellingen zich verder vertalen in spanningen en bewegingen in de constructie van het gebouw.

De huidige versterkingsadviezen van de NCG worden gemaakt met behulp van de 'Webtool NPR 9998: Bepaling van de seismische belasting'.[26] Deze webtool is een hulpmiddel om inzicht te verkrijgen in de voorspelde aardbevingsbewegingen bij een gekozen herhalingstijd op een specifieke locatie in Groningen. De herhalingstijd is een omgekeerde maat voor de jaarlijkse kans op een extreme gebeurtenis (bijvoorbeeld, de hoogte van de waterstand, of de piekgrondversnelling). Hoe groter de herhalingstijd, hoe kleiner de jaarlijkse kans op de gebeurtenis. De gekozen herhalingstijd is destijds bepaald bij het ontwikkelen van de NPR 9998. Deze herhalingstijd is een bepalende factor voor het komen tot de maatgevende aardbevingsbelasting. Omdat dit een belangrijk maar ook complex onderwerp is, wordt hier in het volgende hoofdstuk in meer detail op ingegaan.

De huidige belastingen (en dus de maatgevende grondversnellingen) in de webtool komen vanuit zowel het NAM seismische model (HRA 2018) als het KNMI seismische model, en zijn geordend in drie tijdvakken (t1, t2 en t3). Deze tijdvakken met optredende belastingen zijn gekoppeld aan de afbouw van de gaswinning volgens het basispad voor het gemiddelde winterscenario zoals voorgeschreven in de Kamerbrief over gaswinning Groningen op d.d. 29 maart 2018[27]. De te verwachten risico's van destijds waren gebaseerd op de volgende gemiddelde gaswinning:

- t1 (2018-2020): circa 19,4 miljard Nm^3
- t2 (2020-2023): circa 14,1 miljard Nm^3
- t3 (2023-2027): circa 3,0 miljard Nm^3

Tot en met 2019 is tijdvak t1 gebruikt voor de berekening van de versterkingsadviezen. Dit betekent dat deze berekende seismische activiteit effectief gebaseerd is op een gemiddelde productieniveau van circa 19,4 miljard Nm^3 per jaar.

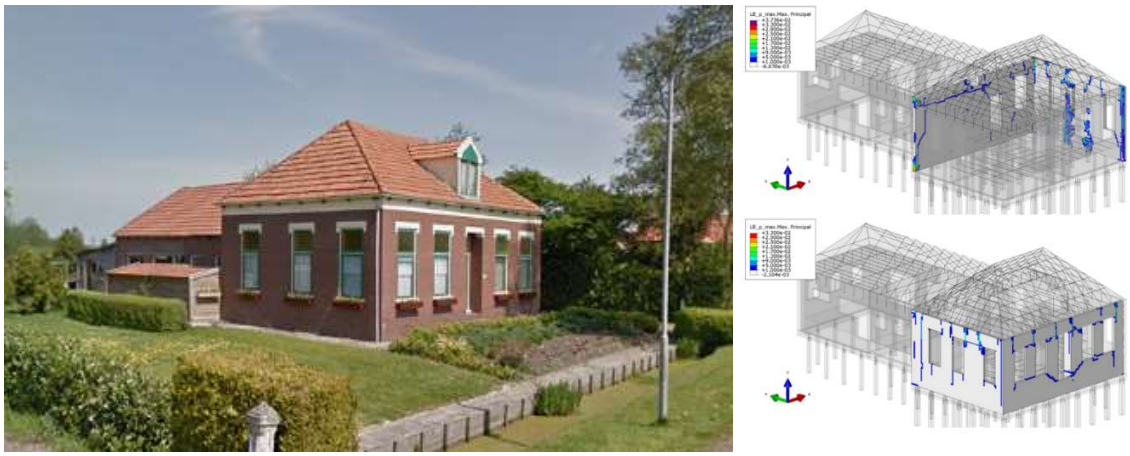


Figuur 4. Afbouw gaswinning in Groningen volgens basispad van maart 2018 (die NPR webtool gebruikt, paarse lijn) en de nieuwe vastgestelde afbouw scenario volgens GTS met de Webtool tijdvak-indeling (blauwe lijn). De gele lijnen zijn gemiddelde productie over de tijdvakken zoals opgenomen in de NPR webtool.

[26] Met laatste update per 21 december 2018 op basis van Ground Motion Model 'GMM' v5 van NAM (Bommer et al, maart 2018).
[27] Kamerbrief DGETM-EI / 18057375 van 29 maart 2018

6) Structurele analyse uitvoeren

De bovengenoemde gegevens (stap 1 t/m 5) worden samengebracht voor de berekening en bepaling van de sterkte-eigenschappen van een gebouw. De gegevens die van toepassing zijn op het gebouw worden als *input* gebruikt, waarmee vervolgens wiskundige formuleringen de nodige berekeningen uitvoeren in numerieke modellen. Op basis van de wiskundige vergelijking tussen de aardbevingsbelasting en de materiaalweerstand (van de constructieve elementen) van het gebouw, wordt de respons (*het gedrag*) van het gebouw berekend en uitgedrukt in termen van verplaatsing, inwendige spanningen in het materiaal, en eventuele schade aan de constructieve elementen.



Figuur 5 Voorbeeld van een numeriek model met de representatieve gegevens van een woning (links), die de verwachte schade als gevolg van een aardbeving (met een bepaalde belasting) kan voorspellen

7) Toetsen aan de structurele criteria conform de NPR 9998

De gebouwelementen (primaire seismische elementen, secundaire seismische elementen en relevante niet-seismische, constructieve elementen) worden elk getoetst aan de structurele criteria, dat in feite een verificatie is dat de rekenwaarde van de weerstand van dit element voldoende groot is om de rekenwaarde van de (reagerende) aardbevingsbelasting op te kunnen nemen.

3.2 Aandachtspunten van de NPR 9998

SodM ziet drie belangrijke aandachtspunten: ten eerste het benutten van de meest recente inzichten omtrent de sterkte van de gebouwen in Groningen in de NPR 9998, ten tweede het gebruiken van de meest recente afbouwpad van de gaswinning, en als laatste het komen tot een zo consistent mogelijke en adequate toepassing van de in de NPR 9998 benoemde berekeningsmethoden.

Benutten meest recente inzichten omtrent de sterkte van gebouwen:

Het is voor SodM niet duidelijk geworden welke partij de structurele criteria in de NPR 9998 gekalibreerd heeft en op basis van welke beschikbare data, om een volledig oordeel te kunnen geven over de gebruikte kennis en inzichten. Door de kalibratie uit te voeren worden de nodige structurele criteria afgeleid om te kunnen voldoen aan de wettelijke veiligheidsnorm.

Geconstateerd is, dat niet altijd van de meest recente inzichten gebruik wordt gemaakt. Een voorbeeld hiervan is Bijlage H van NPR 9998:2018, die adresseert hoe berekeningen moeten worden gemaakt omtrent uit-het-vlak gedrag van metselwerkwanden. Deze bijlage wordt momenteel herzien, de aangepaste versie komt beschikbaar en wordt verwacht in juli 2020 in de vorm van een wijzigingsblad NPR 9998: Annex H. Criteria voor uit-het-vlak bezwijken (in het Engels: Out-of-plane, OOP) zijn afkomstig uit buitenlandse normen en niet gekalibreerd voor

Groningen (of Nederlandse) specifieke gebouwen. TNO vroeg hier al aandacht voor in haar advies[28] voor het vaststellingsbesluit 2019-2020 met betrekking tot de uit-het-vlak capaciteit van metselwerkwanden.

De relevantie van het zo goed mogelijk bepalen van de capaciteit van metselwerkwanden blijkt uit het volgende. Voor in-het-vlak capaciteit van metselwerkwanden is in 2015 een kalibratie uitgevoerd. Deze kalibratie leidde ertoe dat voor dit specifieke onderdeel in veel gebouwen significant minder zware versterkingsmaatregelen genomen hoefden te worden om aan de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5} te voldoen. Dit inzicht is opgenomen in de NPR 9998, versie 2018. Eenzelfde kalibratie is ook uitgevoerd voor de uit-het-vlak capaciteit van metselwerk wanden (OOP). Deze kalibratie was al gereed, vlak ná het vaststellen van NPR 9998, versie 2018. Tot op heden zijn de uitkomsten van deze kalibratie echter nog niet opgenomen in Annex H van de NPR 9998 dan wel als toevoeging opgenomen in het veiligheidsbeleid van de minister van EZK. De verwachting van TNO is dat het gebruikmaken van deze kalibratie vanaf zomer 2020 opnieuw impact zal hebben op de te nemen veiligheidsmaatregelen.

Gebruiken van de meest recente afbouwpad van de gaswinning:
SodM merkt op dat de NEN-webtool in haar huidige vorm gekoppeld is aan de afbouw van de gaswinning volgens het gemiddelde winterscenario zoals vermeld in de Kamerbrief van 29 maart 2018. Inmiddels is de afbouw van de gaswinning in Groningen versneld.[29] Daardoor sluiten de tijdvakken niet meer aan bij de verwachte seismische dreiging. Door onnodige of te zware maatregelen zou de versterkingsopgave langer duren dan noodzakelijk, gegeven de beperkte capaciteit in beoordeling en uitvoering. Bovendien moet voorkomen worden dat bewoners belast worden met onnodige ingrepen aan hun huis. Om te voorkomen dat onnodig zware versterkingsmaatregelen genomen worden, is het nodig om beoordelingen uit te voeren op basis van de afgenomen risico's. Het is daarom van belang dat de versterkingsadviezen uitgevoerd worden op een ander tijdvak dat beter aansluit met de verwachte seismische dreiging.

Komen tot consistente en adequate toepassing van berekeningsmethoden:
Recente onderzoeken[30] hebben aangetoond dat het gebruik van verschillende berekeningsmethoden voor het uitvoeren van de structurele analyse, oftewel voor de bepaling van de seismische weerstand (zie stap 4 in paragraaf 3.1), met andere niveaus van detaillering tot significant verschillende resultaten kunnen leiden. TU Delft doet onderzoek naar de vraag hoe vereenvoudigde analyses te kalibreren tegen meer geavanceerde niet-lineaire eindige elementen analyses (FEM) in een NLPO-berekeningsmethode, zodat de vereenvoudigde modellen betere resultaten opleveren. Dit onderzoek is al uitgevoerd voor ongewapend metselwerk voor de typologie rijtjeshuizen. Specifieke aandacht wordt besteed aan het vinden van correctiefactoren voor de parameters: initiële stijfheid; afschuifkracht ter plaatse van de fundering, en de verplaatsingsvermogen, zodat de resultaten verkregen uit de vereenvoudigde berekeningen kunnen worden vergeleken met de resultaten die zijn verkregen via geavanceerde niet-lineaire eindige-elementenmethode analyse.

3.3 HRA : Hazard & Risk Assessment

Het HRA-model is een keten van modellen ontwikkeld door de NAM die het veiligheidsrisico van alle gebouwen als gevolg van de gaswinning in Groningen ruwweg berekent. Het HRA-model is ontwikkeld om het risico voor het gehele gebied te bepalen. Het is niet bedoeld om het risico van één individueel gebouw te berekenen. De HRA bestaat uit een serie van acht complexe, opeenvolgende modellen. De output van het ene model, is input voor het volgende model. Een gedetailleerde uitleg van het HRA-model staat in Bijlage C.

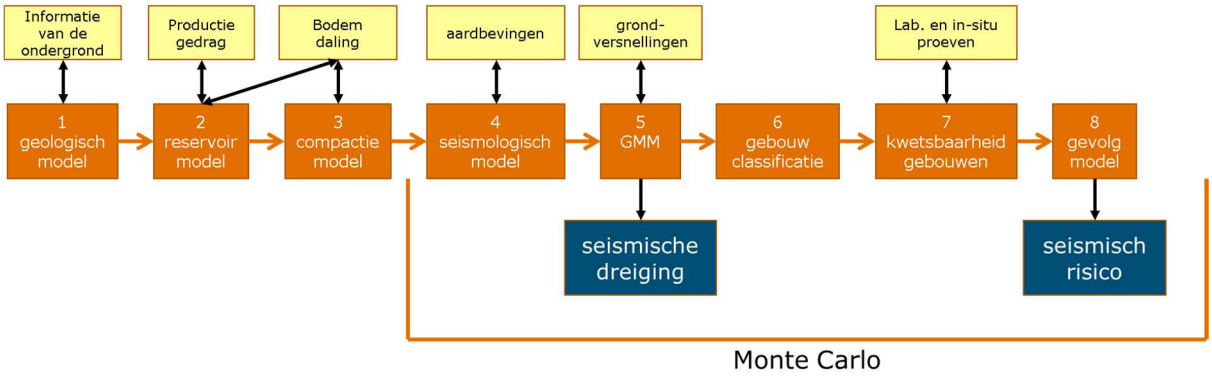
Deze trein van modellen is in staat om - weliswaar met grote onzekerheden – het risico te berekenen voor alle gebouwen in Groningen. Elk van deze modellen kent vele onzekerheden en

[28] Brief met kenmerk : AGE 19- 10.025.
[29] https://www.sodm.nl/sectoren/gaswinning-groningen/documenten/brieven/2020/02/24/advies-uitgangspunten-operationele-strategieen-en-hra-voor-het-gasjaar-2020-2021.
[30] Messali, F., Longo, M. (2019). Calibration of a mechanism-based method against NLFEA for NLPO analyses of URM terraced house units. Delft University of Technology. Report number 01, Version 01, 06 December 2019.

(model)keuzes en wordt zo goed mogelijk geijkt aan de beschikbare waarnemingen. Om te komen tot een zo goed mogelijke inschatting van de risico's bij het gebruik van een probabilistische aanpak, is het belangrijk dat *alle* onzekerheden met een realistische bandbreedte worden meegenomen.

In de huidige modeltrein en bijbehorende berekeningen van NAM is dit echter niet het geval. In de modellen zitten nog veel bekende en onbekende onzekerheden die de uitkomst van de risicoberekeningen beïnvloeden. De onzekerheden kunnen zowel tot een overschatting als een onderschatting van het berekende veiligheidsrisico leiden.

Samengevat ziet de keten van modellen (ook wel modeltrein genoemd) er als volgt uit:



Figuur 6: Trein van modellen waarmee de NAM de risico's kan uitrekenen.

De berekenbare onzekerheden worden grotendeels, maar niet allemaal, in de berekeningen meegenomen door Monte Carlo simulaties toe te passen (zie tekstvak 'Monte Carlo berekeningsmethode'). Een deel van de bekende onzekerheden in de modellen wordt door de experts zo ingeschat en zonder veiligheidsmarges meegenomen. Op deze wijze wordt het risico zo goed mogelijk berekend.

Deze bekende onzekerheden in de modellen zijn groot. De bandbreedte van mogelijke uitkomsten is daardoor ook groot: de P90-uitkomst (90% van de uitkomsten is lager) is een factor 25 groter dan de P10-uitkomst (10% van de uitkomsten is lager). Om echter talloze Monte-Carlo-simulaties uit te voeren, worden deze complexe 3D modellen vertaald naar simpelere modellen en verder gebruikt voor de (numerieke) model simulaties. Het is niet duidelijk of deze vereenvoudiging op de juiste manier wordt gedaan en hoe groot de onzekerheid daarmee is.

Monte Carlo berekeningsmethode

Dit is een methode waarbij de berekeningen meerdere keren worden herhaald. Bij elke berekening worden willekeurig andere waarden voor de onzekere parameters gebruikt. Het resultaat van deze methode is een bandbreedte van mogelijke uitkomsten met een kans, die aangeeft hoe waarschijnlijk deze oplossing is. Dit heet een waarschijnlijkheidsverdeling (in het Engels een Probability Density Curve). De gemiddelde waarde van deze verdeling wordt vaak de 'verwachtingswaarde' genoemd. Dit is de best mogelijke schatting voor de uitkomst van de berekening.
De waarde, waarbij de uitkomst in 90% van de berekeningen op of onder deze waarde ligt, wordt de 'P90' genoemd. De P90-waarde is geen 'worst-case' waarde. Indien bij de beoordeling wordt uitgegaan van de P90-waarde, is er alsnog een kans van 10% dat de echte waarde boven deze P90-waarde ligt.

Probabilistische risicobeoordeling en de Exposure Database

De HRA wordt gemaakt op basis van het onderzoeksprogramma "Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen" dat wordt gefinancierd door en uitgevoerd onder leiding van de NAM. Om de impact van aardbevingen op gebouwen beter te begrijpen (het gedrag van gebouwen), is begin 2014 een onderzoeksprogramma opgezet in Eucentre (Pavia, Italië), LNEC (Lissabon, Portugal) en TU Delft (Nederland) met als doel om de *kwetsbaarheid* van gebouwen te beoordelen. Hiervoor is het belangrijk dat de specifieke materiaaleigenschappen van de gebouwen in Groningen bekend zijn. Om dit te kunnen modelleren, vereist dit diepgaande kennis van (lokale) materiaaleigenschappen, daarom is er experimenteel onderzoek gedaan naar de materiaaleigenschappen en onderdelen; de meting van de sterkte van de gebouwelementen. Deze experimenten worden uitgevoerd voor zowel gemetselde gebouwen als niet-gemetselde gebouwen (zoals gewapend beton, staal en hout). Op basis van deze resultaten zijn er computermodellen ontwikkeld door ARUP, Mosayk en TU Delft die de reactie van gebouwen op aardbevingen modelleren en de sterkte van bouwelementen meten. Technische rapporten werden al openbaar gemaakt via een publiek toegankelijke website.[31] Sinds 2015 zijn hierover inmiddels al meer dan 200 rapporten gepubliceerd. Daarnaast is het onderzoek vastgelegd in meer dan 100 wetenschappelijke artikelen.

NAM heeft een database ontwikkeld, de Exposure Database (EDB)[32], waarin de eigenschappen van alle gebouwen in het Groningenveld zijn bepaald. De gegevens van deze gebouwen worden telkens bijgehouden en zo veel mogelijk verfijnd op grond van publiek beschikbare gegevens (die zijn opgeslagen in grote openbare databases), inspectie van tekeningen, observatie vanaf straatniveau en interne observatie (bij relatief klein aantal gebouwen). Tijdens 353 bezoeken aan gemeentekantoren zijn circa 190.000 bouwdocumenten verzameld, gescand en vastgelegd. De meest recente versie van EDB (versie V6) bevat informatie van interne en externe inspecties (tot november 2015) van 389 panden, tekeningen voor 11.756 panden, bouwinformatie voor 2.409 panden en visuele inspecties uitgevoerd vanaf de computer voor 12.174 panden. De resultaten van de inspecties van woningen van na november 2015 worden echter niet meegenomen in deze database. Op basis van deze verzamelde gegevens werden eigenschappen aan alle gebouwen, in totaal 164.853, met adressen binnen het bereik van EDB (met inwoneraantal groter dan 0) toegewezen met behulp van verschillende algoritmen.

Bij de meeste gebouwen is dit gebeurd zonder direct contact te hebben met de bewoners of op locatie te zijn. Er is dus een zekere mate van onzekerheid met betrekking tot de exacte eigenschappen van de meeste gebouwen; denk hierbij aan de vaststelling van de eigenschappen van de draagconstructie, schade aan de binnenkant van het gebouw, materiaaleigenschappen enzovoorts. Deze eigenschappen worden toegewezen op basis van een probabilistische benadering voor elk gebouw in het veld. Zo wordt er bijvoorbeeld beschouwd dat één gebouw een tussenvloer kan hebben met 50% kans bestaande uit houten platen en tegelijkertijd 50% kans bestaande uit betonplaten. Inspectie van gebouwen kan informatie geven over dergelijke kenmerken.

Tabel 1: gebruiksfunctie van de gebouwen in de gebouwendatabase van het HRA model

Gebruiksfunctie	**Aantal gebouwen**
Woonfunctie	140,682
Winkelfunctie	2,111
Kantoorfunctie	1,384
Bijeenkomstfunctie	1,596
Gezondheidszorgfunctie	337
Onderwijsfunctie	438
Logiesfunctie	1,099
Sportfunctie	245
Celfunctie	3
Industriefunctie	4,601
Overige gebruiksfunctie	12,357
Totaal	164,853

[31] https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/onderzoeksrapporten.html.
[32] Arup (2019) "EDB V6 data documentation", NAM web platform.

Om de *kwetsbaarheid* van gebouwen te bepalen, gebruikt HRA 2018 de niet-lineaire statische (NLPO) en dynamische analyse (NLTH) als berekeningsmethoden. Op schaal gemaakte gebouwmodellen (schaal 1:1) worden blootgesteld aan trillings-testen van representatieve schaal, wat verder bijdraagt aan de betrouwbaarheid van deze modellen.

Figuur 7 Trillings-test van een metselwerk gebouw (schaal 1:1l)

3.4 Aandachtspunten van de HRA

SodM houdt toezicht op het risicomanagement van de NAM, waaronder het identificeren en bepalen van de risico's. In dat kader volgt SodM continu de ontwikkeling van de HRA en toetst deze periodiek. SodM heeft eerdere analyses en adviezen hierover uitgebracht die als input vormden voor de verwachtingenbrief.[33] SodM noemt hier als belangrijkste aandachtpunt het benutten van de meest recente inzichten omtrent de actualisatie van de deelmodellen om de onzekerheden te minimaliseren en om nieuwe informatie en inzichten over de sterkte van gebouwen mee te nemen in kwetsbaarheids-, gevolgmodel en classificatie van gebouwen. Ook is het belangrijk dat nieuwe informatie omtrent de bruikbaarheid van de grondversnellingsmetingen opgenomen worden in het actualiseren van de deelmodellen.

Actualisatie van alle deelmodellen van de HRA:
De HRA berekent het veiligheidsrisico volledig probabilistisch, waarbij aan te tekenen is dat een deel van de onzekerheden niet opgenomen zijn in de modellering. Strikt genomen voldoet daarmee de HRA niet aan een volledige probabilistische toetsing, ofschoon de HRA op dit moment de best beschikbare probabilistische berekening is. SodM concludeerde eerder in haar advies dat voor *alle* deelmodellen van de HRA de meest recente geactualiseerde versies in de HRA gebruikt kunnen en moeten worden.

Laatste inzichten omtrent de kwetsbaarheids- en gevolgmodel & classificatie van gebouwen:
SodM vindt het belangrijk om nieuwe informatie en inzichten over de sterkte van gebouwen mee te nemen in kwetsbaarheids- en gevolgmodel van gebouwen. De verwachting is dat de veranderingen leiden tot een betere representatie van de gebouwen en een verbeterde risicoschatting voor de gebouwen geeft. Met aanvullende informatie uit opnames kan de classificatie van gebouwen steeds verbeterd worden en wordt op deze manier de EDB verder verfijnd.

[33] https://www.sodm.nl/sectoren/gaswinning-groningen/documenten/brieven/2020/02/24/advies-uitgangspunten-operationele-strategieen-en-hra-voor-het-gasjaar-2020-2021.

3.5 Totstandkoming en doorontwikkeling van NPR 9998:2018 en de HRA 2018

Ook de wijze van totstandkoming en doorontwikkeling van de HRA en de NPR 9998 verschillen van elkaar. De HRA is zoveel mogelijk gebaseerd op wetenschappelijke inzichten, zoals in de vorige paragraaf is beschreven. Elk jaar past de NAM nieuwe inzichten toe en daarbij maakt gebruik van reviews van internationale experts. Daardoor wordt relatief snel gebruikt gemaakt van nieuwe inzichten.

De HRA 2018 en achterliggende modellen zijn in februari 2018 gepresenteerd[34] door de NAM aan het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Vertegenwoordigers van het ministerie, SodM, NCG, KNMI, TNO, Hanze Hogeschool en EBN waren aanwezig op dit driedaagse congres. Een internationaal panel van onafhankelijke experts heeft GMM V5 in Januari 2017 en GMM V6 in september 2019 onderschreven. De minister van EZK geeft met een jaarlijkse verwachtingenbrief opdracht aan de NAM op de risicoanalyses uit te voeren volgens deze gevalideerde best beschikbare inzichten.

De NPR 9998 kent een geheel andere manier van totstandkoming en doorontwikkeling. Aanpassing van de NPR 9998 begint met de opdracht aan de NEN door de verantwoordelijke minister. De NEN stelt de NPR 9998 vast, maar doet dat niet alleen. NEN nodigt alle belanghebbende partijen uit om in een werkgroep mee te werken aan het proces van ontwikkeling. Leden van de werkgroep zijn ingenieurs uit onder andere adviesbureaus, kennisinstituten (zoals TNO, KNMI, TU Delft en TU Eindhoven) en vertegenwoordigers van de bouw. Een breed draagvlak is voor NEN een randvoorwaarde. De afspraken komen op basis van consensus tot stand. Als gevolg hiervan is de doorlooptijd van aanpassing van de NPR:9998 groter dan de doorlooptijd van de HRA. Elke wijziging begint met een opdracht van de minister en wordt gevolgd door het uitgebreide proces van een marktconsultatie. Als een opdracht tot wijziging of consensus uitblijft kan een wijziging van de NPR:9998 lang duren. De meningen en belangen van de leden van de werkgroep lopen immers niet per se parallel. Een voorbeeld hiervan is eerder vermeld in hoofdstuk 3.2, waar de meest recente inzichten nog niet toegepast zijn in de NPR 9998:2018 met betrekking tot uit-het-vlak gedrag van metselwanden en die komende zomer wordt bijgewerkt.

3.5 Conclusie

De NPR 9998 en de HRA worden voor verschillende doeleinden gebruikt. De HRA wordt gebruikt voor de *risico-inschatting* van een groot aantal gebouwen, terwijl de NPR 9998 wordt gebruikt voor de *berekening van de verwachte prestatie* van individuele gebouwen gedurende een maximale verwachte aardbeving met een bepaalde herhalingstijd.

Met de NPR 9998 is het mogelijk om een oordeel te geven over de aardbevingsbestendigheid van een individueel gebouw. De NPR 9998 beoordeelt of een gebouw wel of niet (gedeeltelijk) bezwijkt zoals verwacht bij een vooraf vastgestelde maatgevende aardbeving. In het geval dat een gebouw niet voldoende weerstand kan bieden, dan adviseert de NPR 9998 om het gebouw te versterken. SodM merkt op dat de NPR 9998:2018 op sommige aspecten kan leiden tot een conservatieve benadering, waarbij de weerstand van de huizen wordt onderschat en deze onnodig (veel) versterkt moeten worden. Daarom is het van belang dat de NPR 9998 de meest recente inzichten blijft benutten en actualiseert.

Het is voor SodM onduidelijk door welke partij en op basis van welke gegevens de structurele criteria in de NPR 9998 is gekalibreerd om te kunnen voldoen aan de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5}. De huidige NPR 9998 moet nog haar criteria aanpassen met betrekking tot het uit-het-vlak gedrag (en dus capaciteit) van metselwanden. Het is van belang dat de nieuwe inzichten zo snel mogelijk worden opgenomen in de NPR 9998, om onnodig veel versterken te vermijden. Verder ziet SodM ook in dat de keuze in de type berekeningsmethode, zoals voorgesteld in de NPR 9998, kan leiden tot verschillende eindresultaten en hiermee tot verschillende mate van versterking. Het is daarom van belang dat er een consistente en adequate toepassing plaatsvindt van de berekeningsmethode.

De HRA methode geeft inzicht in de risico's voor het hele gebied, zonder de exacte eigenschappen van individuele gebouwen mee te moeten nemen. Met de HRA wordt het *statistische risico* dat

[34] Van Elk, J., Doornhof, D. (2018) Hazard and risk assessments for induced seismicity in Groningen.

voortkomt uit de seismische dreiging uitgedrukt voor een gebouw, en niet het daadwerkelijke risico op grond van de specifieke kenmerken en eigenschappen van een specifiek gebouw. Anders dan de NPR 9998, kan de HRA niet gebruikt worden om de aardbevingsbestendigheid van een individueel gebouw te bepalen en of deze voldoende sterk is (of versterkt moet worden).

4 Veiligheidsnorm en toetsingsmethode

Om te kunnen oordelen of de uitkomsten van de HRA en de NPR 9998 met elkaar vergeleken kunnen worden, moet eerst de vraag worden beantwoord of beide methodes toetsen aan dezelfde veiligheidsnorm. Hierbij wordt eerst gekeken wat de geldende veiligheidsnorm in Nederland is. Daarna wordt er gekeken op welke wijze de HRA en de NPR 9998 die norm hanteren.

4.1 Welke definities van risico worden gehanteerd in het aardbevingsgebied?

Er zijn verschillende manieren om het overlijdensrisico uit te drukken. Bij het bepalen en toetsen aan de veiligheidsnorm is het van belang dat het duidelijk is welke definitie gebruikt wordt. De volgende definities van risico worden gehanteerd in het aardbevingsgebied:

- Plaatsgebonden Persoonlijk Risico ('Local Personal Risk' LPR) is het risico op overlijden van een fictieve onbeschermde persoon die permanent aanwezig is in of nabij een specifiek gebouw. Dit gaat er van uit dat deze persoon 99% van de tijd in het gebouw aanwezig is en 1% van de tijd in de buurt van het gebouw.

- Het Object-gebonden Individueel Aardbevingsrisico (OIA) is het risico op overlijden van een fictieve onbeschermde persoon als gevolg van instorting of van vallende objecten van een specifiek gebouw (als gevolg van een aardbeving) waarbij deze persoon aanwezig in is of in de directe omgeving hiervan. Daarbij wordt rekening gehouden met de verblijftijd in en rondom dat gebouw.
  OIA = LPR * fractie van tijd dat iemand in/bij een gebouw is.

- Individueel Aardbevingsrisico (IAR, verder in de tekst IR) is de kans op overlijden voor een bepaalde persoon als gevolg van aardbeving in de periode van één jaar. Het individuele risico van een persoon is de naar duur gewogen som van het risico van de gebouwen die worden bezocht. De tijd die iemand buiten gebouwen doorbrengt, draagt niet bij aan het totale individuele risico.
  IR = OIA (gebouw 1) + OIA (gebouw 2) + OIA (gebouw 3) etc.

Om het overlijdensrisico voor een persoon goed te kunnen beoordelen, is kennis van de gebouwen nodig bij alle drie definities. Voor het OIA en IR is de tijdsduur van zijn/haar aanwezigheid in de verschillende gebouwen die hij/zij bezoekt vereist.

4.2 Wettelijk veiligheidsnorm

Naar aanleiding van de aardbevingen en gevolgen daarvan heeft de toenmalig minister van EZ in 2015 de Commissie Meijdam gevraagd te adviseren over een veiligheidsnorm voor het aardbevingsrisico. De commissie neemt als uitgangspunt dat het geaccepteerde veiligheidsrisico voor de inwoners van Groningen niet hoger mag zijn dan elders in Nederland. De Commissie heeft dit vertaald naar een veiligheidsnorm voor het individueel risico (IR) ten gevolge van de geïnduceerde aardbevingen van 10^{-5} per jaar voor nieuwbouw en bestaande bebouwing. De wiskundige notatie van 10^{-5} betekent voor elk individu een jaarlijkse kans op overlijden van 1 op de 100.000.

Het kabinet heeft met de Kamerbrieven van 3 november 2015 en 18 december 2015 de Tweede Kamer geïnformeerd dat zij dit advies en de daarbij behorende berekeningsmethodiek heeft overgenomen en vastgelegd in haar risicobeleid. Dat is daarna uitgewerkt in artikel 52d, tweede lid, van de Mijnbouwwet (de veiligheidsnorm waarmee de minister in het bijzonder rekening moet houden bij het vast stellen van de operationele strategie) en in artikel 3 van het Besluit versterking gebouwen Groningen (het gebruik van de NPR 9998, versie 2018)

De Afdeling bestuursrechtspraak van de Raad van State beslist in haar uitspraak van 15 november 2017 dat met het berekende OIA kan worden getoetst aan de veiligheidsnorm.[35] Het is deze berekeningsmethodiek die dan ook in dit rapport wordt gebruikt. De norm voor de veiligheid, als gevolg van aardbevingen, is daarmee vastgesteld op OIA kleiner dan 10^{-5} per jaar.

In een advies aan de minister heeft SodM aanbevolen om het veiligheidsrisico van de gaswinning uit te drukken in LPR. [36] De minister heeft vervolgens vastgelegd dat de HRA het risico moet toetsen op basis van LPR.[37] Het onderliggende principe achter het advies van SodM is dat als alle gebouwen een gemiddelde LPR onder de norm hebben, dan kan niemand blootgesteld worden aan een IR boven de norm. Om dit vast te kunnen stellen moet de verblijfsduur van mensen in een gebouw bekend zijn.

Het is van belang te beseffen dat als blijkt dat een gebouw niet aan de norm voldoet (dit geldt zowel voor de HRA als NPR 9998), daaruit niet mag worden geconcludeerd dat het gebouw onmiddellijk instort bij de eerstkomende aardbeving. Dit komt omdat het risico hoofdzakelijk wordt bepaald door zware aardbevingen (magnitude van 4,0 en groter) waarvan de kans dat ze optreden inmiddels zeer klein is.

4.3 Veiligheidsnorm in de HRA

De HRA 2018 hanteert een volledige probabilistische berekening, waarbij voor de toetsing aan de veiligheidsnorm wordt uitgegaan van 100% aanwezigheid in gebouwen.

De NAM volgt de vastgelegde aanpak, waarbij de Lokaal Persoonlijk Risico (LPR) voor het aantal gebouwen wordt geëvalueerd en vervolgens vergeleken met de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5} per jaar.

De HRA is met deze aanpak conservatief. Immers, zoals in de voorgaande paragraaf is beschreven volgt uit de Meijdam-norm dat het OIA getoetst kan worden, wat betekent dat de verblijfstijd van een persoon bij het specifieke object meegenomen moet worden. Omdat de LPR uitgaat van 100% verblijftijd is deze dus conservatiever dan de wettelijke veiligheidsnorm. Omdat in werkelijkheid het percentage vrijwel altijd lager, waardoor het werkelijke risico ook lager zal zijn.

4.4 Veiligheidsnorm in de NPR 9998

Ook in de NPR 9998:2018 is het uitgangspunt dat het maximaal aanvaardbaar Individueel Risico (IR) 10^{-5} per jaar is. Voor de beoordelingsregels voor bestaande gebouwen getroffen door aardbevingen sluit de NPR 9998:2018 aan op de huidige Nederlandse veiligheidsnorm voor bestaande gebouwen, die is vastgesteld in het Bouwbesluit 2012 en aangegeven in NEN 8700 (2011). In de nationale norm voor bestaande constructies NEN 8700 (2011) is de grenswaarde voor het individueel risico als 10^{-5} genomen, betrokken op het aspect menselijke veiligheid.[38] [39] Voor de NPR 9998 is ook een waarde van 10^{-5} per jaar voorgeschreven door de overheid.[40]

Aangezien het tijdrovend is om een volledig probabilistische berekening te maken voor elk individueel gebouw in Groningen om deze te kunnen toetsen aan de veiligheidsnorm[41], is er voor de NPR 9998 gekozen voor een eenvoudiger uit te voeren aanpak. De aanpak komt in essentie neer op twee stappen. Ten eerste wordt de zogenaamde maatgevende aardbeving bepaald. Dit is

[35] http://deeplink.rechtspraak.nl/uitspraak?id=ECLI:NL:RVS:2017:3156.
[36] Medio 2018 heeft de minister het advies gevraagd aan een panel van professoren omtrent de uitvoering van de veiligheidsnorm in de HRA methodologie. Dit panel van professoren wees erop dat de methodologie die in de HRA is geïmplementeerd een conservatieve benadering is, die inherent ervan uitgaat dat individuen in elk gebouw hun volledige tijd daarin doorbrengen.
[37] artikel 1.3a.2 van Mijnbouwregeling, https://wetten.overheid.nl/jci1.3:c:BWBR0014468&hoofdstuk=1¶graaf=1.3a&artikel=1.3a.2&z=2019-10-08&g=2019-10-08
[38] Steenbergen, R.D.J.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. Heron, 2010, 55, No. 2.
[39] Vrouwenvelder, A.C.W.M., Scholten, N.P.M., Steenbergen, R.D.J.M., Veiligheidsbeoordeling bestaande bouw, Background report of NEN 8700; TNO-060-DTM-2011-03086, 2011.
[40] artikel 3 van het Besluit versterking gebouwen Groningen, https://wetten.overheid.nl/BWBR0042265/2019-06-05#Hoofdstuk2_Artikel3
[41] Dit wordt in hoofdstuk 2.3.3 van NPR 9998 wel toegestaan.

de aardbeving waarvan de kans dat deze voorkomt vermenigvuldigt met de kans op instorten van een gebouw en het overlijden van persoon in dat gebouw samen 10^{-5} is, de door de wetgever gestelde grens aan de overlijdenskans. Ten tweede wordt zoals beschreven in hoofdstuk 3 voor ieder gebouw in het gebied op basis van de grondversnelling op de locatie van dat gebouw ten gevolge van de maatgevende aardbeving bepaald of het deze maatgevende aardbeving kan weerstaan of niet. In het laatste geval moet het versterkt worden.

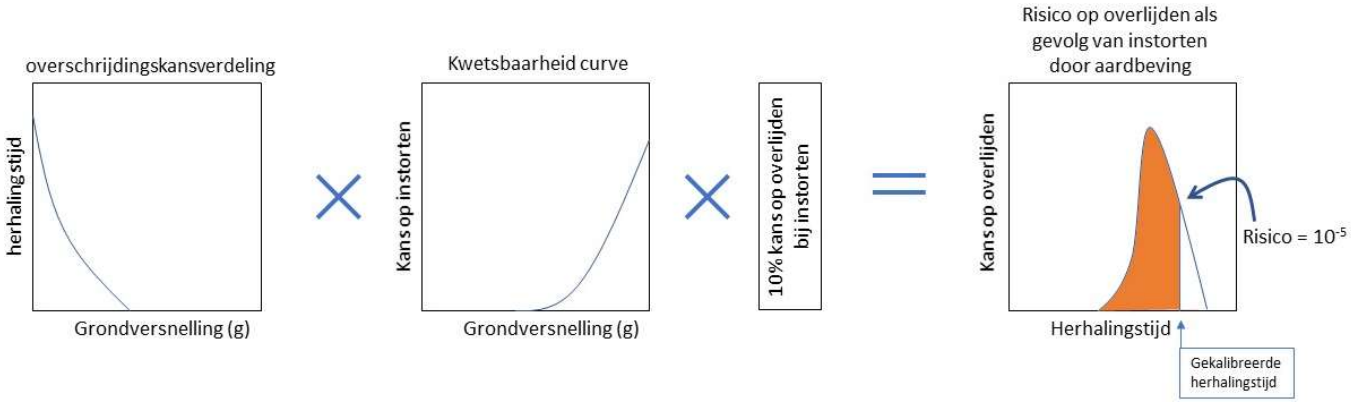
Het bepalen van de maatgevende aardbeving of grondversnelling is niet eenvoudig. Voor de kalibratie in de NPR 9998 is er gebruikt gemaakt van de overschrijdingskansverdeling voor de maximale grondversnelling in het gebied. Deze curve beschrijft in feite de kans dat een bepaalde grondversnelling verwacht wordt. Deze kans wordt uitgedrukt in de duur van de periode waarin één keer een dergelijke grondversnelling verwacht wordt, de zogenoemde herhalingstijd. Voor lage grondversnellingen is de herhalingstijd relatief kort, omdat kleine aardbevingen vaker voorkomen dan zwaardere aardbevingen die een langere herhalingstijd hebben. De curve die hiervoor wordt gebruikt, is gebaseerd op een model dat de grondversnellingen uitrekent volgens de grondbewegingsvergelijking GMPE v2.[42] Dit model beschrijft de grondversnellingen voor iedere locatie in het gehele gebied. De overschrijdingskansverdeling die is gebruikt voor het bepalen van de maatgevende aardbeving correspondeert met de locatie van Loppersum en Delfzijl. Omdat de variaties in dreiging door het gebied relatief groot zijn is er wel wat af te dingen op deze aanpak. Het is SodM ook niet duidelijk hoe beide locaties, met een verschillend dreigingsniveau, gebruikt zijn om te komen tot het bepalen de overschrijdingskans per jaar (met een herhalingstijd van T = 2475 jr).

Om de kans op instorten van een gebouw te bepalen wordt er gebruik gemaakt van een kwetsbaarheidscurve. De kwetsbaarheidscurve beschrijft de kans op constructieve schade (DS: Damage State) afhankelijk van de maximale grondversnelling (SA: Spectral Acceleration). Bij bepalen van de maatgevende aardbeving is er gebruik gemaakt van één veronderstelde kwetsbaarheidscurve.[43] Deze kwetsbaarheidscurve is niet gerelateerd aan één specifiek gebouw of typologie. Het is SodM niet duidelijk geworden wat de basis is geweest voor deze curve. Het gebruik in de NPR van deze werkwijze met één vorm van de kwetsbaarheidscurve voor alle gebouwen voor de bepaling van de maatgevende belasting is twijfelachtig. Verschillende gebouwen hebben een andere vorm van de kwetsbaarheidscurve en kunnen daarom leiden tot een andere maatgevende aardbeving bij kalibratie aan de veiligheidsnorm.

De overschrijdingskansverdeling voor de maximale grondversnelling is geïntegreerd met een gebouwen kwetsbaarheidscurve om het overlijdensrisico te berekenen. Hierbij is telkens met de herhalingstijd gevarieerd totdat dit resulteerde in een risico van 10^{-5} (Figuur 8). Op deze manier is de herhalingstijd bepaald waarmee de maatgevende aardbeving wordt bepaald en die de basis is voor de beoordelingen van de gebouwen in Groningen.

[42] Bommer, J.J., B. Dost, B. Edwards, P.P. Kruiver, P. Meijers, M. Ntinalexis, B. Polidoro, A. Rodriguez-Marek & P.J. Stafford (2015). *Development of Version 2 GMPEs for Response Spectral Accelerations and Significant Durations from Induced Earthquakes in the Groningen Field*. A report prepared for NAM, Version 2, 29 October 2015, 515 pp.

[43] Steenbergen, R., Vrouwenvelder, A., Straalen, IJ. (2018). TNO Background Report NPR 9998:2018 Part A: Terminology and Safety.



Figuur 8. Schematische weergave van de kalibratie in de NPR 9998 om te komen tot de veiligheidsnorm van 10^{-5}

Het gebruik van een veronderstelde kwetsbaarheidscurve is gebruikelijk bij het ontwerpen van nieuwe aardbevingsbestendige gebouwen. In dat geval wordt er getracht de kwetsbaarheidscurve te benaderen voor het te bouwen gebouw. Als het gebouw eenmaal daadwerkelijk is gebouwd, wordt de kwetsbaarheidscurve voor dat specifieke gebouw opnieuw bepaald aan de hand van de uitgevoerde eigenschappen, zodat het risico hiermee opnieuw kan worden berekend. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de overschrijdingskansverdeling in van nature seismisch actieve gebieden niet verandert van jaar op jaar. De seismische dreiging is constant en varieert alleen per locatie, en niet in tijd.

Het is SodM onduidelijk hoe de methode die hierboven is beschreven, gebruikt kan worden als kalibratie. Het gebruik van deze methode lijkt vooral gebruikt in andere landen om het seismisch risico van een specifiek gebouw te berekenen, niet om een herhalingstijd voor een semi-probabilistische aanpak te kalibreren. Daarbij is het ook niet duidelijk of deze kalibratie passend is bij een situatie met veranderende dreiging van jaar op jaar in Groningen. In tegenstelling tot gebieden met natuurlijke seismiciteit verandert de dreiging in Groningen wel van jaar op jaar. Het is SodM onduidelijk of en hoe dit gegeven is meegenomen in de kalibratie.

Naast de vraag of de methode passend is, is het ook van belang om te kijken of de laatste stand der kennis gebruikt is. Het lijkt dat de kalibratie met de kennis van 2015 is uitgevoerd, want de NPR 9998:2018 gebruikt data van GMPE v2, maar sindsdien zijn versies v5 en v6 geproduceerd door de NAM en KNMI. Er waren enkele grote veranderingen in deze twee versies van GMPE (die gerelateerd waren aan het gebruik van verbeterde KNMI-gegevens die voorheen verkeerd waren en verbeteringen van de GMPE zelf). Het is onduidelijk of deze nieuwe kennis een invloed kan hebben op deze kalibratie.

4.5 Conclusie

Zowel de HRA 2018 als NPR 9998:2018 toetsen aan de geldende veiligheidsnorm van het individuele risico (IR) die kleiner is dan 10^{-5} per jaar, maar geen van beide berekent (of verifieert) deze rechtstreeks voor elk gebouw. Dit wordt hieronder kort samengevat beschreven.

In de HRA wordt één gebouwtypologie of meerdere toegekend aan elk adres in het Groningen-veld en 5 km buffer, zonder inspecties uit te voeren voor elk gebouw en zonder 100% zeker te weten of de veronderstelde typologie overeenkomt met de realiteit. Hierdoor kan je niet verifiëren dat LPR kleiner is dan 10^{-5} voor dat specifiek gebouw. De HRA staat toe om de berekende waarde direct te vergelijken met de veiligheidsnorm, echter is de berekende waarde voor een type gebouw op die locatie, maar niet noodzakelijkerwijze voor een specifiek gebouw, omdat zaken zoals verbouwingen of staat van onderhoud niet worden meegenomen.

Anderzijds beoordeelt NPR 9998:2018 met een semi-probabilistisch berekening of een specifiek gebouw (inclusief de staat van onderhoud en verbouwingen) veilig is bij een bepaalde aardbevingsbelasting. SodM kan echter niet nagaan hoe in de NPR 9998 tot de maatgevende aardbevingsbelasting is gekomen die de grondslag vormt voor de beoordeling van gebouwen in Groningen. SodM kan daarom niet beoordelen of de kalibratie passend is. De kalibratie lijkt in elk

geval op basis van oude inzichten uitgevoerd te zijn. Los van het feit dat de wijze van kalibratie mogelijk verbetering vereist, vindt SodM het zorgwekkend dat de wijze van kalibratie die is gebruikt bij het bepalen van de NPR 9998 niet éénduidig beschreven en gedocumenteerd is.

SodM adviseert daarom om opnieuw te beoordelen of de kalibratiemethode passend is. Specifiek moet verhelderd worden of een afnemende seismische dreiging meegenomen kan worden in deze kalibratiemethode. Bovendien is de norm binnen de NPR 9998 gekalibreerd gebruikmakend van een veronderstelde kwetsbaarheidscurve, en niet met de kwetsbaarheidscurve voor een specifiek gebouw (-typologie). Het is niet duidelijk of deze veronderstelde kwetsbaarheidscurve leidt tot een goede keuze voor de beoordeling van bestaande gebouwen en voor de versterking van bestaande gebouwen. Tenslotte verdient het aanbeveling om de kalibratie voor zover deze passend is, opnieuw uit te voeren op basis van de laatste stand der kennis en vervolgens ook nauwgezet te beschrijven en te documenteren.

5 Toepassing van HRA 2018 en NPR 9998:2018

In voorgaande hoofdstukken wordt uitgelegd waarom de HRA en de NPR 9998 niet direct kunnen toetsen of een gebouw voldoet aan de veiligheidsnorm (hoofdstuk 4) en dat de uitkomsten van beide methodieken verschillen als gevolg van verschillende doelen en technische keuzes in het ontwerp (hoofdstuk 3). De uiteindelijke uitkomsten worden daarnaast ook beïnvloed door de manier waarop beide methodieken worden toegepast. In dit hoofdstuk wordt de manier waarop de HRA en de NPR worden toegepast beschreven.

5.1 HRA

Om te komen tot een zo goed mogelijke inschatting van de veiligheidsrisico's bij het gebruik van een probabilistische aanpak, is het belangrijk dat alle onzekerheden met een realistische bandbreedte, worden meegenomen. In de huidige modeltrein en bijbehorende berekeningen van de NAM is dit echter niet het geval. Op dit moment worden nog niet alle bekende onzekerheden volledig en consistent meegenomen. Dit beïnvloedt de uitkomst van de risicoberekening. Deze onzekerheden kunnen leiden tot zowel een overschatting als een onderschatting van het berekende veiligheidsrisico. De uitkomst van de risicoanalyse is uitgedrukt in kansen dat een gebouw niet voldoet: aan de verwachtingswaarde (de zogeheten Pmean[44]) en de P90. Deze waarden worden in het kader van de versterkingsoperatie omgezet in een verhoogd risicoprofiel (Pmean) of licht verhoogd risicoprofiel (P90).

De keuze voor de grootte van de onzekerheidsmarge is een praktische en bestuurlijke keuze. Juist omdat een deel van de onzekerheden niet wordt meegenomen in de berekeningen, is geen wetenschappelijke grondslag mogelijk voor de keuze van de omvang van de onzekerheidsmarge. Een uitgebreide uitleg over het gebruik van de onzekerheidsmarge is opgenomen in het Advies Groningen-gasveld n.a.v. aardbeving Zeerijp van 8 januari 2018 (Zeerijp-advies)[45] en Advies over de gevolgen van de afbouw van de gaswinning in Groningen voor de veiligheidsrisico's en versterkingsopgave[46].

Niveau van gaswinning: 12 miljard Nm^3 per jaar

SodM heeft de zogenaamde P90 uit het HRA-model gebruikt om te komen tot haar Zeerijp-advies van februari 2018 om de gaswinning zo snel als mogelijk te verlagen naar 12 miljard Nm^3 per jaar zodat de gaswinning met enige zekerheid zou voldoen aan de tijdelijke veiligheidsnorm van 10^{-4}. Gelijktijdig zou de versterking er voor moeten gaan zorgen dat de gebouwen ook zouden voldoen aan de norm van 10^{-5}. De P90 is de waarde, waarbij de uitkomst in 90% van de berekeningen op of onder deze waarde ligt; er is een kans van 10% dat de echte waarde boven deze P90-waarde ligt. Het verschil in de uitkomsten tussen verwachtingswaarde en de P90 is de marge die SodM heeft gehanteerd. Hiermee heeft SodM zich gebaseerd op de berekende onzekerheid in de uitkomsten van de risicoberekeningen, welke een reflectie is van de huidige stand van de kennis in de modellen.

Prioritering

Om consistentie met het Zeerijp-advies en de afbouwscenario's van de minister te borgen, heeft SodM geadviseerd voor dezelfde marge in de versterkingsmaatregelen: om de P90 uit de HRA 2018 berekeningen van de NAM over te nemen. In totaal omvat het versterkingsprogramma daarmee ongeveer 7.200 gebouwen of 9.820 adressen. Op grond van het Mijnraad-advies zijn hier adressen aan toegevoegd waar naar bewoners verwachtingen gewekt waren. Vervolgens heeft de NCG geadviseerd adressen toe te voegen die naast de HRA-adressen liggen en daarmee zeer vergelijkbaar zijn, maar geen (licht) verhoogd risicoprofiel hebben. SodM heeft deze aanpak goedgekeurd. Dit leidde in totaal tot een lijst van zo'n 15.000 adressen. Vervolgens bleken in de verbeterde versie van de HRA in 2019 door verbeteringen in de informatie omtrent de individuele

[44] Pmean wordt ook wel Pverwachtingswaarde genoemd. In sommige gevallen wordt dit ook P50 genoemd. Dit laatste is statistisch niet correct, maar er wordt wel de zelfde groep mee bedoeld.
[45] https://www.sodm.nl/sectoren/gaswinning-groningen/documenten/publicaties/2018/02/01/advies-groningen-gasveld-n.a.v.-aardbeving-zeerijp-van-8-januari-2018.
[46] https://www.sodm.nl/sectoren/gaswinning-groningen/documenten/publicaties/2018/06/27/advies-over-de-gevolgen-van-de-afbouw-van-de-gaswinning-in-groningen-voor-de-veiligheidsrisios-en-versterkingsopgave.

gebouwen zo'n 3.000 nieuwe gebouwen een (licht) verhoogd risicoprofiel te krijgen. Het ging met name om boerderijen met een schuur.[47]

Ten slotte hebben gemeenten lokale plannen van aanpak opgesteld, waarbij zij een zeer beperkt aantal 'grijze panden' hebben toegevoegd (gebouwen met een normaal risicoprofiel). Dit beperkt aantal gebouwen is toegevoegd omdat bijvoorbeeld deze gebouwen midden in wijken staan waar de rest van de gebouwen wel onderdeel is van het versterkingsprogramma. Omwille van de uitlegbaarheid en de voortgang van de versterking heeft SodM die toevoegingen toegestaan. Uiteindelijk hebben de bewindslieden en bestuurders in de regio afgesproken dat alle gebouwen die in het verleden al een inspectie hebben gehad maar op grond van bovenstaande nog niet opgenomen waren in de versterkingsopgave, toegevoegd worden. Op grond van bovenstaande omvat de versterkingsopgave op dit moment zo'n 26.500 adressen. Voor alle duidelijkheid: deze 26 duizend adressen worden op sterkte beoordeeld op basis van gevalideerde beoordelingsmethodieken en worden versterkt als blijkt dat deze adressen versterkt moeten worden.

De NCG gebruikt het HRA-model voor de prioriteitsvolgorde van de versterkingsopgave. Voor de veiligheid is het belangrijk dat eerst de gebouwen met een verhoogd risicoprofiel en vervolgens een licht verhoogd risicoprofiel worden opgenomen, beoordeeld en mogelijk versterkt. Gebouwen met een normaal risico volgens HRA-model hebben geen verhoogd risico en worden daarom op dit moment niet verder onderzocht, tenzij zij onderdeel zijn van bestuurlijke afspraken of de uitlegbaarheid en snelheid van de uitvoering van de versterkingsopgave ten goede komen.

Tot 2018 werd de gehanteerde 0,2g contourlijn van de KNMI dreigingskaart van november 2015 gebruikt voor de prioritering van de versterkingsprogramma. In juni 2018 adviseert SodM in het rapport "Gevolgen voor de veiligheidsrisico's en versterkingsopgave" om deze contour los te laten en om de prioritering op basis van de best mogelijke risicoschatting te laten plaatsvinden. De aanleiding hiervoor was de constatering dat een deel van de gebouwen met een hoog risicoprofiel - dat dus met voorrang in aanmerking zou moeten komen voor versterking - buiten de tot 2018 gehanteerde 0,2g contourlijn voor prioritering bleek te liggen.

Ook de Mijnraad adviseerde de minister van EZK om de prioritering op basis van een risicoschatting te laten plaatsvinden. De minister nam dit advies over. Hierdoor veranderde het uitgangspunt van het versterkingsprogramma. In plaats van alle woningen binnen de zogeheten 0,2g contourlijn te versterken, werd het uitgangspunt de risicovolle huizen in de *gehele* regio aan te pakken, de meest risicovolle als eerste. In het nieuwe regionale plan van aanpak van 22 november 2018 gaat de NCG uit van deze risicogestuurde aanpak.[48]

Aandachtspunten bij de toepassing van HRA 2018

De keuze om de prioritering te laten plaatsvinden op basis van HRA 2018 was de beste beschikbaar keuze in juni 2018, maar dit zegt niets over het risico van individuele gebouwen op een bepaald (lees: specifiek) adres. Dit is omdat niet alle eigenschappen van gebouwen in EDB bekend zijn. De HRA is in staat om een inschatting te geven van het aantal gebouwen dat op veiligheid beoordeeld moet worden. De HRA kan echter zoals aangegeven niet de veiligheid van een individueel gebouw vaststellen.

Sinds de HRA 2018 is de methodologie verder ontwikkeld. Een groot deel van de ontwikkelingen werden gedaan op de basis van het 'Study and Data Acquisition Plan' (SDAP) van de NAM. Enkele verbeteringen hebben hun oorzaak in bijzondere gebeurtenissen. In het voorjaar van 2019 werd bekend dat er problemen waren met een groot deel van de KNMI versnellingsmeters (G0-netwerk). Hoewel het er op lijkt dat deze problemen geen effect hebben gehad op de gebruikte modellen[49], zorgde de onderzoeken die naar aanleiding van de problemen waren opgestart er voor dat er andere problemen geïdentificeerd (met de zogenaamde B0-meters) werden en inmiddels een

[47] https://www.sodm.nl/onderwerpen/aardbevingengroningen/documenten/publicaties/2019/03/26/snellereview-van-de-risico-analyse-voor-de-gaswinning-in-groningen-hra2019.
[48] https://www.nationaalcoordinatorgroningen.nl/binaries/nationaal-coordinatorgroningen/documenten/beleidsnotas/2018/11/22/plan-van-aanpakmijnraadadvies/Plan+van+Aanpak+Mijnraadadvies.pdf.
[49] KNMI-meters rapport.

volgende, verbeterde versie van het grondbewegingsmodel ontwikkeld wordt. Deze GMM v7 wordt eind 2020 verwacht.

5.2 NPR 9998:2018

De NPR 9998 wordt op grond van Artikel 3 van het Besluit versterken gebouwen Groningen gebruikt om te beoordelen of een gebouw voldoet aan de structurele criteria die is voorgeschreven in de NPR 9998. Indien dit wel het geval is, dan verwacht men dat dit gebouw aan de wettelijke veiligheidsnorm voldoet, zoals uitgelegd in hoofdstuk 4.2.

In de NPR 9998 en bijbehorende NEN-webtool wordt de seismische dreiging gegeven waarmee rekening moet worden gehouden om vast te kunnen stellen of de gebouwen (nieuw en bestaande gebouwen) in Groningen voldoen aan de veiligheidsnorm van 10^{-5} op het gebied van geïnduceerde aardbevingen. De berekening van de huidige staat van de gebouwen wordt weergegeven in de beoordeling seismische capaciteit (BSC). Indien blijkt dat de huidige staat van deze gebouwen niet voldoet aan de gestelde eisen van de NPR 9998, dan dienen er een of meerdere versterkingsmaatregelen te worden ontworpen en doorgerekend, om uiteindelijk uitgevoerd te kunnen worden.

Dit hoofdstuk legt uit hoe de NPR 9998 momenteel wordt toegepast om te beoordelen of een gebouw versterkt wordt of niet. Dit proces bestaat uit voornamelijk vier stappen:

1. de opname van een gebouw;
2. het vaststellen van de gegevens ten behoeve van de modellering (schematisering) hiervan in de Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC);
3. verificatie van het gebouw conform de NPR 9998 aan de hand van een gekozen berekeningsmethode;
4. het vaststellen van een versterkingsmaatregel in een versterkingsadvies (VA's).

Deze vier processen worden in dit hoofdstuk verder uitgelegd.

Opname van gebouwen

Als een gebouw deel uitmaakt van de versterkingsopgave, dan wordt het gebouw opgenomen. Alle beschikbare informatie rondom het project moeten worden verzameld om de hoeveelheid aannames te minimaliseren. Denk hierbij aan het verzamelen van bouwtekeningen van woningen en geotechnische rapporten met betrekking tot grondonderzoeken, om maar twee op te noemen. Vervolgens voert een team van experts de opname van een gebouw uit, waarbij specifieke gebouwgegevens worden opgenomen en eventuele wijzigingen of schades worden ook gerapporteerd. In Bijlage A van de NPR 9998 is er een voorbeeld gegeven voor een dergelijke inspectieprotocol, met aandacht voor de constructieve opbouw; de compositie van het gebouw waarbij alle individuele onderdelen worden gedefinieerd; informatiebronnen; en een uitgebreide schadeopname.

Er zijn twee soorten opnames: een uitgebreide opname en een eenvoudige opname. Het is niet nodig om alle gebouwen uitgebreid op te nemen. Sommige gebouwen lijken op elkaar. Als er bij een aantal van dezelfde gebouwen al uitgebreid opname is gedaan, dan is het voldoende om een eenvoudige opname te doen bij andere soortgelijke gebouwen. De resultaten van de uitgebreide opname worden dan bij de andere gebouwen gebruikt.[50]

SodM heeft in het kader van dit onderzoek naast de 25 beoordelingen ook resultaten van twee opnames gezien. Beide bevatten archieftekeningen van het gebouw (gevelaanzichten, plattegronden en funderingsplan), foto's genomen tijdens de opname, en een (eenvoudige) lijst met de zogeheten Building Knowledge Checklist ontwikkeld door NCG, waar er aangeven wordt wat de beschikbare data is van het project; de bekende en onbekende gebouwgegevens; de aannames die worden gemaakt tijdens een opname; en het kennisniveau per gebouwelement waarmee een 'Confidence Factor' wordt toegewezen om de aanname per constructie-elementeigenschap te verminderen, verwijzend naar de sterkte en stijfheid van materialen van deze constructie-elementen. Deze gegevens zullen vervolgens aan uitvoerende ingenieursbureaus worden gegeven

[50] https://www.nationaalcoordinatorgroningen.nl/onderwerpen/opname.

die verantwoordelijk zijn voor zowel de structurele verificatie als de daaropvolgende versterkingsadvies.

SodM merkt op dat de ingenieursoordeel afhankelijk is van de gegevens die vermeld zijn in de Building Knowledge Checklist, en de volledigheid hiervan. Zeker naarmate de checklist minder volledig is ingevuld, is het belangrijk dat de inspecteurs de juiste opleiding en ervaring hebben om een oordeel hierop te kunnen geven.

Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC)

Na de eerste jaren van berekeningen werden er discrepanties opgemerkt tussen de door het ingenieursbureau gemaakte aannames en besluiten voor het modelleren van de individuele gebouwen. Als gevolg hiervan, maakte Centrum Veilig Wonen (CVW) de handleiding Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC)[51] voor uitvoerende ingenieursbureaus om ze te begeleiden tijdens het proces voor wat betreft het maken van uniforme seismische beoordelingen voor gebouwen en constructies in de regio Groningen, conform de NPR 9998. Hiermee hoopte CVW dat een meer geharmoniseerde aanpak door verschillende partijen zou worden gebruikt.

Het ABSC document begeleidt ingenieurs bij het toepassen, interpreteren en verduidelijken van de NPR 9998 om redelijke beslissingen en aannames te maken in lijn met de denkwijze van de NPR 9998. Het document is bedoeld om samen met de NPR 9998 gelezen en toegepast te worden en is daarom opgezet om zoveel mogelijk direct te corresponderen met de hoofdstukken, secties en nummering van de NPR 9998.

Het ABSC biedt een beslissingskader over hoe technische aannames moeten worden gemaakt en geïmplementeerd wanneer de vereiste input, oftewel de invoergegevens onvoldoende, dubbelzinnig of niet beschikbaar is. De ABSC wordt sinds 1 januari 2019 gebruikt voor de versterkingsadviezen. Het ABSC is nu overgenomen door de NCG. Het is de bedoeling dat de ABSC regelmatig bijgewerkt wordt en dat het document aangepast wordt op basis van de vereisten van de uitvoerende ingenieursbureaus en/of consultants die voor NCG werken. SodM heeft geen inzicht hoe de kwaliteit en toepassing van dit document wordt geborgd.

Structurele verificatie

Het seismische gedrag van bestaande gebouwen wordt getoetst uitgaande van het responsspectrum of tijdreeksvoorstellingen (piekgrondversnelling, PGA) van de webtool van NPR 9998:2018. Als er gekozen wordt om de berekeningen te maken met computermodellen, dan kan men gebruik maken van verschillende rekensoftware. De gebruikte softwarepakketten hebben elk hun specifieke voorwaarden en beperkingen, waarbij het soms niet mogelijk is om uit te gaan van alleen één programma per project. Van de geanalyseerde VA's merkt SodM op dat ingenieursbureaus gebruik maken van één of twee structurele analyse methoden voor de berekening en verificatie van de aardbevingsbestendigheid van een gebouw. Zo wordt er bijvoorbeeld bij een gebouw NLPO analyse gebruikt voor de bepaling van in-het-vlak gedrag en een NLKA analyse voor uit-het-vlak gedrag, of alleen NLTH analyse voor alle bepalingen.

Sommige rekensoftware zijn ook in staat om meer complexe en nauwkeurige berekeningen te maken, zoals NLTH-analyse. Omdat deze analyses het gebouw nauwkeuriger kunnen omschrijven zijn er minder conservatieve aannames nodig. Deze methodes vragen echter per object om een groot aantal simulaties en is daarom tijdrovend en daardoor duur. Er ontstaat hiermee een afweging tussen de snelheid van beoordelen versus de aard van de maatregelen die getroffen moeten worden. Immers, een meer gedetailleerde beoordeling leidt over het algemeen tot lichtere versterkingsmaatregelen maar kost significant meer tijd ten opzichte van een minder gedetailleerde analysemethode.

Bovendien, het ABSC stelt ook eisen aan een vorm van berekeningscontrole die uitgevoerd moet worden tijdens het gebruiken van specifieke berekeningsmethoden. Sectie "4.3.8 NLTH: beperkingen" van het ABSC schrijft voor dat gevoeligheidsanalyses moeten worden uitgevoerd totdat voldoende vertrouwen is verkregen in het eindresultaat. Bewijs van deze analyses moeten

[51] ABSC-NPR2018, Applicatiedocument beoordeling Seismische Capaciteit, CVW,doc.nr.: CVW-ABSC-NPR2018-UK, Version 1.0, November 29, 2018.

deel uitmaken van de eindrapportage in de VA's. SodM heeft dergelijke bewijzen gezien in slechts drie van de elf berekeningen met NLTH.

Versterkingsadviezen

De bovengenoemde activiteiten worden per individueel gebouw vastgelegd in versterkingsadviezen (VA's). Hierin is ook opgenomen welke versterkingsmaatregelen voor het gebouw genomen moeten worden. SodM merkt op dat de VA's en bijbehorende versterkingsmaatregelen op basis van de NPR 9998 afhankelijk zijn van de gemaakte aannames, de keuze van modelleringsprogramma en de berekeningsmethode, en de interpretatie van de richtlijn. De analyse van de 25 versterkingsadviezen door SodM laat een aantal aandachtspunten zien.

SodM merkt op dat in sommige VA's eerst het model gemaakt is en pas daarna inspectie heeft plaatsgevonden. Dit werd ook expliciet genoemd in de VA's. Het gevolg hiervan is dat de ingenieur die het model en de berekening moet maken gedwongen is om aannames te maken op basis van alleen archiefdocumenten. Het doel van de opnames is om te bepalen wat de huidige staat is van een gebouw, zodat dit vervolgens zo goed mogelijk gemodelleerd kan worden. Zo zag SodM dat er in twee van de vijfentwintig VA's een verkeerde aanname werd gemaakt over de type en hoeveelheid funderingspalen onder een woning. Na inspectie werden de nodige correcties aangebracht en de berekeningen herzien. Dit laat het belang zien van de opnames en de volledigheid hiervan.

Nuttige en onnodig conservatisme:
SodM merkt ook op dat ingenieurs vaak een conservatieve benadering hanteren om tot een acceptabele snelheid van de beoordeling te kunnen komen over de aardbevingsbestendigheid van individuele gebouwen. Dit vindt vooral plaats bij de aanname van materiaaleigenschappen. Hierbij moet de ingenieur oordelen over bijvoorbeeld de aanwezigheid van houtrot, corrosie van stalen verbindingen of het loslaten van de voegen tussen het metselwerk. Ook wordt er een aanname gedaan over de sterkte van de materiaaleigenschappen. Hiervoor is het eigenlijk wenselijk om in-situ toetsen uit te voeren, of gegevens uit lab-toetsen. Maar dit kan niet op grote schaal uitgevoerd worden en is daarom alleen aan te raden om dit bij bijzondere of kwetsbare gebouwen te doen, bijvoorbeeld zoals in het geval van historische gebouwen. In één geval van de vijfentwintig gevallen zien we dat de materiaaleigenschappen daadwerkelijk bepaald zijn met data uit lab-toetsen (dit was inderdaad een rijksmonument). In alle andere gevallen wordt uitgegaan van gemiddelde waarden van de materiaaleigenschappen (ABSC document, Bijlage F4 van NPR 9998) die in sommige gevallen nog gecorrigeerd worden met een partiële factor, in geval van oude of beschadigde materialen.

Naast het moeten kiezen van gemiddelde waarden voor de materiaaleigenschappen (of dergelijke aannames), ziet SodM dat er ook een oordeel moet worden gemaakt met betrekking tot de aanwezigheid en/of kwaliteit van de onderlinge verbinding van de wanden (vertanding); de aanwezigheid van spouwankers (en of deze gecorrodeerd zijn); en de kwaliteit van de verbindingen tussen wanden onderling of tussen wanden met vloeren. Dit zijn details die opgenomen moeten worden tijdens een inspectie. Zo niet, dan moet de ingenieur aannames hierover maken. Bovendien zijn deze aannames ook direct gerelateerd aan de rekensoftware die gebruikt wordt, waarbij soms de eis wordt gesteld zodat er verder gemodelleerd kan worden (randvoorwaarde). Zo wordt er gebruikt gemaakt van een software berekening die aanneemt dat de ingevoerde wanden momentvast (stijf of vormvast) met elkaar gebonden zijn. Als uit inspectie blijkt dat de wanden niet onderling verbonden zijn, dan moet er een verbinding aangebracht worden. Anderzijds kunnen ingenieurs er ook voor kiezen om een model te maken met de aanname dat de verbindingen helemaal niet aanwezig zijn, of ervan uitgaan dat de aanwezige verbindingen ineffectief zijn.

Beperkingen van de gehanteerde modelleringsmethode:

SodM merkt voorts op dat sommige eigenschappen van het gebouw niet gemodelleerd kunnen worden door technische tekortkoming van het programma of als gevolg van vereenvoudiging van het model. Hierdoor worden benaderingen aangenomen die vraagtekens oproepen. Voorbeelden hiervan zijn in het geval van vervormingen van houtenbalken, hoe er om wordt gegaan met verbouwingen, invloed van verschillende bouwfasen van een woning, en het effect van omliggende gebouwen die samen één seismische eenheid kunnen vormen (interactie tijdens seismische gebeurtenis).

Kritische terugblik op de berekeningen:

Tenslotte, bij de meerderheid van de VA's mist er een kritische terugblik op het gemodelleerde gebouw door de verantwoordelijke ingenieur. Het is opvallend dat in de door SodM onderzochte VA's de uiteindelijke seismische versterkingsmaatregelen gebaseerd zijn op een versterking van alle bezwijkende (constructieve en niet-constructieve) elementen. Dit is een conservatieve aanpak omdat waarschijnlijk bij het versterken van een deel van de bezwijkende elementen de andere elementen ook niet meer zouden bezwijken. Dit zou bepaald kunnen worden door incrementeel elementen te versterken. In vrijwel alle geanalyseerde VA's wordt deze incrementele benadering niet gehanteerd voordat daadwerkelijk alle bezwijkende elementen worden versterkt.

Het is belangrijk dat het model niet alleen getoetst wordt met de voorgestelde versterkingsmaatregel, maar dat de uitvoerende ingenieursbureaus ook de uitkomsten evalueren en onderzoeken waar een reductie van het pakket aan maatregelen mogelijk is om tot een optimaal resultaat te komen. Dit proces vereist één of meerdere herhalingen. Hierdoor zou de beoordelingstijd kunnen oplopen, maar de tijd die nodig is voor het daadwerkelijk versterken vervolgens kunnen reduceren. Tevens zouden er minder ingrijpende versterkingsmaatregelen uit kunnen komen. Minder ingrijpende versterkingsmaatregelen zouden minder invloed op het woongenot kunnen hebben.

Bovendien, in het geval waar de expertise en de technische beoordeling van de ingenieur in strijd is met de uitkomsten van de structurele criteria zoals vermeld in de bouwnorm NPR 9998, dan kan de ingenieur afwijken van de richtlijn. Dit moet onderbouwd zijn met numerieke modellen (resultaten uit uitgebreide en verfijnde berekeningsmethoden) en de technische beoordeling moet gerapporteerd worden (dit zou onderdeel moeten zijn van de VA). Ten slotte, moet deze (afwijkende) ontwerpkeuze herzien en beoordeeld worden door een derde (controlerende) partij.

Aandachtspunten bij de toepassing van NPR 9998

Op basis van de uitgewerkte VA's is het (nog) niet mogelijk om een oordeel te geven over de prioritering tijdens de uitvoering van de versterkingsopgave. Met de VA's kan er nog geen graad van urgentie worden aangegeven, er kan alleen getoetst worden of een gebouw wel of niet versterkt moet worden. In andere landen, zoals Italië, wordt een *risicoklasse* toegeschreven aan gebouwen op basis van het jaarlijkse economische verlies als gevolg van schade aan gebouwen, en er wordt een *veiligheidsindex* berekend voor gebouwen die uitdrukt wat de verhouding is tussen de gebouwcapaciteit in termen van PGA en de optredende PGA voor de locatie van dat gebouw zoals gespecificeerd in de nationale norm. SodM merkt op dat een veiligheidsindex een bijdrage zou kunnen leveren aan de prioriteringsmechanisme voor de uitvoering van de versterkingsoperatie. Dit is een element dat gekoppeld zou kunnen worden van het versterkingsadvies. SodM raadt aan dat er gekeken wordt hoe dit concept vertaald kan worden en waarde kan bieden voor de uitvoering van de versterkingsoperatie in Groningen.

5.4 Conclusie

De HRA en NPR 9998 worden allebei toegepast voor de bepaling van de seismische risico's en versterkingsopgave in Groningen. De twee methoden worden ingezet om op verschillende schalen te reageren en met een ander detailniveau te kijken naar de versterkingsopgave (individueel gebouw versus groep gebouwen).

De NPR 9998 richt zich specifiek op het ontwerpen en/of aanpassen van individuele gebouwen. Momenteel worden de bestaande gebouwen in Groningen gemodelleerd, en worden ze getoetst of ze aan de structurele criteria voldoen van de NPR 9998. Als ze niet hieraan voldoen, dan bepaalt de uitvoerende ingenieursbureau voor een passende versterkingsmaatregel zodat deze wel aan de norm voldoet. Dit wordt vastgelegd in een versterkingsadvies (VA) en kan hiermee de verwachte seismische prestatie van een gebouw vastgesteld worden.

De NPR 9998 is een richtlijn die als leidraad moet worden gebruikt, maar het ligt aan de ingenieur om een beoordeling te maken *als* er wordt versterkt, *hoe* er wordt versterkt en *in welke mate* er wordt versterkt. In het geval waar de expertise en de technische beoordeling van de ingenieur in strijd is met de uitkomsten van de structurele criteria zoals vermeld in de bouwnorm NPR 9998,

dan kan de ingenieur afwijken van de richtlijn. Dit moet onderbouwd zijn met numerieke modellen en de technische beoordeling moet gerapporteerd worden.

Anders dan de NPR 9998, is de HRA juist gericht op de vaststelling van de risicoanalyse van een grote populatie van bestaande gebouwen. Met de HRA is ervoor gekozen om de prioritering te laten plaatsvinden en was het mogelijk om 26.000 gebouwen onder te verdelen in drie categorieën: gebouwen met een verhoogd risicoprofiel (1), een licht verhoogd risicoprofiel (2), en een normaal risicoprofiel (3).

6. Conclusie en aanbevelingen

6.1 Conclusie SodM over vergelijking HRA 2018 en NPR 9998:2018

Het HRA-model en NPR 9998:2018 zijn twee methodieken met verschillende doelen, aanpakken en aannames. De verschillen tussen NPR 9998:2018 en de HRA 2018 van de NAM zijn hoofdzakelijk de volgende:

i. De NPR 9998:2018 is een bouwcode die aangeeft wat de *verwachte prestatie* is van een gebouw gedurende een bepaalde seismische belasting. Het eindresultaat is gerelateerd aan de structurele veiligheid van dat gebouw.
ii. De HRA 2018 is een probabilistische risicoanalyse. Het resultaat van de HRA is een risico-inschatting op het niveau van gebouwen en is daarmee ook gerelateerd op de personen.
iii. De HRA wordt gebruikt voor de *risico-evaluatie* van alle gebouwen in het gebied, terwijl de NPR 9998 wordt gebruikt voor de *veiligheidsevaluatie* van individuele gebouwen op basis van een maximale verwachte aardbeving met een terugkeerperiode van T = 2475 jaar. De risicoanalyse van de HRA is bedoeld op grootschalig niveau, terwijl de NPR 9998 zich richt op individuele gebouwen.

Onderstaande tabel brengt de verschillen in kaart.

	HRA 2018	**NPR 9998: 2018**
Wat voor middel is het?	Risicoanalyse	Beoordeling van veiligheid van een gebouw op basis van een praktijkrichtlijn
Oorspronkelijk doel	Berekening veiligheidsrisico	Bepaling van de sterkte van bouwconstructies onder aardbevingsbelastingen
Detailniveau informatie	Groot gebied, met meer dan 150.000 gebouwen, opgedeeld in typologieën	Individueel gebouw met bekende constructie en detaillering
Aannames	Best beschikbare theoretische kennis inclusief berekening van een deel van de grote onzekerheden	Conservatieve aannames in de praktijk om tot acceptabele snelheid in de uitvoering te komen; grote mate van variëteit in toepassing
Uitkomst	Aantal gebouwen dat het jaarlijkse gemiddelde Local Personal Risk (LPR) voor elk gasjaar overschrijdt	Voldoet het gebouw aan structureel criteria in de bouwnorm NPR 9998
Toetsing aan de veiligheidsnorm	Volledig probabilistisch	Semi-probabilistisch

Samenvattend, hoewel de HRA en de NPR 9998 beide gericht zijn op seismische structurele veiligheid, richt de laatste zich op het ontwerpen en/of aanpassen van afzonderlijke constructies. De HRA is juist gericht op de risicoanalyse van een grote hoeveelheid van bestaande gebouwen. Dit fundamentele verschil resulteert in verschillende modelaannames op verschillende detailniveau, waardoor de resultaten van het ontwerp voor een specifiek gebouw niet direct in overeenstemming kan worden gebracht met de resultaten van de HRA-analyse, en vice versa.

Zowel HRA 2018 als NPR 9998:2018 toetsen of een gebouw aan de wettelijke veiligheidsnorm voldoet met een IR kleiner dan 10^{-5} per jaar, maar geen van beide berekent (of verifieert) dit rechtstreeks. De HRA berekent wel het risico voor een gebouw zodat het met de veiligheidsnorm vergeleken kan worden, maar er worden geen specifieke gebouweigenschappen meegenomen waardoor de vergelijking niet voor een specifiek gebouw geldt. De NPR 9998 daarentegen, toetst wel voor een specifiek individueel gebouw, maar berekent geen risico en er kan dus niet direct met een veiligheidsnorm vergeleken worden. Kort samengevat: de ene methode (NPR 9998) berekent gebouw-specifiek maar vergelijkt niet rechtsreeks, de andere (HRA) vergelijkt rechtstreeks maar berekent niet gebouw-specifiek.

6.2 Advies over de verbetering van (het gebruik van) de HRA:2018 en de NPR 9998:2018

i. Geef het verbeteren van de NPR 9998 de hoogste prioriteit. Daarmee is een grotere verbetering te bewerkstelligen dan met verbetering van de HRA. De HRA is al verder ontwikkeld dan de NPR 9998 ten aanzien van de toegepaste technische kennis. Bovendien is de toepassing van de HRA, als methode voor de bepaling van de grootte en prioritering van de versterkingsopgave, niet meer nodig. Immers, de versterking is reeds vastgezet op 26.000 huizen waarvoor de prioritering reeds is bepaald en waarmee de orde-grootte voor de versterkingsoperatie is bepaald. Een verbetering aan de HRA-model zal hieraan naar verwachting geen verandering in brengen.

ii. Zorg dat de nieuwste wetenschappelijke inzichten in de NPR 9998 en de Webtool NPR 9998 verwerkt worden. Een nieuwe versie waarin tekortkomingen die leiden tot onnodig conservatisme worden verbeterd, leidt tot een snellere uitvoering van de versterkingsopgave. Er wordt dan immers geen tijd en capaciteit besteed aan versterkingsmaatregelen die voor de veiligheid niet nodig zijn. De verbetering voor de uit-het-vlak sterkte-eigenschappen van metselwerk die in juli 2020 wordt toegevoegd aan de NPR 9998 is daar een goed voorbeeld van.

iii. Kalibreer de NPR 9998 opnieuw met behulp van de laatste wetenschappelijke inzichten aan de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5}. Onderzoek daarbij of de huidige methode om de NPR 9998 te kalibreren aan de wettelijke veiligheidsnorm van 10^{-5} het beste manier is om te toetsen of gebouwen daadwerkelijk aan de veiligheidsnorm voldoen. Onderzoek ook of met de huidige stand van kennis deze kalibratiemethode passend is bij een afnemende seismische dreiging en voor de verschillende gebouwen(-typologien) in Groningen.

iv. Voor het berekenen van de constructieve veiligheid van gebouwen conform de NPR 9998 zijn de uitvoerende ingenieursbureaus afhankelijk van de beschikbare data uit de opnames van de individuele gebouwen. Om conservatieve aannames te minimaliseren is het belangrijk dat de opnames volledig zijn uitgewerkt. Hiervoor is het van belang dat de verantwoordelijke bouwkundige inspecteurs zodanig zijn opgeleid en de juiste ervaring hebben om een de juiste aannames te kunnen maken.

v. Bij het opstellen van de rekenmodellen in de VA's verwijzen uitvoerende ingenieursbureaus naar het Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC) voor het omgaan van onzekerheden bij het ontbreken van kennis of gegevens om zo tot acceptabele aannames te komen. Dit document wordt vrijwel door alle bureaus gebruikt bij de invoering van materiaaleigenschappen. Dit huidige document is zodanig opgesteld dat dit gelezen en toegepast wordt conform de NPR 9998:2018. SodM adviseert dat het ABSC document herzien wordt door een panel van experts, en dat dit document wordt bijgehouden met de laatste stand van kennis, en dat wijzigingen worden aangebracht zodra er een nieuwe versie van NPR 9998 beschikbaar is.

vi. Ontwikkel een gedragen proces waarmee de NPR 9998 en de Webtool NPR 9998 voldoende snel en op een navolgbare manier verbeterd kunnen worden. Periodieke verbeteringen van de NPR 9998 zorgt ervoor dat de meest recente inzichten zorgvuldig worden meegenomen door de ingenieursbureaus in het versterkingsproces.

vii. SodM merkt op dat hoewel de HRA geschikt is voor de prioritering van de opnames, deze niet leidend moet zijn voor de uitvoering van de VA's. De NPR 9998 levert een betere bijdrage aan een verstandige prioritering, waarmee de snelste veiligheid wordt bereikt, mits alle hierboven genoemde verbeteringen zijn doorgevoerd. SodM adviseert om de huidige informatie te beoordelen en om na te gaan of de ontwikkeling van bijvoorbeeld een veiligheidsindex (zoals vermeld in hoofdstuk 5.3) ook een bijdrage kan leveren aan een verstandige prioritering van de uitvoering van de versterking in Groningen.

viii. De HRA is niet meer nodig voor het bepalen van de omvang en de prioritering van de versterkingsopgave. Echter, het is en blijft belangrijk om de HRA de komende periode te blijven herzien. Deze berekeningen blijven belangrijk om de ontwikkelingen in de seismiciteit te kunnen duiden. Ook kan hiermee de verwachting getoetst worden dat de HRA tot geen veranderingen in de scope van de versterkingsopgave gaat leiden. Momenteel draagt NAM hier de verantwoordelijkheid voor en ziet SodM toe op de kwaliteit. Als in de toekomst de HRA in publieke handen genomen wordt door de minister, is het belangrijk dat de taken van de verschillende betrokken partijen duidelijk in de wet worden vastgelegd.

Afkortingenlijst

ACVG Adviescollege Veiligheid Groningen

CS Collapse State

DS Damage State

EDB Exposure database

EZK Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Eucentre European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering in Pavia, Italy

FEM Eindige-Elementenmethode

GMM Ground Motion Model

GMPE Ground Motion Prediction Equation

HRA Hazard and Risk Assessment

IGM Inspecteur-generaal der Mijnen

IP In-Het-Vlak (Engels: In plane)

IR Individueel risico

KEM Kennisprogramma Effecten Mijnbouw

KNMI Koninklijk Meteorologisch Instituut

LIR Lokaal Individueel Risico

LNEC National Laboratory for Civil Engineering in Lissabon, Portugal

MDOF Multiple Degree of Freedom

M_L Lokale Magnitude op de schaal van Richter

MRP Groningen Meet- en Regelprotocol

MRS Modale-Responsspectrum Berekening

NAM Nederlandse Aardolie Maatschappij

NCG Nationaal Coördinator Groningen

NEN Nederlands Normalisatie Instituut

NLPO Niet-Lineaire Push-Over Berekening

NLTH Niet-Lineaire Tijdsdomeinberekening

NPR Nationale Praktijk Richtlijn

OOP Uit-Het-Vlak (Engels: out-of-plane)

P10 de uitkomst in 10% van de berekeningen zit op of onder de verwachtingswaarde

P90 de uitkomst in 90% van de berekeningen zit op of onder de verwachtingswaarde

PHRA Probabilistic Hazard and Risk Analysis

PGA Maximale grondversnelling

PGV Maximale grondsnelheid

SODF Single Degree of Freedom

SodM Staatstoezicht op de Mijnen

TNO Nederlandse Organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek

TU Delft Technische Universiteit van Delft

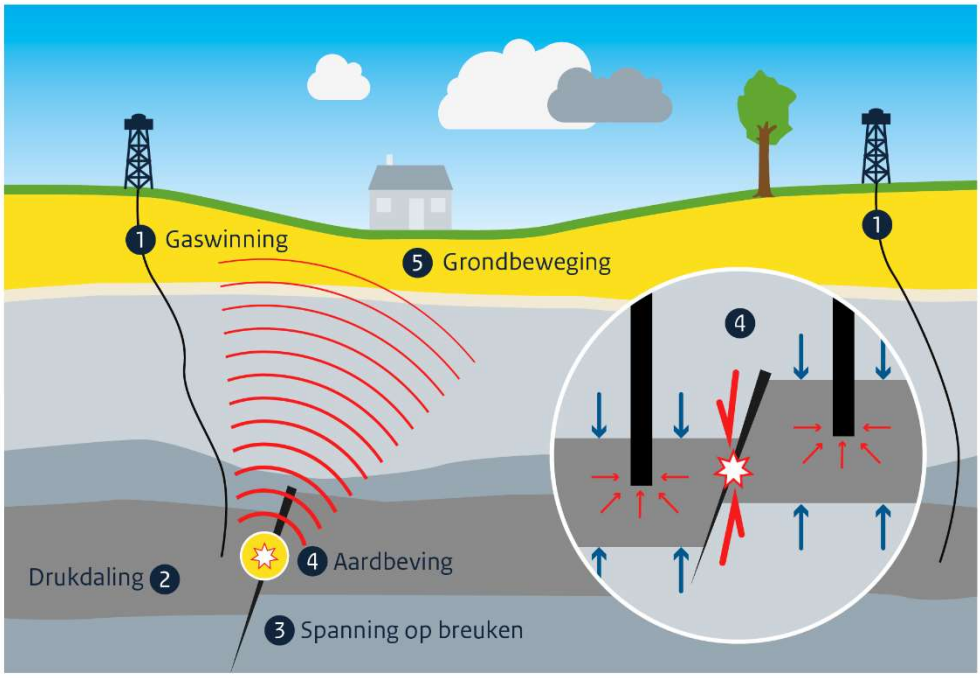
VA’s Versterkingsadviezen

Bijlage A: Ontstaan van aardbevingen door gaswinning en het effect op gebouwen

De gaswinning in Groningen veroorzaakt aardbevingen en daarmee schade en onveiligheid.

Ontstaan van aardbevingen

De gaswinning (❶; Figuur 9) zorgt voor daling van de reservoirgasdruk (poriëndruk,❷). Die daling veroorzaakt een verandering van de mechanische spanningen (stress) in de ondergrond en dus ook op bestaande breuken in de ondergrond ❸. Deze spanningsveranderingen kunnen leiden tot bevingen ❹ (lokale, abrupte verschuivingen van gesteente langs bestaande geologische breuken). De energie die vrijkomt bij de aardbeving verplaatst zich als golven naar het aardoppervlak waar ze grondbewegingen ❺ veroorzaken die vervolgens opgenomen worden door de gebouwen.



Figuur 9 Schematische uitleg over het ontstaan van aardbevingen door gaswinning.

Effect op gebouwen

De grondbeweging zorgt er voor dat een gebouw gaat bewegen. De kracht die op het gebouw wordt gezet heet ook wel (seismische) last. De horizontale last die op de gebouwen komt zorgt voor spanningen in de constructieve elementen van dat gebouw. Deze spanningen kan de schade veroorzaken. Er wordt onderscheid gemaakt in schade aan niet-structurele elementen (zoals het ontstaan van scheuren of het uitvallen van pleisterlagen) en schade aan structurele elementen. Bij grotere en ergere schade zoals het omvallen van een wand of de gedeeltelijke instorting van gebouwen, kunnen bewoners overlijden. Maar ook bij voor stabiliteit beperkte schade, zoals het omvallen van schoorstenen, kunnen mensen overlijden. Het is daarom cruciaal om de constructieve veiligheid van de gebouwen in Groningen vast te stellen, om zo ook de veiligheid van de bewoners te waarborgen.

Bijlage B: NPR 9998 - Nederlandse Praktijkrichtlijn voor aardbevingsbestendig bouwen

Als gevolg van aardbevingen n.a.v. gaswinning in het Groninger-veld ontstond een grote behoefte aan richtlijnen die van toepassing zijn bij het ontwerpen en toetsen van aardbevingsbestendige gebouwen. Op verzoek van de Nationaal Coördinator Groningen namens het ministerie van Economische zaken heeft NEN, samen met betrokken experts, de Nederlandse Praktijkrichtlijn NPR 9998 gepubliceerd.

NPR 9998 biedt opdrachtgevers, constructeurs en aannemers een (technisch) houvast bij nieuwbouw en bij het preventief versterken van gebouwen. Een rekenkundige beoordeling volgens de NPR geeft aan of een gebouw sterk genoeg is om de belasting van een aardbeving te kunnen weerstaan. NPR 9998, voor aardbevingsbestendige constructies, geeft richtlijnen om voor de volgende situaties te beoordelen of: 1) te bouwen gebouwen voldoende aardbevingsbestendig zijn; 2) bestaande gebouwen voldoende aardbevingsbestendig zijn; 3) bestaande gebouwen na versterken voldoende aardbevingsbestendig zijn.

Het toepassingsgebied van deze NPR is beperkt tot Noord-Oost Nederland voor zover daar geïnduceerde aardbevingen als gevolg van gaswinning in het Groninger gasveld optreden.

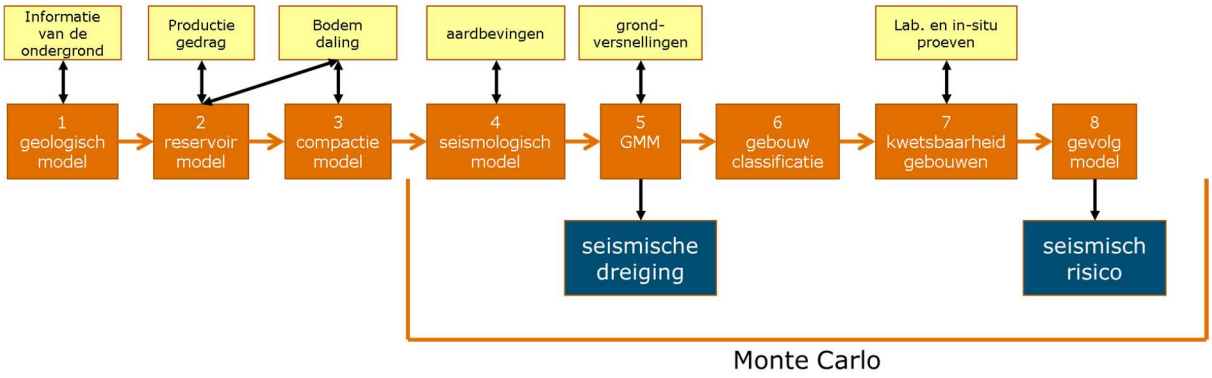
Met de publicatie van NPR 9998:2018 (nl), in november 2018, is NPR 9998:2017 Ontw. (nl) herzien op basis van de laatste stand der techniek. Sinds de vorige publicatie van de NPR in 2017 is er meer bekend over: de intensiteit van de aardbevingen en de invloed van de grond; de weerstand van gebouwen tegen een aardbeving; vallende objecten; en berekeningsmethoden.

De NPR 9998 is uitgebreide document dat onderverdeeld is in de volgende onderwerpen:

2. Prestatie-eisen en criteria voor beoordeling nieuwbouw, verbouw en afkeuren
3. Bodemcondities en aardbevingsbelastingen
4. Ontwerp, herontwerp en beoordeling van gebouwen
5. Specifieke regels voor betonconstructies
6. Specifieke regels voor staalconstructies
7. Specifieke regels voor staal-betonconstructies
8. Specifieke regels voor houtconstructies
9. Specifieke regels voor steenconstructies
10. Specifieke regels voor funderingen
11. Bijlage A (informatief) Inspectieprotocol voor het beoordelen van bestaande gebouwen
12. Bijlage B (informatief) Versterkingsmaatregelen voor bestaande gebouwen
13. Bijlage C (informatief) Toepassing van deze NPR voor grote aantallen gebouwen
14. Bijlage D (informatief) Bepaling van de verweking van zandgrond
15. Bijlage E (informatief) Controle van de verplaatsing van de fundering
16. Bijlage F (informatief) Toetsing van het constructieve gedrag aan de hand van niet-lineaire tijdsdomeinberekeningen
17. Bijlage G (informatief) Toetsing van het draagvermogen van bouwconstructies door een niet-lineaire statische (push-over-)berekening
18. Bijlage H (informatief) Uit-het-vlak-beoordeling van metselwerkwanden met behulp van de methode van een niet-lineaire kinematische berekening (NLKA)
19. Bijlage I (informatief) Seismisch ontwerp van niet-constructieve elementen met gebruikmaking van ASCE/SEI 7-16
20. Bijlage J (informatief) Vooraf berekende versus toegestane kans van bezwijken
21. Bijlage K (informatief) Beoordelen veiligheid van monumenten en noodzaak tot versterken

Bijlage C: HRA- model

Met het HRA-model kan de seismische dreiging en het risico als gevolg van de gaswinning in Groningen worden berekend. HRA staat voor Hazard and Risk Assessment. De Hazard and Risk Assessment is de uitkomst van acht opeenvolgende modellen. De output van het ene model, is input voor het volgende model. Deze keten van modellen is in staat om -weliswaar met grote onzekerheden – het risico te berekenen voor de gebouwen in Groningen.



Samengevat is de keten van modellen als volgt:

1. **Geologisch model**: dit is een statische geologische beschrijving van het Groninger-gasveld zoals structuur, gesteente-eigenschappen, locatie en grootte van breuken.
2. **Dynamisch reservoirmodel**: dit model beschrijft het stromen van het gas door het reservoir. Het geologisch model is een input voor dit model, net zoals de historische en verwachte productie in het veld. De resultaten van dit model zijn onder andere de drukverdeling en saturaties in het veld.
3. **Compactiemodel**: dit model beschrijft hoe het gesteente samengedrukt wordt door drukdaling in het reservoir als gevolg van gaswinning. De belangrijkste input voor dit model zijn de gesteente eigenschappen en de drukverdeling over tijd.
4. **Seismologisch model**: dit model berekent het aantal, de zwaarte en de locatie van de aardbevingen als gevolg van de opgegeven hoeveelheid te winnen gas. De belangrijkste input voor dit model is de uitkomst van het compactiemodel en het geologische model (vooral de breukstructuur). Het model bestaat uit twee hoofd stappen. De eerste stap is het voorspellen van de hoeveelheid aardbevingen per jaar samen met de verdeling van deze aardbevingen over het veld, waarbij het model aardbevingen met een magnitude groter als 1,5 voorspelt. De tweede stap is de verhouding tussen hoeveelheid lichte en zwaardere bevingen, de zogenaamde b-waarde. De uitkomst van het model is een voorspelling van de locatie en zwaarte van bevingen.
5. **Grondbewegingsmodel** of 'Ground Motion Model' (GMM): dit model vertaalt de energie en de verplaatsing tijdens een beving in de beweging aan het aardoppervlak, de zogenaamde grondsnelheid en grondversnelling. Dit model berekent de zogenaamde "opslingering".
   De input voor het model is de uitkomst van het seismologisch model tezamen de eigenschappen van de (ondiepe) ondergrond. De wisselende mechanische eigenschappen van de laatste 50m hebben grote invloed op de lokale verdeling van de grondversnelling.

De modellen 1 tot en met 5 geven samen de seismische dreiging weer.

6. **Classificatie van gebouwen** (ook wel de 'Exposure database' genoemd): Alle gebouwen boven en nabij het gasveld worden in kaart gebracht en op basis van hun kenmerken onderverdeeld in verschillende gebouwtypen. Als het onbekend is tot precies welke typologie een gebouw behoort krijgt het een kans toebedeeld. B.V. 40% typologie A, 40% typologie B en 20% typologie C. De gebouwendatabase is een statische database. Het ontvangt geen data vanuit de modellen 1-5. Het is wel een belangrijke input voor de modellen 7&8.
7. **Kwetsbaarheid van de gebouwen**: dit model berekent de kwetsbaarheid van de gebouwtypen in relatie tot de grondbewegingen. Dit bepaalt hoeveel schade er bij een bepaalde grondbeweging kan optreden en in hoeverre een gebouw kan instorten.

De kwetsbaarheidscurves zijn gebaseerd op o.a. laboratorium testen waar nagebouwde gebouwen of gebouwdelen op een triltafel zijn gezet, in-situ metingen in indexgebouwen en de daaruit voortkomende modellen.

8. **Gevolgmodel**: dit model beschrijft de kans dat een persoon komt te overlijden als een (gedeelte van een) gebouw instort.

Modellen 6 tot en met 8 berekenen op basis van de seismische dreiging, wat het te verwachten veiligheidsrisico is.

Voor de modellen 1 tot en met 3 wordt er maar één variant berekend op basis van de beste inschatting van de engineers. Het berekenen van de onzekerheidsmarge wordt gedaan met de Monte-Carlo methode over de modellen 4 tot en met 8.

Monte Carlo berekeningsmethode

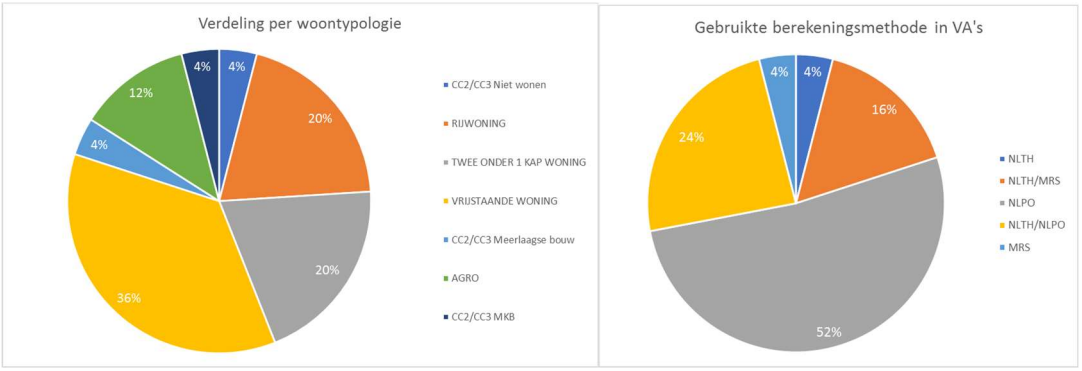
Dit is een methode waarbij de berekeningen meerdere keren worden herhaald. Bij elke berekening worden willekeurig andere waarden voor de onzekere parameters gebruikt. Het resultaat van deze methode is een bandbreedte van mogelijke uitkomsten met een kans, die aangeeft hoe waarschijnlijk deze oplossing is. Dit heet een waarschijnlijkheidsverdeling (in het Engels een Probability Density Curve). De gemiddelde waarde van deze verdeling wordt vaak de 'verwachtingswaarde' genoemd. Dit is de best mogelijke schatting voor de uitkomst van de berekening.
De waarde, waarbij de uitkomst in 90% van de berekeningen op of onder deze waarde ligt, wordt de 'P90' genoemd. De P90-waarde is geen 'worst-case' waarde. Indien bij de beoordeling wordt uitgegaan van de P90-waarde, is er alsnog een kans van 10% dat de echte waarde boven deze P90-waarde ligt.

Bijlage D: Inventarisatie van de gebruikte versterkingsadviezen

SodM heeft 25 versterkingsadviezen (VA's) bestudeerd die gemaakt zijn conform NPR 9998:2018. Voor de selectie van deze VA's waren er drie criteria's opgesteld om ervoor te zorgen dat alle mogelijke varianten aan bod kwamen omtrent (1) de ligging van de gebouwen binnen het Groningen-gasveld, (2) de gebruikte berekeningsmethode om te beoordelen of ene gebouw versterkt wordt en hoe dit wordt gedaan, en (3) de verschillende ingenieursbureaus die deze berekeningen en adviezen hebben uitgevoerd.

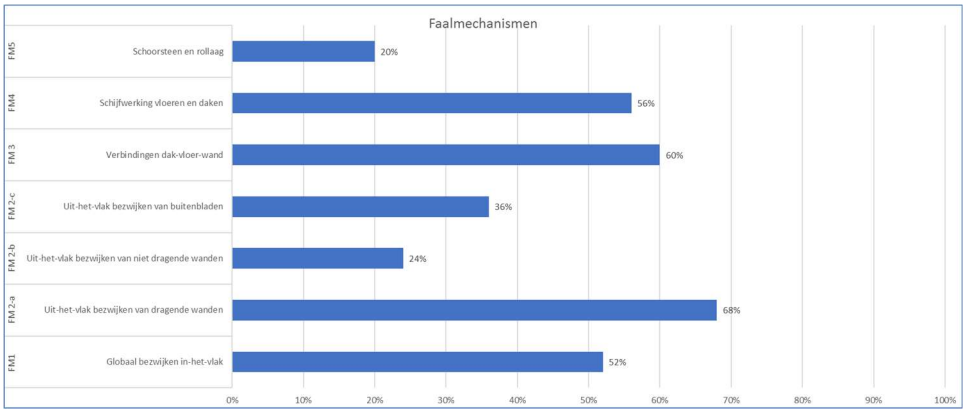
De verschillende woontypologieën die bestudeerd zijn in de VA's zijn vrijstaande woningen, rijwoningen, twee-onder-een kap woningen, meerlaagse bouw en agrarische woningen. Opvallend is dat bij de woontypologie rijtjeswoningen werden er meerdere adressen tegelijkertijd behandeld en de nodige variaties werden opgenomen in de totale beoordeling voor de versterkingsadviezen.

De gebruikte berekeningsmethoden in de VA's zijn; MRS, NLPO, NLTH, of een combinatie van twee methoden (NLTH samen met MRS, en NLPO en NLTH). In de meeste gevallen wordt er gebruik gemaakt van NLPO berekeningsmethode, gevolg door een combinatie tussen NLPO en NLTH.



Figuur 10 Overzicht verdeling van de woontypologieën (links) en de gebruikte berekeningsmethode (rechts) in de geanalyseerde VA's door SodM

De voorkomende faalmechanismen in de geanalyseerde VA's zijn in vijf hoofdgroepen in onderstaande figuur weergegeven: (1) globaal bezwijken in-het-vlak, (2) uit het vlak bezwijken van dragende wanden, niet-dragende wanden en van buitenbladen, (3) bezwijken van onderlinge verbindingen, (4) de schijfwerking van de daken en/of vloeren, (5) lokaal bezwijken van niet-structurele elementen van het gebouw. Op basis van deze faalmechanismen hebben de uitvoerende ingenieurs versterkingsmaatregelen genomen in de VA's.



Figuur 11. Overzicht met de voorkomende faalmechanismen uit de verschillende versterkingsadviezen (25x)

7 juli 2020

Staatstoezicht op de Mijnen
Henri Faasdreef 312 | Den Haag
T 070 379 84 00

info@sodm.nl
www.sodm.nl
@sodmnl