

Stieltjesweg 1
2628 CK DELFT
Postbus 155
2600 AD DELFT

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00

TNO-rapport

TNO 2020 R10628B

Typologiegebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Achtergrond bij de methode

Datum	2 september 2021
Auteur(s)	Dr.ir. C.P.W.Geurts, Ir. J.P. Pruiksmā, Prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen, Ir.ing. M. Steins, Dr.ir. M.R.A. van Vliet
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	73 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van EZK T.a.v. Mr. T. Smolders
Projectnaam	EZK vragen bovengronds: Typologie aanpak
Projectnummer	060.39973

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

Samenvatting

In opdracht van het ministerie van EZK heeft TNO een methode ontwikkeld voor het beoordelen van de veiligheid van gebouwen in Groningen met betrekking tot aardbevingen. Deze methode beoordeelt de veiligheid aan de hand van vooraf gedefinieerde gebouwtypologieën. Nadat een gebouw is toegedeeld aan een typologie kan snel worden bepaald of dat gebouw voldoende veilig is. Als dat niet het geval is zijn eventueel versterkingsmaatregelen nodig.

De beoordelingsmethode is gebaseerd op een onderverdeling van gebouwen in zogeheten typologieën. Een typologie is een verzameling gebouwen met dezelfde seismische kenmerken. De veiligheidsbeoordeling gebeurt aan de hand van de eigenschappen van deze typologieën en de methode ontleent daaraan de naam typologieaanpak. Dit rapport beschrijft de typologieaanpak.

De typologieaanpak omvat de volgende elementen:

- 1: Definitie en omschrijving van typologieën.
- 2: Een proces aan de hand waarvan een gebouw kan worden toegedeeld aan een typologie, of op basis waarvan kan worden vastgesteld dat het niet typologisch kan worden beschouwd.
- 3: Een risicoberekening op typologieniveau, rekening houdend met de seismische dreiging in Groningen, en rekening houdend met de sterkte eigenschappen en hun variaties binnen een typologie.
- 4: Presentatie van de risicoberekening in de vorm van een vlekkenkaart, waarmee per typologie direct kan worden bepaald waar deze afhankelijk van de locatie in de provincie Groningen wel of niet aan de veiligheidsnorm voldoet.

Punten 1 en 2 zijn uitgebreid omschreven in TNO rapport 2021 R11002 [TNO, 2021b] en worden in dit rapport alleen samengevat. Punten 3 en 4 worden wel uitgebreid besproken in voorliggend rapport.

In de risicoberekening wordt gebruik gemaakt van sterktemodellen voor de typologieën die adequaat de eigenschappen van de typologieën beschrijven, inclusief de binnen een typologie aanwezige variaties. Bij de definities en uitwerking van deze sterktemodellen is gebruik gemaakt van uit andere onderzoeken beschikbare, voor de aanpak geschikte, berekeningen alsmede in het kader van de ontwikkeling van de typologieaanpak door TU Delft uitgevoerde variatiestudies. In de vertaling van deze berekeningsresultaten naar de in de risicoberekening toegepaste modelinstellingen is een aantal stappen doorlopen door TNO en TU Delft. Naar aanleiding van de resultaten van TNO en TU Delft heeft het ACVG de methode beoordeeld en aanwijzingen geformuleerd ten behoeve van de implementatie van de methode in de praktijk.

De resultaten van de risicoberekeningen worden per typologie in de vorm van een kaart opgeleverd. In deze kaart zijn de locaties ingekleurd waar de typologie niet aan de veiligheidsnorm voldoet. Deze kaarten worden de vlekkenkaarten genoemd.

De uitwerking van de eigenschappen en de gebruikte modelinstellingen voor de beoordeling van de typologieën zijn beschreven in aanvullende rapportages, die specifiek zijn voor de betreffende typologieën.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Afbakening	4
1.2	Ontwikkeling van de typologie gebaseerde beoordeling	4
1.3	Validatie van de typologieaanpak door ACVG	5
1.4	Gebruik van de typologie-gebaseerde beoordeling in de praktijk	6
1.5	NPR 9998 en risicoberekeningen	6
1.6	Leeswijzer	7
2	Berekening van aardbevingsrisico's	9
2.1	Algemeen	9
2.2	Typologiegebaseerd beoordelen	9
2.3	Risicomiddeling	10
3	Typologieaanpak in de praktijk	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Stappenplan voor toepassing in de praktijk	13
3.3	Voorbeeld werking in de praktijk	14
4	Uitgangspunten voor de beoordeling	16
4.1	Seismische dreiging ten behoeve van risicoberekening	17
4.2	Kwetsbaarheidsmodellen	17
4.3	Gevolgmodel en risicoberekening	22
5	Implementatie in de praktijk	24
5.1	Inleiding	24
5.2	ACVG adviezen en implementatie	24
6	Referenties	26
7	Ondertekening	30

Bijlage(n)

- A Omschrijving TNO modelketen en keuze input scenario's
- B Achtergronden bij backbone curves
- C Achtergronden kwetsbaarheidskrommen
- D Achtergronden modelonzekerheden
- E Achtergronden gevolgmodel

1 Inleiding

De gaswinning in Groningen leidt tot het ontstaan van ondiepe aardbevingen. Hoewel deze aardbevingen relatief licht zijn (in termen van magnitudes op de Richterschaal), zijn de effecten aan het aardoppervlak door de relatief ondiepe locatie (3 km) van het hypocentrum aanzienlijk. Er is een grote opgave om het veiligheidsniveau voor de inwoners van Groningen te borgen. Hiertoe moet de veiligheid van de gebouwen waarin de bewoners een groot deel van de tijd verblijven, worden gewaarborgd.

De afgelopen jaren is veel onderzoek verricht naar de beoordeling van de veiligheid van de bestaande bouwvoorraad in Groningen. In NEN verband is NPR 9998 ontwikkeld, op basis waarvan ingenieursbureaus gebouwen kunnen doorrekenen en beoordelen op hun weerstand tegen aardbevingen [NEN, 2020]. Deze NPR 9998 wordt ingezet om gebouwen individueel te modelleren, door te rekenen en te besluiten of versterkingsmaatregelen nodig zijn.

Een dergelijk proces van berekeningen per gebouw kost veel tijd om binnen afzienbare tijd de voorliggende opgave te kunnen behandelen en daar waar nodig snel tot voldoende versterkingen te komen. Er is dan ook behoefte aan snelheid. Deze kan worden bereikt als de beoordeling en de versterking op typologie- in plaats van individueel gebouwniveau wordt uitgevoerd.

In dit rapport wordt een uniforme aanpak beschreven voor de beoordeling van de gebouwen in Groningen. Deze aanpak is erop gebaseerd dat gebouwen worden ingedeeld in een typologie na een individuele bouwkundige opname van gebouwenkenmerken en eventueel aanwezige schade. Per typologie worden de seismische kenmerken bepaald, rekening houdend met de variaties tussen gebouwen binnen die typologie. Op basis van deze kenmerken kan snel voor een gehele typologie worden bepaald of deze voldoet aan de norm. De norm die bij de veiligheidsbeoordeling wordt gehanteerd is de Meijdam norm (het Individueel Risico per jaar moet kleiner zijn dan 10^{-5}) [Meijdam, 2015].

1.1 Afbakening

Dit rapport beschrijft de beoordeling van gebouwen met een verblijfsfunctie, ofwel gebouwen bedoeld voor het verblijf van personen, zoals wonen, werken, kantoor of zorg. De beoordeling van gebouwen en constructies met andere functies wordt niet uitgewerkt in deze rapportage.

1.2 Ontwikkeling van de typologie gebaseerde beoordeling

De typologie gebaseerde beoordeling bestaat uit de volgende elementen:

1. De bouwtypologieën zijn gedefinieerd. Uitgangspunt voor de bouwtypologieën is dat gebouwen die tot dezelfde typologie behoren, vergelijkbare seismisch-constructieve eigenschappen bezitten. De omschrijving van deze bouwtypologieën is in [TNO, 2021b] gegeven.
2. Aan de hand van een bouwkundige opname kan bepaald worden of een gebouw tot een van de gekozen typologieën gerekend mag worden. Deze opname wordt zodanig opgezet dat deze snel kan worden uitgevoerd zonder

- dat (delen) van het gebouw worden beschadigd om eigenschappen van constructieonderdelen (zoals verbindingen) vast te stellen.
3. Voor elk van de gebouwtypologieën zijn sterktemodellen ontwikkeld. Deze sterktemodellen zijn probabilistisch van aard: ze beschrijven de kans op bezwijken als functie van de aardbevingsbelasting. Bij het opstellen van de sterktemodellen is rekening gehouden met (de onzekerheid door) de variaties tussen gebouwen die tot dezelfde typologie behoren. Hoe hiermee wordt omgegaan is nader uitgewerkt in hoofdstuk 4. Deze variaties betreffen ook de onzekerheden die samenhangen met het gekozen inspectieniveau. In de toets aan de veiligheidsnorm (element 4) worden dus alle verwachte onzekerheden meegenomen. De sterktemodellen worden gebruikt in samenhang met een gevolgmodel, wat per typologie beschrijft wat de kans is op overlijden van een persoon als de constructie bezwijkt.
 4. Voor elke typologie wordt met behulp van deze sterkte- en gevolgmodellen vastgesteld of, en waar, deze typologie wel of niet voldoet aan de veiligheidsnorm. De risicoberekening wordt uitgevoerd met behulp van de TNO modelketen en wordt aangesloten bij de NPR Webtool [NEN, 2021]. Dit wordt per typologie uitgewerkt voor het actuele scenario voor de (afbouw van de) gaswinning. De uitkomst wordt in de vorm van een vlekkenkaart weergegeven, waar per locatie met een kleur is aangegeven waar de betreffende typologie niet voldoet. Een beoordeling op basis van andere scenario's is eenvoudig door te voeren zonder dat daarvoor uitgebreide additionele berekeningen nodig zijn.

In dit rapport worden de relevante achtergronden bij de elementen 3 en 4 beschreven. De toepassing van de typologieaanpak in de praktijk wordt beschreven en de wijze van validatie van de aanpak en hoe deze wordt geïmplementeerd in de praktijk, is gegeven. De beschrijving van de typologieën en de wijze van toedeling van een gebouw aan een typologie (elementen 1 en 2) zijn in het rapport over toedelingcriteria beschreven [TNO, 2021b].

De berekeningen en resulterende uitkomsten zijn typologiespecifiek en worden ingevuld in aanvullende rapportages voor de betreffende typologieën.

Voor typologieën waarvan verwacht wordt dat het risico te groot is in sommige gebieden in Groningen, moet worden nagegaan of en in hoeverre versterkingsmaatregelen noodzakelijk zijn. Deze stap is door TNO niet uitgewerkt in deze rapportage.

1.3 Validatie van de typologieaanpak door ACVG

De typologieaanpak is gebaseerd op beschikbare informatie en de kennis en inzichten die door TNO en TU Delft zijn ontwikkeld. Voordat de resultaten van de aanpak in de praktijk worden toegepast, zijn deze ter validatie voorgelegd aan het Adviescollege Veiligheid Groningen (ACVG). Dit college adviseert de ministers van BZK en EZK over de veiligheid van de inwoners van Groningen. Tijdens de ontwikkeling van de typologieaanpak heeft ACVG geadviseerd met betrekking tot de op dat moment voorliggende resultaten [ACVG, 2020a en ACVG, 2020b]. Deze adviezen zijn gepubliceerd via de website www.adviescollegeveiligheidgroningen.nl. In hoofdstuk 5 van dit rapport wordt ingegaan op de door de ACVG gevraagde uit te voeren controles en wordt het proces naar implementatie van de typologieaanpak weergegeven.

De consequenties van die keuzes zijn eveneens in de typologie specifieke rapporten uitgewerkt.

1.4 Gebruik van de typologie-gebaseerde beoordeling in de praktijk

De uitkomst van de typologiegebaseerde beoordeling, in termen van "waar wordt, gegeven een typologie, niet voldaan aan de norm" zoals uitgewerkt in de vlekkenkaarten, wordt gebruikt als basis voor de beoordeling van gebouwen in de regio. Nadat een gebouw volgens de criteria uit [TNO, 2021b] is toegedeeld aan een typologie wordt op basis van de vlekkenkaart voor die typologie vastgesteld of het gebouw voldoet aan de Meijdam norm. Indien het gebouw voldoet zijn geen versterkingsmaatregelen nodig. Indien het gebouw niet voldoet moet worden nagegaan of en in hoeverre versterkingsmaatregelen noodzakelijk zijn.

1.5 NPR 9998 en risicoberekeningen

Voor de beoordeling van de weerstand van gebouwen in Groningen is door NEN de Nationale Praktijkrichtlijn NPR 9998 ontwikkeld. Van deze Nationale Praktijk Richtlijn is in 2015 de eerste versie uitgekomen. Thans is NPR 9998:2020 [NEN, 2020] van toepassing. Deze NPR 9998 geeft eisen en bepalingsmethoden voor het ontwerp en de toetsing van constructies op seismische belasting in Groningen. Artikel 2.3.3 van NPR 9998 formuleert de volgende eis:

Het ontwerp van nieuw te bouwen dan wel te verbouwen gebouwen, alsmede de beoordeling van bestaande gebouwen, moet zodanig zijn dat aan de eis met betrekking tot het voorkomen van lokale en voortschrijdende instorting (grenstoestanden NC), en voor zover van toepassing de grenstoestanden SD en DL, met een voldoende mate van betrouwbaarheid is voldaan.

OPMERKING: Aan deze eis is voldaan wanneer de betrouwbaarheid van het constructieve (sub)systeem en constructieve elementen zodanig is dat het totale individuele risico van 10^{-5} niet wordt overschreden.

De verificatie van de betrouwbaarheid mag zijn uitgevoerd op basis van een volledige probabilistische of een semiprobabilistische benadering. Deze NPR (met uitzondering van bijlage F) is gebaseerd op een semiprobabilistische benadering. Een volledig probabilistische benadering moet voldoen aan 3.5(5) van NEN-EN 1990.

NPR 9998 verwijst hiermee voor de eis expliciet naar de Meijdam norm voor het individueel risico van 10^{-5} . Voor de verificatie wordt zowel een probabilistische als semiprobabilistische benadering aangewezen. De semiprobabilistische benadering is een door constructeurs gebruikte wijze van toetsing van de constructieve veiligheid: Een belasting met een gegeven kans op overschrijden (vaak gegeven in termen van herhalingstijd) wordt gedefinieerd, die de constructie moet kunnen weerstaan. Er worden bepalingsmethoden gegeven waarmee constructeurs kunnen toetsen of aan de gegeven belasting wordt voldaan.

Voor een scherpe toets van gebouwen is het mogelijk met een probabilistische aanpak te werken. Voor de grondslagen wordt in 3.5(5) van NEN-EN 1990 verwezen naar bijlage C.

Een probabilistische aanpak wil zeggen dat alle relevante eigenschappen als een stochast worden beschouwd en in de vorm van een verdelingsfunctie in de berekening worden meegenomen. Variaties van materiaal, verbindingen en constructie-eigenschappen dienen te worden meegenomen. Dat levert dan voor dat gebouw

een kansverdeling van de sterkte (in seismische berekeningen wordt daarvoor de kwetsbaarheidskromme gebruikt). Voor de belasting wordt eveneens een kansverdeling bepaald en het toepassen van beide kansverdelingen leidt tot een berekening van het risico.

Een probabilistische aanpak is zeer geschikt om per typologie uit te voeren. Bij een typologieaanpak worden de gebouwen ingedeeld volgens typologieën met binnen de typologie vergelijkbare relevante kenmerken voor het gedrag van de constructie. De variaties in eigenschappen binnen en tussen gebouwen worden per typologie probabilistisch in rekening gebracht. In de typologieaanpak worden deze in de risicoberekeningen verrekend in de kwetsbaarheidskromme per typologie.

Op deze wijze kan op basis van een beperkte rekeninspanning snel worden beoordeeld of een typologie voldoet aan de seismische belasting, waarbij wordt voldaan aan de uitgangspunten van de betrouwbaarheid conform NEN-EN 1990 en NPR 9998. Door toepassing van de eenduidige toekenningmethode van gebouwen aan een typologie zoals beschreven in [TNO, 2021b], kan de veiligheidsbeoordeling vervolgens snel worden uitgevoerd.

1.6 Leeswijzer

Dit rapport is te beschouwen als het hoofdrapport over de door TNO ontwikkelde typologieaanpak. Dit hoofdrapport bestaat uit 6 hoofdstukken en een reeks bijlagen. Daarnaast wordt verwezen naar een aantal onderliggende rapporten die in het kader van de ontwikkeling van de typologieaanpak zijn opgesteld.

In de bijlagen zijn de belangrijkste achtergronden en resultaten gegeven. Vanuit de bijlagen wordt verwezen naar achterliggende rapportages waarin meer gedetailleerde berekeningen, waaronder gevoeligheidsanalyses, zijn beschreven. Deze achterliggende rapporten geven de onderbouwing van de gemaakte keuzes die in het hoofdrapport met bijlagen zijn beschreven.

Hoofdstuk 2 geeft een algemene inleiding en achtergrond bij de uitgangspunten die zijn gebruikt voor de risicoberekeningen binnen de typologieaanpak.

Hoofdstuk 3 geeft stap voor stap weer hoe in de praktijk gewerkt wordt met de ontwikkelde typologie aanpak zoals in dit rapport is gepresenteerd.

Hoofdstuk 4 geeft de uitgangspunten voor de beoordeling in termen van de gebruikte modellen en presentatie van de vlekkenkaarten.

Hoofdstuk 5 geeft aan welke adviezen van ACVG zijn verwerkt in de typologieaanpak, en hoe de typologieaanpak in de praktijk is geïmplementeerd.

Bijlage A geeft de achtergrond bij de uitgangspunten voor de beoordeling door middel van een beknopte beschrijving van de stappen die in de TNO modelketen worden doorlopen.

Bijlage B omschrijft de achtergronden bij het vaststellen van de backbone curves die gebruikt worden om de sterktemodellen per typologie af te leiden.

Bijlage C beschrijft de achtergronden bij de kwetsbaarheidskrommen.

Bijlage D geeft de achtergronden bij de keuzes voor de modelonzekerheden in de risicoberekening.

Bijlage E geeft de achtergronden bij de gebruikte gevolgsmodellen.

2 Berekening van aardbevingsrisico's

2.1 Algemeen

Voor de toetsing van de veiligheid van gebouwen in Groningen is het individueel risico bepalend. Het criterium voor het individueel risico (IR) is de zogenoemde Meijdam norm (er wordt voldaan aan de norm als $IR \leq 10^{-5}$).

De berekening van het individueel risico voor personen in een bepaald gebied in geval van aardbevingen gebeurt aan de hand van modellen. Voor deze modellen zijn (model)keuzes gemaakt voor een groot aantal factoren die bijdragen aan dit risico. Dit betreft het scenario voor gasproductie, de eigenschappen van de diepe ondergrond, de ondiepe ondergrond, de overdracht naar de bovengrond en de eigenschappen van de gebouwen. De eigenschappen worden in statistische termen (kansverdelingen) beschreven, om te kunnen omgaan met de onzekerheden over de precieze waarden. Het resultaat van de berekeningen wordt in termen van kansen gegeven voor het optreden van een belasting en het optreden van een effect.

In veel vakgebieden is het gebruik van kansmodellen in de omgang met risico's een geaccepteerde en succesvolle methode. Hiermee kunnen relevante conclusies getrokken worden ondanks de onzekerheden vanwege een gebrek aan kennis. Het gebruik van kansmodellen ligt ook ten grondslag aan de gehanteerde constructieve normen voor nieuwbouw en bestaande bouw.

Om voor een aanzienlijk aantal gebouwen tot een werkbaar en efficiënt proces voor de beoordeling te komen, biedt het werken met een beperkt aantal gebouwklassen, hier typologieën genoemd, grote voordelen. Gebouwen binnen een typologie hebben vergelijkbare seismische eigenschappen, en kunnen op basis van dezelfde modelberekeningen worden beoordeeld. Dit betekent dat grotere aantallen gebouwen behorende tot een zelfde typologie aanzienlijk sneller kunnen worden beoordeeld vergeleken met het proces waarbij elk gebouw afzonderlijk moet worden gemodelleerd en doorgerekend.

Voor de beoordeling van de gebouwen in Groningen is daarom een op typologieën gebaseerde beoordelingsmethode uitgewerkt (de typologieaanpak). Dit hoofdstuk geeft het kader van de risicoberekeningen die gebruikt worden binnen deze aanpak.

2.2 Typologiegebaseerd beoordelen

In de praktijk is geen gebouw precies gelijk. Dit betekent dat ook de eigenschappen die het gedrag van een gebouw tijdens een aardbeving bepalen, voor elk gebouw verschillen. Alle gebouwen in Groningen hebben dus elk een unieke seismische weerstand. Als deze weerstand per gebouw precies bepaald zou moeten zijn zou dat alleen kunnen door het gebouw tot bezwijken te belasten. Dit is uiteraard in de praktijk geen begaanbare weg. Ook is het onmogelijk om het gedrag van alle gebouwen via een triltafeltest na te bootsen.

Daarom wordt voor de toets van de constructieve veiligheid van gebouwen gebruik gemaakt van rekenmodellen. Om per gebouw een zo nauwkeurige mogelijke berekening te maken moet het gebouw uitvoerig worden geïnspecteerd. Deze uitgebreide, in veel gevallen destructieve en tijdrovende inspecties zijn tijdrovend.

Vervolgens kost de toepassing van geavanceerde rekenmethoden (gekalibreerd aan triltafeltesten) per te beoordelen gebouw veel tijd. Dit leidt tot lange doorlooptijden in het totale proces van beoordelen.

De tijd daarvoor ontbreekt, en daarnaast is het aantal gebouwen dat moet worden beoordeeld te groot (>10.000). Ten behoeve van een snelle beoordeling biedt een indeling in typologieën duidelijke voordelen.

Een typologie is een verzameling gebouwen met dezelfde seismische kenmerken. Het seismisch gedrag van de gebouwen binnen een typologie zijn vergelijkbaar. Binnen een typologie zijn er wel verschillen tussen gebouwen onderling. Indien zou worden uitgegaan van één sterktemodel voor alle gebouwen in Groningen (oftewel, alle gebouwen worden door middel van 1 typologie beschreven), met daarover een spreiding, dan wordt deze spreiding zeer groot omdat alle variaties in eigenschappen van alle gebouwen in Groningen dan moeten worden verdisconteerd. De onzekerheid van het resultaat is dan ook zeer groot en dit leidt tot onrealistische resultaten in termen van berekend risico. Een fijnere indeling in typologieën, ofwel een groter aantal typologieën, leidt tot een kleinere spreiding binnen een typologie en minder marge.

De verzameling gebouwen in Groningen is onderverdeeld in een beperkt aantal typologieën. Deze hebben een kleinere spreiding per typologie in vergelijking tot een onderverdeling met bijvoorbeeld maar 1 of 2 typologieën. Tegelijkertijd wordt het aantal typologieën ook niet groter genomen dan nodig, om een snelle beoordeling mogelijk te maken.

De gekozen indeling in typologieën is beschreven in termen van seismische kenmerken. Dit betreft kenmerken die vanwege de grote schaal van het probleem op korte termijn kunnen worden verkregen, zonder overlast voor de bewoner of beschadiging van constructie of interieur. Per gebouw wordt een eenvoudige bouwkundige opname uitgevoerd gericht op het vastleggen van deze kenmerken. De omschrijvingen van de typologieën, de bijbehorende kenmerken en de wijze van toedelen van gebouwen aan een typologie is toegelicht in TNO rapport 2021 R11002 [TNO, 2021b].

Per typologie is een beschrijving nodig in termen van seismisch gedrag en weerstand. In die beschrijving moet rekening gehouden worden met de variaties binnen een typologie.

Een van de belangrijkste doelen in de ontwikkeling van de typologieaanpak is het vastleggen van deze beschrijvingen en het kwantificeren van de variaties voor de gekozen typologieën. Deze variaties en de methode die wordt toegepast om deze in rekening te brengen zijn in hoofdstuk 4 van dit rapport uitgewerkt. De keuzes per typologie worden in meerdere typologiespecifieke rapporten afgeleid.

2.3 Risicomiddeling

2.3.1 Algemeen

In de bepaling van risico's wordt een zekere mate van risicomiddeling toegepast. Risicomiddeling is de mate waarin risico's in tijd en ruimte gemiddeld worden. Hoewel we risicomiddeling zoveel mogelijk proberen te vermijden, kan het meestal en ook in dit geval niet voorkomen worden.

Qua tijd wordt voor menselijke veiligheid vaak gewerkt met een kans voor één jaar en worden dus de kansen voor alle faalgebeurtenissen in één jaar gemiddeld. Qua ruimte zijn de specifieke exacte eigenschappen van het bouwwerk dat onderhevig is aan de dreiging, nooit precies bekend. Deze aspecten zijn slechts met veel moeite of door middel van destructief onderzoek vast te stellen. Daarnaast geldt dat gegeven de huidige kennis veel onzekerheden daardoor onbekend zijn en blijven. Praktisch gezien betekent dit dat er altijd voor bepaalde eigenschappen of objecten een min of meer gemiddeld risico gehanteerd wordt in plaats van dat dit risico nog verder uitgesplitst wordt. Daarom wordt vaak bij het vaststellen van een norm ook een toetsinstrumentarium gegeven waarbij, verborgen voor de gebruiker van de norm, acceptabel geachte niveaus van risicomiddeling zijn toegepast. Een norm zonder duidelijke kaders qua risicomiddeling zegt niet veel voor de praktijk.

2.3.2 *Risicomiddeling voor Groningen conform aanbevelingen commissie Meijdam*

In een risicoanalyse voor het bepalen van het individueel risico voor Groningse bouwwerken onder aardbevingen is het van belang op de juiste wijze om te gaan met risicomiddeling.

In dit kader is het nodig een norm te hebben: Deze is vastgesteld op $IR = 10^{-5}$ voor één jaar. Qua tijdsmiddeling wordt dus niet gewerkt per aardbevingsgebeurtenis, maar gemiddeld per jaar. Ook is het nodig een praktisch kader qua risicomiddeling in de ruimte te hebben. De commissie Meijdam [Meijdam, 2015] heeft daarom aangegeven dat het voldoende nauwkeurig is om met een catalogus (typologie) benadering te werken voor gebouwen, daarmee invulling gevend voor de praktijk aan hoe het risico berekend moet worden en langs welke doorsnede (namelijk de typologieën) risicomiddeling mag zijn toegepast.

2.3.3 *Risicomiddeling in constructieve normen*

Net zoals in andere normen worden in constructieve normen risico's gemiddeld langs bepaalde doorsnedes in de gebouwenpopulatie. Voor de beoordeling van gebouwen op aardbevingen is dit NPR 9998. Binnen NPR 9998 betreft dit onder meer onderstaande aspecten:

- Er wordt binnen de NPR 9998 gewerkt met één kans op overlijden gegeven instorten, er wordt gemiddeld over alle gebouwen en daarmee dus over typologieën. Binnen de typologie aanpak wordt bepaald welke vormen van instorten er per typologie op kunnen treden met de graad van instorten (deelinstorting tot volledig). Aan de hand hiervan wordt de kans op overlijden specifiek per typologie vastgesteld;
- Er wordt gewerkt met één grenswaarde voor de berekende verplaatsing voor alle gebouwen in de NPR 9998 ('*drift limit*'). In de typologie aanpak is dit specifiek per typologie;
- De wijze waarop wordt omgegaan met de niet-lineaire demping in de NLPO (Non Linear Push Over) berekeningen is dezelfde voor alle typologieën in de NPR 9998. In de typologie aanpak is dit specifiek per typologie.

In vergelijking met een typologieaanpak conform de adviezen van de commissie Meijdam levert een NPR 9998 berekening niet noodzakelijk een fijnere differentiatie naar risico op.

2.3.4 *Risicomiddeling in de TNO typologie aanpak*

De uitwerking van TNO in dit rapport komt overeen met het hierboven genoemde advies van de commissie Meijdam: pas een risicomiddeling toe binnen de

typologieën. Zo hebben we in de typologie aanpak te maken met risicomiddeling binnen de typologie. Dit betekent dat we bij dezelfde dreiging hetzelfde risico toekennen aan gebouwen binnen 1 typologie. Hierbij wordt nadrukkelijk de spreiding van de gebouw-eigenschappen binnen een typologie meegenomen; deze wordt dan als ‘marge’ bovenop alle gebouwen binnen de typologie toegepast. Het is niet onwaarschijnlijk dat in de NPR 9998 meer risicomiddeling wordt toegepast dan in de typologie aanpak en wel langs doorsnedes die niet direct voorgeschreven zijn door de commissie Meijdam. TNO houdt zich binnen de typologie aanpak in strikte zin aan het advies van de commissie Meijdam.

3 Typologieaanpak in de praktijk

3.1 Inleiding

Voor de beoordeling van de veiligheid van (individuele) gebouwen in Groningen is behoefte aan een eenduidige methode, die voor alle partijen in de regio transparant is en eenvoudig is uit te voeren. Dit hoofdstuk bevat de beschrijving van de werkzaamheden voor die uitvoerende partijen. Het beoordelingsproces dat wordt doorlopen is zodanig opgezet dat zo min mogelijk tijdrovende, gebouwgebonden, berekeningen noodzakelijk zijn. Deze zijn namelijk reeds op typologieniveau uitgevoerd, gebruik makend van de voor elke typologie vastgestelde waarde van de gebouw-tot-gebouw variatie.

De gebouwenvoorraad wordt ingedeeld in een (beperkt) aantal typologieën. De spreiding in eigenschappen binnen een typologie is ten behoeve van de beoordeling vertaald naar een voldoende veilige marge. Met deze aanpak kan op basis van snel uit te voeren bouwkundige opnames van gebouwen snel de veiligheidsbeoordeling worden uitgevoerd. Daarna kan op korte termijn, indien nodig, tot keuze, ontwerp en uitvoering van versterkingsmaatregelen worden overgegaan.

3.2 Stappenplan voor toepassing in de praktijk

Bij de typologie aanpak hoort een werkwijze voor de toepassing in de praktijk. Deze werkwijze wordt hieronder kort weergegeven. De werkwijze bestaat uit drie stappen. Per stap wordt aangegeven waar in dit rapport verdere achtergronden en onderbouwing van de voorgestelde activiteiten zijn gegeven.

3.2.1 *Stap 1: Stel per gebouw vast tot welke typologie dit behoort*

Per gebouw worden op basis van een gerichte bouwkundige opname aangevuld met informatie uit beschikbare archieven, de kenmerken vastgesteld die tezamen bepalen tot welke typologie dit gebouw hoort.

In [TNO, 2021b] is per typologie omschreven welke relevante seismische kenmerken worden gebruikt, hoe deze vastgesteld worden en op welke wijze een gebouw aan een typologie wordt toegedeeld. In dat rapport zijn ook uitsluitingsgronden gedefinieerd op basis waarvan een gebouw mogelijk niet tot een van de typologieën kan worden toegedeeld, zoals de aanwezigheid van schades of verbouwingen die de constructieve samenhang negatief beïnvloeden. Voor die gebouwen is een individuele beoordeling noodzakelijk. Waaruit deze beoordeling bestaat is door TNO hier niet verder uitgewerkt.

3.2.2 *Stap 2: Bepaal waar het beschouwde gebouw ligt en bepaal of de toegedeelde typologie voldoet aan de norm*

Zodra het gebouw is toegedeeld aan een typologie, wordt op basis van de locatie van het gebouw bepaald of het gebouw aan de norm voldoet. Hiertoe zijn per typologie vlekkenkaarten ontwikkeld waarin per geografische locatie en per typologie is aangegeven of die typologie wel of niet voldoet aan de norm. Deze vlekkenkaarten zijn in de typologiespecifieke rapporten opgenomen.

De uitkomst van stap 2 bepaalt of het noodzakelijk is tot constructieve versterking over te gaan. Als het gebouw niet voldoet aan de norm, dan moet worden bepaald in welke mate constructieve versterking nodig is. Indien het gebouw voldoet aan de norm, is geen constructieve versterking nodig.

3.2.3 *Stap 3: Vaststellen maatregelen voor versterken en herstel*

In deze stap worden de maatregelen vastgesteld die nodig zijn om het gebouw aan de norm te laten voldoen.

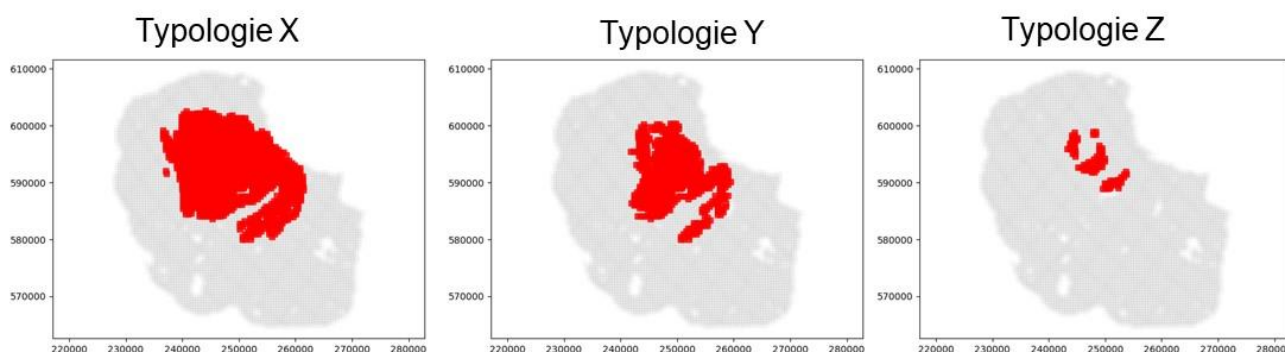
Indien uit stap 2 volgt dat versterking nodig is, dan moeten mogelijk één of meerdere versterkingsmaatregelen worden ontworpen die ervoor zorgen dat het gebouw zodanig wordt versterkt dat deze voldoet aan de norm. Dit gebeurt onder de verantwoordelijkheid van NCG, en is door TNO niet nader uitgewerkt in dit rapport.

Indien uit stap 2 volgt dat geen versterking nodig is, hoeven geen maatregelen te worden toegepast ten behoeve van de veiligheid.

3.3 Voorbeeld werking in de praktijk

Op basis van een (fictief) voorbeeld wordt de werking van de typologie gebaseerde beoordeling hieronder toegelicht.

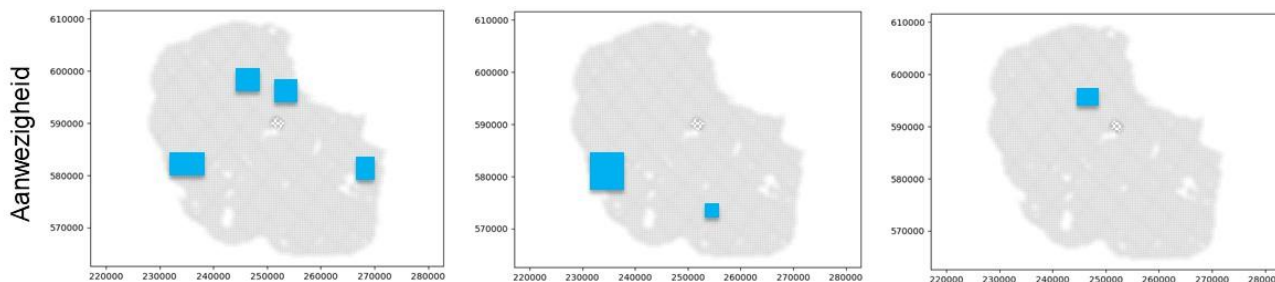
1: In Figuur 1 zijn drie vlekkenkaarten gegeven van typologieën X, Y en Z, waarvan per typologie is bepaald waar binnen het aardbevingsgebied deze wel (grijs) of niet (rood) voldoet aan de veiligheidsnorm. In dit voorbeeld, dat alleen dient ter illustratie van de ontwikkelde typologie aanpak, is een drietal fictieve typologieën gebruikt.



Figuur 1: Voorbeeld van vlekkenkaarten voor (fictieve) typologieën X, Y en Z.

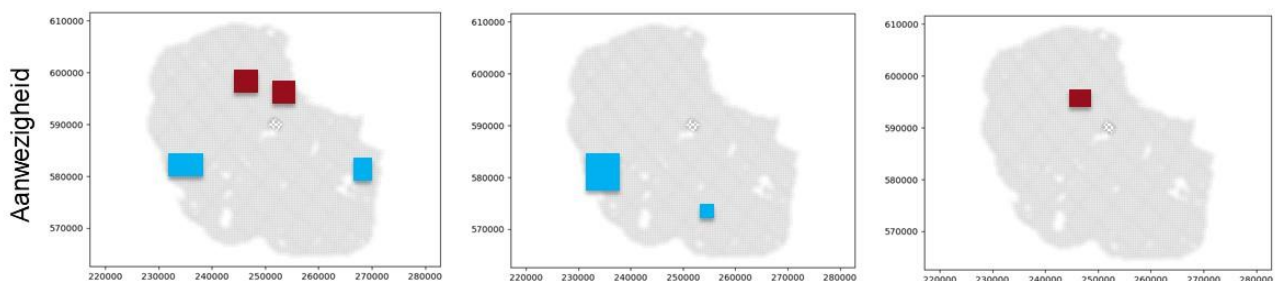
Voor typologie X geldt dat deze in een groot deel van het aardbevingsgebied niet voldoet. Dat gebied is kleiner voor typologie Y en nog kleiner voor typologie Z.

2: Vervolgens wordt met de aanwijzingen uit [TNO, 2021b] bepaald welke gebouwen behoren tot typologie X, Y en Z. Dit is ten behoeve van dit voorbeeld schematisch in Figuur 2 weergegeven, waarbij de blauwe vlakjes aangeven wat de locaties zijn van de beschouwde gebouwen die behoren tot respectievelijk typologie X, Y en Z.



Figuur 2: Aanduiding van de ligging van gebouwen uit typologie X, Y en Z (van links naar rechts)

3: Door de ligging van de gebouwen te vergelijken met het gebied waar de typologie niet voldoet aan de norm wordt vastgesteld welke gebouwen wel of niet aantoonbaar veilig zijn. In dit voorbeeld leidt dit tot het resultaat weergegeven in Figuur 3:



Figuur 3: Aanduiding van gebouwen die wel (blauw) of niet (rood) voldoen aan de Meijdam norm.

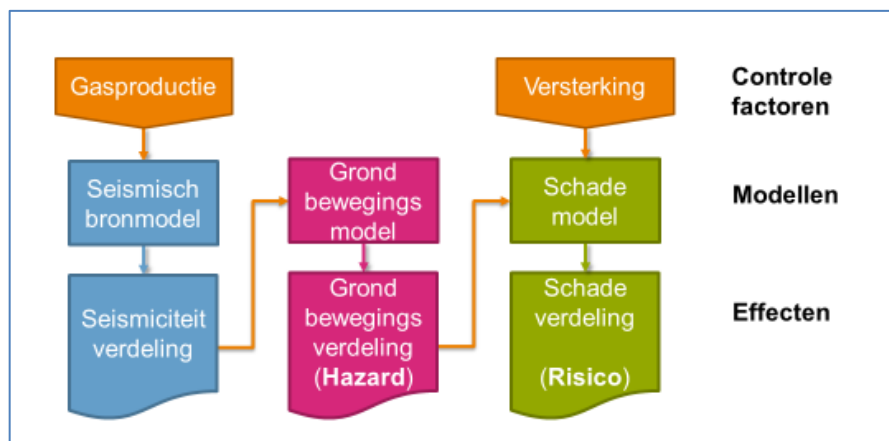
De rood ingekleurde vlakjes geven aan dat de beschouwde gebouwen zich bevinden op locaties waar de betreffende typologie niet voldoet aan de norm. Voor deze gebouwen moet worden nagegaan welke versterkingsmaatregelen nodig zijn. De blauwe vlakjes geven aan dat de betreffende gebouwen zich bevinden op een locatie waar de typologie waartoe zij behoren wel voldoet aan de norm. Er zijn voor deze gebouwen dus geen versterkingsmaatregelen nodig.

Voor typologie X betekent dit in dit voorbeeld dat een deel van de gebouwen in deze typologie versterkt moeten worden en een deel niet. De aanwezige gebouwen van typologie Y zijn allemaal veilig, terwijl voor alle gebouwen van typologie Z nagegaan moet worden welke versterkingsmaatregelen nodig zijn.

4: Als laatste stap wordt bepaald welke maatregelen worden toegepast. Dit gebeurt per te versterken gebouw en wordt gecoördineerd door NCG. Dit is geen onderdeel van de door TNO ontwikkelde typologieaanpak.

4 Uitgangspunten voor de beoordeling

De beoordeling van de veiligheid vindt plaats op basis van de zogenoemde vlekkenkaarten, die per typologie worden gemaakt. De berekeningen die ten grondslag liggen aan de vlekkenkaarten per typologie zijn uitgevoerd met de TNO modelketen [TNO, 2020a]. De opbouw van de modelketen is schematisch weergegeven in Figuur 4. Een uitgebreide beschrijving is gegeven in bijlage A.



Figuur 4: Schematisch overzicht van de modelketen

Voor ieder deel van de modelketen zijn verschillende invoergegevens nodig om tot de typologie vlekkenkaarten te komen. Deze betreffen:

- Het gasproductie scenario. Dit is de hoeveelheid gas die geproduceerd wordt op verschillende locaties in Groningen en de daaruit volgende drukverdeling in het gasreservoir in de tijd.
- Het seismologisch model. Dit model vertaalt de effecten van de productie van gas uit het Groningen gasveld naar de verwachte aantallen aardbevingen en de verdeling van de magnitudes van deze bevingen.
- Het bodembewegingsmodel. Dit model geeft voor bevingen met een gegeven magnitude en locatie op diepte de verdeling van het trillingsniveau aan het maaiveld op de gewenste locatie.
- Het model voor de kwetsbaarheidskrommen. Dit model geeft de kans op instorten als functie van het trillingsniveau op de locatie van het gebouw.
- Het gevolgmodel: de kans op overlijden gegeven een bepaalde mate van instorting.

Het gasproductiescenario en het seismologisch en bodembewegingsmodel leveren samen de seismische dreiging. Deze worden in paragraaf 4.1 besproken. De kwetsbaarheids- en gevolgmodellen zijn beschreven in paragraaf 4.2. De modelketen is uitgebreider toegelicht in bijlage A en een meer gedetailleerde beschrijving van de invoergegevens voor alle delen van de modelketen is beschreven in bijlage A.3.

Omwille van de kwaliteitscontrole wordt opgemerkt dat de TNO modelketen onafhankelijk is geprogrammeerd op basis van de beschikbare achtergrondinformatie. Eind 2019 is door TNO voor een gegeven set invoergegevens een

vergelijking gemaakt met de uitkomsten van de NAM HRA. Gegeven deze uitgangspunten zijn de resultaten vrijwel identiek. Deze vergelijking is beschreven in [TNO, 2019], [TNO, 2020b], en gereviewed door het KEM panel, zie [KEM, 2020]. Daarnaast is de broncode regel voor regel gecontroleerd door [Tessella, 2020].

Voor de typologie vlekkenkaarten is door EZK aan TNO gevraagd om voor de seismische dreiging uit te gaan van dezelfde uitgangspunten als die ten grondslag liggen aan de NPR webtool 2020, [NEN, 2021].

Met dit uitgangspunt sluit TNO aan bij door NCG gebruikte en ook in het bestuursakkoord van 6 november 2020 vastgelegde uitgangspunten voor beoordelingen. Deze uitgangspunten zijn niet typologie afhankelijk. De invoergegevens voor de kwetsbaarheid en de modellering van de gevolgen worden per typologie uitgewerkt.

4.1 Seismische dreiging ten behoeve van risicoberekening

Voor het vaststellen van de vlekkenkaarten zijn voor de berekening van gasproductie tot seismische dreiging dezelfde uitgangspunten gehanteerd als die momenteel worden gebruikt voor de huidige beschikbare NPR webtool, geïmplementeerd [NEN, 2021].

De voor de risicoberekening in de typologieaanpak gebruikte uitgangspunten in de toepassing van deze modellen zijn beschreven in bijlage A.3. Deze zijn samengevat in Tabel 1.

Model	Modelketen invoer voor typologie vlekkenkaarten d.d. 20 mei 2021
Productie scenario	Operationele strategie 2. ¹
Seismologisch model (SSM)	Versie 6 met 100% weging voor het M7 model en 0% voor het M11 model ¹
Bodembewegings-model (GMM)	Versie 6 ¹ , waarbij de period-to-period correlaties aan het maaiveld zijn aangezet ²

¹ Deze keuze is in lijn met de NPR webtool [NEN, 2021]

² Dit is naar verwachting een conservatieve keuze. Voor toelichting zie bijlage A.

Tabel 1: Invoergegevens voor de seismische dreiging gebruikt in de modelketenberekening in de typologieaanpak

Zodra er nieuwe, breed geaccepteerde, modellen beschikbaar zijn, kunnen deze worden geïmplementeerd in de TNO modelketenberekening. Op basis van die nieuwe instellingen kunnen dan updates van de vlekkenkaarten worden gemaakt. Deze kunnen binnen een tijdsbestek van enkele weken worden geïmplementeerd.

4.2 Kwetsbaarheidsmodellen

4.2.1 Algemeen

De kans op falen van een gebouw uit een typologie als gevolg van een trillingsniveau volgend uit de seismische dreiging wordt berekend met een kwetsbaarheidsmodel. De kans op overlijden gegeven falen wordt vervolgens met het gevolgmodel vastgesteld.

Het kwetsbaarheidsmodel bestaat uit een aantal kwetsbaarheidskrommen die de kans op het optreden van falen als functie van een intensiteitsmaat weergeven. Onderscheid wordt gemaakt in drie bezwijktoestanden ('collapse states'): CS1 en CS2 zijn de bezwijktoestanden voor het bezwijken van kleine gedeeltes van het gebouw, CS3 beschrijft het globaal instorten van het gebouw. Vallende schoorstenen zijn ook in de bezwijktoestanden inbegrepen, dit is verder uitgewerkt in Bijlagen C en E. Per bezwijktoestand wordt per typologie een kwetsbaarheidskromme vastgelegd. De kwetsbaarheidskrommes worden gedefinieerd door de mediane seismische weerstand en de spreiding per typologie. Voor zowel de mediane seismische capaciteit als de spreiding van de kwetsbaarheidskrommen wordt aangesloten bij de in Groningen aanwezige gebouwpopulatie per typologie.

De mediane seismische weerstand per typologie wordt vastgesteld op basis van de sterkteanalyse van één of meerdere referentiegebouwen aan de hand van geavanceerde Einde Elementenberekeningen (EEM). In de typologiespecifieke rapporten wordt de mediane seismische capaciteit afgeleid en onderbouwd.

De spreiding in de kwetsbaarheidskromme wordt gedefinieerd door:

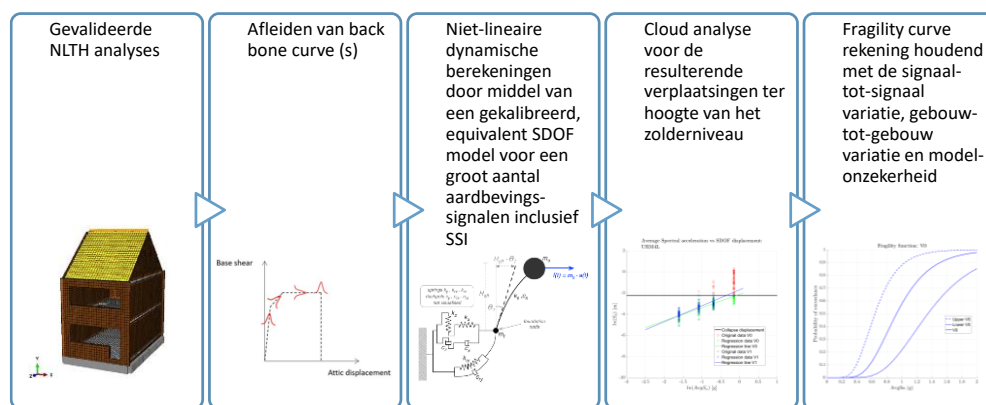
- De onzekerheden als gevolg van verschillende eigenschappen van de aardbevingsbelasting. Verschillen in aardbevingssignalen kunnen leiden tot verschillende respons van hetzelfde gebouw. Deze verschillen worden verrekend met een onzekerheidsmarge die op basis van uitgebreide modelberekeningen per typologie wordt bepaald. Dit wordt de 'record-to-record variability' of signaal-tot-signaal variatie genoemd.
- Onzekerheden in de eigenschappen van het gebouw, zoals materiaaleigenschappen, eigenschappen van verbindingen, constructiedetails, etc. Dit betekent dat het gemodelleerde gebouw mogelijk afwijkt van het werkelijke gebouw. Deze onzekerheden worden in de modelonzekerheid verrekend.
- Onzekerheden als gevolg van variaties tussen gebouwen (binnen een typologie) onderling. Gebruikt wordt de informatie van een beperkt aantal in detail onderzochte gebouwen per typologie. Omdat nooit precies te zeggen is of en in hoeverre de onderzochte gebouwen overeenkomen met de andere gebouwen binnen een typologie, wordt een onzekerheidsmarge aangehouden. Dit wordt de 'building-to-building' of gebouw-tot-gebouw variatie genoemd.

4.2.2 Afleiding kwetsbaarheidskrommen

Voor de afleiding van zowel het kwetsbaarheidsmodel als het gevolgmodel wordt als startpunt gebruik gemaakt van de methodiek [Crowley et al, 2019] en [Crowley et al, 2020]. Deze bestaat uit vijf stappen. In bijlage C wordt dit nader toegelicht. Figuur 5 geeft een schematische weergave van deze stappen.

- I. Het constructieve gedrag van één of meerdere gebouwen binnen een typologie is gesimuleerd door middel van een geavanceerde EEM berekening. Dit levert een hysteresis kracht/verplaatsingsmodel (ofwel backbone curve).
- II. De backbone curve wordt gebruikt om een equivalent model (SDOF) af te leiden. Dit model bevat een effectieve massa, een hysteresis kracht/verplaatsingsmodel (ofwel backbone curve met stijfheidsdegradatie en demping) en een equivalent macro-element om de grondconstructie interactie (soil-structure interaction of SSI) te simuleren. De afleiding van dit model bij deze stap is beschreven in [Crowley et al, 2019] en in de typologiespecifieke rapporten.

- III. Het model uit de vorige stap wordt belast door een groot aantal aardbevingssignalen om de *record-to-record* of signaal-tot-signaal variatie, te bepalen. De gebruikte methodiek bij deze stap is beschreven in [Crowley et al, 2019] en in de typologiespecifieke rapporten.
- IV. De kwetsbaarheidskromme behorende bij een bepaalde bezwijktoestand (CS1, 2 en 3) kan vervolgens worden afgeleid. De kwetsbaarheidskromme beschrijft de kans van falen van de constructie van het doorgerkende gebouw gegeven een bepaalde aardbevingsbelasting.
- V. Vervolgens worden ook de gebouw-tot-gebouw variatie en een model-onzekerheid in rekening gebracht om de kwetsbaarheidskromme voor een typologie te bepalen. Deze zijn beschreven in respectievelijk paragraaf 4.2.4 en paragraaf 4.2.5.



Figuur 5: Schematische weergave van de afleiding van de kwetsbaarheidskrommen voor een typologie

TNO heeft beschikbare berekeningen bij deze stappen per typologie geëvalueerd en beoordeeld en de TU Delft heeft aanvullende berekeningen gemaakt. Op basis van deze evaluatie en de aanvullende berekeningsresultaten is per typologie bepaald welke invoergegevens van de kwetsbaarheidskromme van toepassing zijn. Deze studies en de resulterende invoergegevens worden per typologie in een specifiek rapport beschreven.

4.2.3 Uitgevoerde EEM berekeningen

Voor de uitwerking van het kwetsbaarheidsmodel van de typologieën wordt gebruik gemaakt van gekalibreerde Eindige Elementenberekeningen van gebouwen waarvan de resultaten zijn vertaald naar zogenaamde 'backbone curves'.

In de berekeningen ter bepaling van de backbone-curve zijn alle relevante faalmechanismen meegenomen.

Er is gebruik gemaakt van driedimensionale niet-lineaire berekeningen (NLTH, Non Linear Time History analysis en NLPO, Non Linear Push Over analysis) die zijn gekalibreerd aan triltafeltesten.

In de typologiespecifieke rapporten wordt beschreven welke berekeningen, en voor welke gebouwen, zijn gebruikt voor de afleiding van de kwetsbaarheidskromme. Dit betreft zowel reeds beschikbare berekeningen als door de TU Delft specifiek voor de typologieaanpak uitgevoerde studies.

4.2.4 *Gebouw-tot-gebouwvariatie*

Bij een indeling van gebouwen in een (beperkt) aantal typologieën ontstaat een variatie binnen een typologie met betrekking tot de seismische kenmerken van de individuele gebouwen. Daardoor zal niet elk gebouw precies hetzelfde gedrag vertonen. De mate waarin sprake is van deze verschillen wordt de gebouw-tot-gebouw variatie genoemd. Deze variatie wordt meegenomen in de bepaling van de kwetsbaarheidskrommen. Elke typologie wordt omschreven op basis van de hoofd-seismische kenmerken die het seismisch gedrag bepalen. Binnen de gebouw-tot-gebouw variatie wordt de invloed van de overige kenmerken meegenomen. Voor de typologie indeling zijn de volgende eigenschappen in elk geval onderdeel van de gebouw-tot-gebouw variatie (binnen de typologie):

Geometrische eigenschappen:

- Vorm van de gebouwplattegrond passend binnen typologie.
- Onregelmatigheden in de gebouwvorm passend binnen typologie.
- Afmetingen van het gebouw.
- Plaatsing van een woning binnen een bouwblok.
- Afmetingen van penanten en dragende muren.
- Opbouw van de gevel.
- Plaatsing van de stabiliteitselementen binnen een gebouw.

Fundering

- Type fundering (zoals funderingen op staal of op palen).

Verbindingen

- Verbindingen tussen wand en vloer (bijvoorbeeld tussen binnenblad penant of dragende wand en vloer).
- Verbindingen tussen wanden onderling.
- Verbindingen tussen wanden en daken.
- Opbouw en materiaal van de dakconstructie.

Materiaal gerelateerd

- Variaties binnen het gebruikte bouw materiaal.
- Materiaaleigenschappen.
- Veroudering van materialen.

Door het invoeren van uitsluitingsgronden bij de typologietoekenning [TNO 2021b] wordt de gebouw tot gebouw variatie beperkt. Bij de typologietoekenning wordt daarnaast ook gewerkt met schade gerelateerde uitsluitingsgronden. Dit maakt dat behalve de hier gebruikte gebouw-tot-gebouw variaties en de modelonzekerheden zoals beschreven in paragraaf 4.2.5 (o.a. imperfecties, scheefstanden, etc.) er binnen de typologie geen rekening gehouden hoeft te worden met schade. Gebouwen met te veel schade worden immers uitgesloten van typologietoedeling.

Zoveel mogelijk is gebruik gemaakt van bekende informatie uit beschikbare berekeningen. Deze berekeningen worden per typologie in de typologiespecifieke rapporten besproken. Voor de geometrische gebouweigenschappen is gebruik gemaakt van informatie uit de 'Groningen Exposure Database [Arup, 2019a, 2019d] waarin op basis van bouwtekeningen en inspecties aan de buitenzijde veel informatie beschikbaar is met betrekking tot de aanwezige gebouwen.

4.2.5 Modelonzekerheden

Twee typen modelonzekerheden kunnen worden onderscheiden.

- 1) Een modelonzekerheid β_c die de afwijkingen van het gebruikte model ten opzichte van de werkelijkheid beschrijft met betrekking tot de uitvoeringskwaliteit. Te denken valt aan imperfecties, scheefstanden, afwijkingen ten opzichte van tekening, en overige zaken die niet afgedekt zijn in de modelvariaties.
- 2) Een modelonzekerheid β_q die de geschiktheid van het numerieke model beschrijft in relatie tot het werkelijke faalgedrag. Hoe beter het model, hoe kleiner deze modelonzekerheid.

Deze worden gecombineerd tot de in de berekening gebruikte modelonzekerheid β . Voor de kwantificering van de modelonzekerheid wordt gebruik gemaakt van de aanbevelingen uit het FEMA rapport P-58 [FEMA, 2012].

De systematiek van FEMA is voor wat betreft de modelonzekerheid generiek toepasbaar. In bijlage D worden de gebruikte parameters specifiek voor de situatie in Groningen onderbouwd.

De modelonzekerheid wordt in rekening gebracht via een zogenaamde logic tree met een 'Lower', 'Middle' en 'Upper' tak. De modelmatig ontwikkelde kwetsbaarheidskromme wordt hierbij als 'best estimate' toegepast, deze wordt dus als '*middle branch*' in de logic tree geïmplementeerd. De modelonzekerheid wordt dan via de 'lower' en 'upper' tak geïmplementeerd, zie bijlage C.3.

Opgemerkt wordt dat de aanpak in [Crowley et al, 2020] hiervan afwijkt; daar wordt namelijk de modelmatige kwetsbaarheidskromme als '*upper branch*' in de risico-berekening geïmplementeerd wat leidt tot een lager risico. In [Crowley et al, 2020] wordt als motivering gegeven dat de numerieke modellen de werkelijke sterkte consistent onderschatten. TNO vindt dit onvoldoende onderbouwd en acht de in [Crowley et al, 2020] gebruikte methodiek op dit punt onvoldoende veilig.

4.2.6 Aanpassing van de mediane seismische capaciteit

De in potentie meest geavanceerde methode om tot kwetsbaarheidskrommen te komen is volledig op geavanceerde NLTH berekeningen van complexe 3D EEM modellen (hierna Multi-Degree-Of-Freedom, ofwel MDOF modellen genoemd) gebaseerd. Dit is vanwege de intensieve rekentijden voor MDOF modellen en het zeer grote aantal berekeningen dat nodig is om per typologie tot kwetsbaarheidskrommen te komen niet praktisch. Daarom is een slag gemaakt van MDOF naar een aan de MDOF gekalibreerde SDOF (Single Degree of Freedom) benadering voor ieder referentiegebouw, dit is benoemd in stap II in paragraaf 4.2.2.

Uit studies voor enkele in de typologieaanpak gebruikte metselwerk referentiegebouwen blijkt dat er een aanpassing van de mediaan van de kwetsbaarheidskromme nodig is [Arup, 2019b/2019c]. Deze aanpassing is het verschil in mediaan tussen SDOF en MDOF kwetsbaarheidskrommen waar alleen signaal-signaal variatie is toegepast.

Uit dezelfde studie, [Arup, 2019b/2019c], blijkt voor metselwerk dat als daarnaast ook expliciet onzekerheden in de eigenschappen in een gebouw met MDOF modellen worden doorerekend om tot kwetsbaarheidskrommen te komen, in plaats van zoals in paragraaf 4.2.2 deze als extra spreiding toe te voegen, er ook een verschuiving van de mediaan is.

Als deze beide effecten samen worden verrekend is het gemiddelde effect over meerdere referentiegebouwen een mediaanverschuiving naar lagere intensiteitswaarden van ongeveer 15%.

Wanneer vervolgens gebouw-tot-gebouw variatie wordt toegepast, is geen significante mediaanverschuiving meer waargenomen naast deze 15% maar alleen een vergroting van de spreiding in de kwetsbaarheidskromme. Dit wordt in bijlage C.4 toegelicht.

De genoemde 15% verschuiving is toegepast bij verschillende METSELWERK typologieën waar één of meerdere referentiegebouwen zijn gebruikt in kwetsbaarheidskrommen. Uitzondering betreft typologie METSELWERK2 waar in plaats van meerdere referentiegebouwen het ongunstige referentiegebouw is gebruikt en daarom is deze verschuiving niet toegepast. Ook zijn voor bepaalde typologieën extra studies gedaan naar de ligging van de mediaan. Dit is beschreven in de uitwerking van de typologieën.

Voor typologieën anders dan METSELWERK is de genoemde mediaanverschuiving niet van toepassing.

4.3 Gevolgmodel en risicoberekening

Voor de risicoberekening moet de kans op falen van een gebouw worden vertaald naar een kans op overlijden per jaar. Deze overlijdenskans per jaar is het individueel risico (IR). Deze kans wordt bepaald uit de bijdragen van de verschillende bezwijktoestanden. In het gevolgmodel wordt per typologie de kans op overlijden voor ieder van deze drie bezwijktoestanden gegeven, zowel in het gebouw als net daaromheen.

Voor CS1 en CS2 is een beperkte overlijdenskans in rekening gebracht. CS3, globaal instorten van het gebouw, is gekoppeld aan een grote overlijdenskans.

Qua methodiek wordt het model zoals voorgesteld door Eucentre [Crowley et al, 2019] gevolgd; getalsmatig wordt door TNO per typologie een eigen keuze gemaakt in de betreffende rapporten. De wijze waarop de gevolgen per bezwijktoestand zijn opgenomen in het gevolgmodel is toegelicht in bijlage E. Per typologie wordt nader onderzocht met welke waarden als invoer voor het gevolgmodel wordt gerekend. Dit wordt in de typologiespecifieke rapporten vastgelegd.

De onzekerheid in het gevolgmodel wordt in rekening gebracht via een zogenaamde logic tree met een 'Lower', 'Middle' en 'Upper' tak. Het ontwikkelde gevolgmodel (zie bijlage E) wordt hierbij als 'best estimate' toegepast, deze wordt dus als '*middle branch*' in de logic tree geïmplementeerd. De onzekerheid wordt dan via de 'lower' en 'upper' tak geïmplementeerd.

Opgemerkt wordt dat de aanpak in [Crowley et al, 2020] hiervan afwijkt; daar wordt namelijk het ontwikkelde gevolgmodel als '*upper branch*' in de risicoberekening geïmplementeerd wat leidt tot een lager risico.

5 Implementatie in de praktijk

5.1 Inleiding

De resultaten van de door TNO en TU Delft uitgevoerde analyses leveren voor elke typologie een sterktemodel op, dat in de vorm van kwetsbaarheidskrommen en keuzes voor de modelonzekerheid en gevolgmodel in de TNO modellenketen wordt geïmplementeerd. Voordat deze implementatie definitief zijn uitgevoerd, zijn de resultaten en de bijbehorende onderbouwingen voorgelegd aan het ACVG. Het ACVG adviseert de ministers van EZK en BZK over de typologieaanpak en geeft daarbij advies over de te hanteren instellingen voor de definitieve risicoberekening. In dit hoofdstuk wordt dit kort toegelicht. De instellingen en resultaten per typologie zijn in afzonderlijke, typologiespecifieke, rapporten beschreven. De specifieke aanbevelingen per typologie zijn in die rapporten opgenomen.

5.2 ACVG adviezen en implementatie

Het ACVG heeft in 2020 tweemaal geadviseerd over de typologieaanpak [ACVG, 2020a, 2020b]. In het eerste advies van maart 2020 is op hoofdlijnen geadviseerd de typologieaanpak van TNO verder uit te werken. In het tweede advies van november 2020 is geadviseerd de typologieaanpak te implementeren na het uitvoeren van een aantal controles. Deze controles betreffen de volgende onderwerpen:

- a) *Toon aan dat de aannames en interpretaties bij NLTH-berekeningen voldoende onderbouwd zijn.*
Een evaluatie van de details van de door TNO gehanteerde NLTH-berekeningen, met betrokkenheid van ervaringsdeskundigen. Het vertrekpunt van een dergelijke evaluatie kan een discussiebijeenkomst o.l.v. het ACVG zijn. Ook een vergelijking met NPR-berekeningen voor een gericht aantal cases is nodig. Hierbij moeten ook de inzichten worden benut die momenteel worden opgedaan in NEN-module 1, 3 en 4.
- b) *Toon aan dat de modellering van de gebouw-tot-gebouwvariabiliteit past bij de Groningse realiteit.*
Het relateren van de door TNO-beschouwde modelgebouwen aan daadwerkelijk in Groningen aanwezige woningen, door een aantal woningen uit Groningen door te rekenen op dezelfde wijze als dit is gedaan voor de modelgebouwen. De capaciteit van elk van deze woningen moet passen binnen de bandbreedtes die TNO heeft berekend.
- c) *Toon aan dat een uitgebreidere opname geen wezenlijke invloed heeft op het beoordelingsresultaat.*
Een beantwoording van de vraag in welke mate aanvullende informatie (bijvoorbeeld uit een meer gedetailleerde opname) over een woning kan leiden tot een ander beoordelingsresultaat. Dit geeft inzicht in hoe zeker het is dat de methode tot een correcte beoordeling leidt.
- d) *Toon aan dat uit-het-vlak bezwijken correct is meegenomen in versimpelde (SDOF) modellen.*
Een controle of de benaderingsstap van complexe berekening naar meer eenvoudige berekeningen consequenties heeft voor uitkomsten, specifiek voor uit-het-vlak bezwijken.

TNO heeft deze controles uitgevoerd en deze worden gerapporteerd in de typologiespecifieke rapportages. Naar aanleiding van de uitkomsten adviseert het ACVG de ministers over het implementeren van de typologie aanpak in de praktijk. Hiertoe beoordeelt het ACVG per typologie de uitkomsten van de controles uitgevoerd door TNO. Het ACVG adviseert vervolgens of de typologie kan worden geïmplementeerd, voorzien van een eventuele door het ACVG voorgestelde marge.

Vervolgens implementeert TNO de sterktemodellen met de door het ACVG geadviseerde marge in de risicoberekening. Dit levert vlekkenkaarten per typologie die vervolgens worden gebruikt voor de veiligheidsbeoordeling. Deze vlekkenkaarten worden opgeleverd in de typologiespecifieke rapporten.

6 Referenties

[ACVG, 2020a]

Tussentijds advies validatie typologie-aanpak, ACVG/202003-01, 5 maart 2020.

[ACVG, 2020b]

Advies Typologie Aanpak, 17 november 2020

[Arup, 2016]

LS-Dyna Validation Booklet

[Arup, 2019a]

Exposure Database V6, juli 2019

[Arup, 2019b]

Typology Modelling Explicit MDOF Validation of Fragility Functions - URM3L - URM4L, 30 juni 2019

[Arup, 2019c]

Typology Modelling Explicit MDOF Validation of Fragility Functions - URM3L- URM1_F, April 2020

[Arup, 2019d]

ARUP, "Exposure Database V7: Data Documentation, Technical Report and Exposure Model", December 2019

[Besseling et al, 2020]

Evaluation, validation and improvement of the Site Amplification component of the Groningen Risk Model (KEM-02), Research Question 2 report, F. Besseling, A. Bougioukos, J. de Greef, J. Pruiksma, A. Tsouvalas, spring 2020

[Bommer et al, 2019]

V6 Ground-Motion Model (GMM) for Induced Seismicity in the Groningen Field With Assurance Letter, Julian J Bommer, Benjamin Edwards, Pauline P Kruiver, Adrian Rodriguez-Marek, Peter J Stafford, Bernard Dost, Michail Ntinalexis, Elmer Ruigrok and Jesper Spetzler, December 2019

[Bourne & Oates, 2018]

Note for File: Finite rupture simulation for ground motion modeling and probabilistic seismic hazard and risk analysis for the Groningen gas field, S.J. Bourne and S.J. Oates, May 2018

[Bourne & Oates, 2019]

Evolution of induced earthquake magnitude distributions with increasing stress in the Groningen gas field. Bourne, S. and Oates. S., 2019

[Bourne & Oates, 2020]

Assurance of the report Evolution of induced earthquake magnitude distributions with increasing stress in the Groningen gas field. Bourne, S. and Oates. S., 2020

[Coburn et al, 1992]

Coburn A.W., Spence R.J.S. and Pomonis, A., "Factors Determining Casualty Levels in Earthquakes: Mortality Prediction in Building Collapse," Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, 1992

[Coburn & Spence 2002]

Coburn A. and Spence R Earthquake Protection, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2002[Coppersmith et al, 2016]

Report on Mmax Expert Workshop, K.J. Coppersmith, Jon P. Ake, Dr. Hilmar Bungum, Prof. dr. Torsten Dahm, Prof. Ian Main, Dr. Art McGarr, Dr. Ivan Wong en Dr. Bob Youngs, WTC Schiphol, 8-10 March 2016

[Crowley et al, 2017]

Helen Crowley, Rui Pinho, Report on the V5 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. November 2017

[Crowley et al, 2019]

Helen Crowley, Rui Pinho and Francesco Cavalieri. Report on the V6 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. March, 2019.

[Crowley et al, 2020]

Helen Crowley and Rui Pinho. Report on the V7 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. March, 2020.

[FEMA, 2012]

FEMA 58-1, Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1, Methodology, FEMA, Washington DC, USA, 2012

[GTS 2020]

Advies leveringszekerheid voor benodigde Groningenvolumes en - capaciteiten, Groningen, Gasunie Transport Services B.V., 31 januari 2020.

[KEM, 2020]

Public seismic hazard and risk assessment model Groningen 2018 2019, KEM Research review, evaluation and interpretation, KEM-10, January 2020

[Kohrangi et al, 2017]

Kohrangi M., Bazzurro P., Vamvatsikos D. and Spillatura A. , "Conditional spectrum-based ground motion record selection using average spectral acceleration," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(10), pp. 1667-1685, 2017

[Meijdam, 2015]

Eindadvies Handelingsperspectief voor Groningen, Commissie Meijdam, December 2015

[MEZK, 2018a]

Kamerbrief over Gaswinning Groningen, E.D. Wiebes, Minister Economische Zaken en Klimaat, 29 maart 2018

[MEZK, 2018b]

Verwachtingenbrief aanvulling winningsplan Groningenveld 2016, aan NAM, E.D. Wiebes, Minister Economische Zaken en Klimaat, 2 mei 2018

[MEZK, 2020a]

Verzoek tot voorstellen operationele strategie voor het gasjaar 2020-2021, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, kenmerk DGKE / 20018021, 21 februari 2020

[MEZK, 2020b]

Voortgang afbouw gaswinning Groningen (Kamerbrief), kenmerk DGKE-PGG / 20164742, Wiebes, E., Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 19 juni 2020.

[Miller and Rice, 1983]

Miller A.C. and Rice T.R. (1983) "Discrete approximations of probability distributions," Management Science, 29(3), pp. 352-362, 1983

[NEN, 2020]

NPR 9998:2020 Nederlandse Praktijkrichtlijn Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – geïnduceerde aardbevingen – grondslagen, belastingen en weerstanden, NEN, 2020

[NEN, 2021] Achtergrondrapport 'webtool NPR 9998' behorende bij NPR 9998:2020, 8 januari 2021 (update van versie 30 juli 2020)

[Seismosoft 2020]

SeismoStruct 2020 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed. s.l. : Seismosoft, 2020

[Tessella, 2020]

Software review report TNO PSHRA Software Assessment SodM, Tessella, 2020

[TNO, 2019]

Comparative analysis of the NAM and TNO implementations in the Groningen Seismic Hazard and Risk Assessment, TNO report R11997, 19 December 2019

[TNO, 2020a]

Probabilistic Seismic Hazard and Risk Analysis in the TNO Model Chain Groningen, TNO report, TNO 2020 R11052_2, 17 december 2020

[TNO, 2020b]

TNO Model Chain Groningen: Update and quick scan comparison of 2020 HRA model, TNO rapport, TNO2020 R11659, 6 november 2020

[TNO 2020c]

Status of the TNO Model Chain Groningen per October 1, 2020 and recommendations for the public Seismic Hazard and Risk Analysis 2021, TNO 2020 R11464, 2020

[TNO 2020d]

TNO advies operationele strategieën & HRA Groningen gasjaar 2020-2021, advies op verzoek van het Ministerie van EZK, TNO (2020, 11 mei)

[TNO 2021a]

Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2021, TNO-rapport, TNO2021 R10441, 24 maart 2021

[TNO, 2021b]

Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Typologisch toedelen, TNO Rapport 2021 R11002,

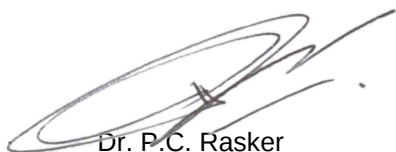
7 Ondertekening

Delft, 2 september 2021

TNO

A handwritten signature in blue ink, consisting of several vertical strokes followed by a horizontal line and some smaller, less distinct marks.

Ir.ing. M. Steins
Project Manager

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized loop followed by a horizontal line and a small cross-like mark.

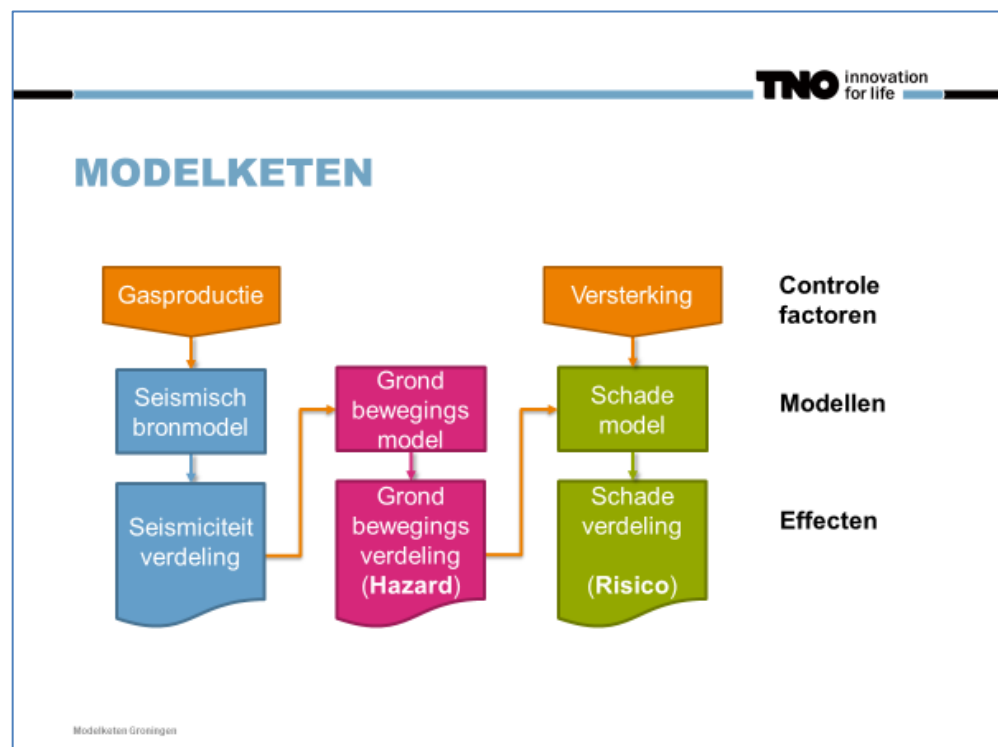
Dr. P.C. Rasker
Research Manager Structural Reliability

A Omschrijving TNO modelketen en keuze input scenario's

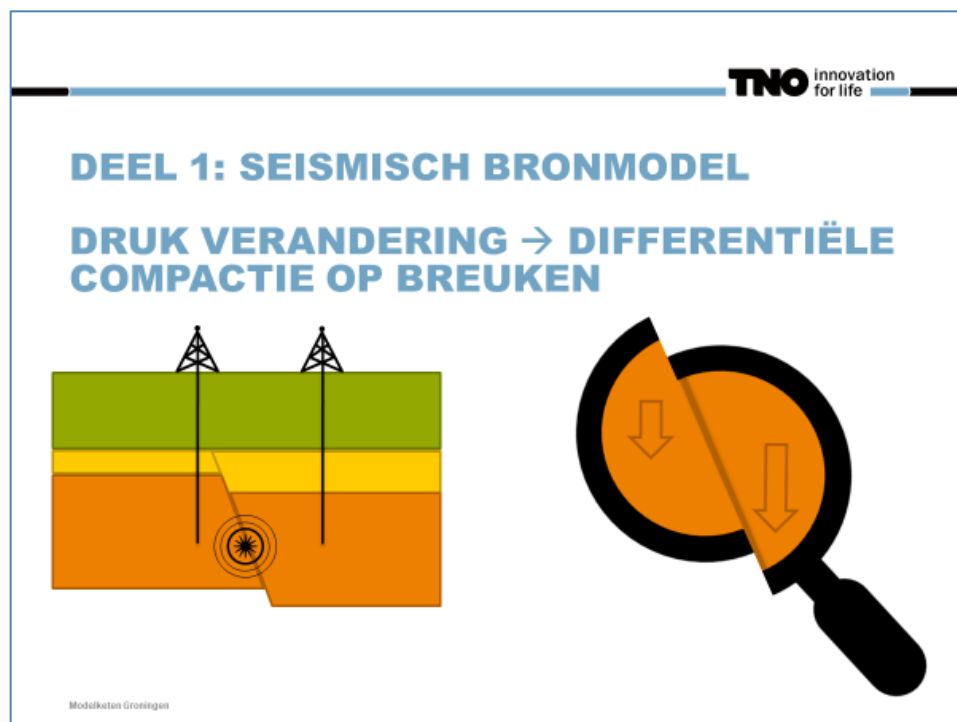
In deze bijlage wordt een omschrijving gegeven van de TNO modelketen. Dit betreft opzet van de modelketen, de aanpassingen aan de modelketen voor gebruik in de typologieaanpak en de invoergegevens die gebruikt zijn om tot de typologie vlekkenkaarten te komen.

A.1 Opzet van de modelketen

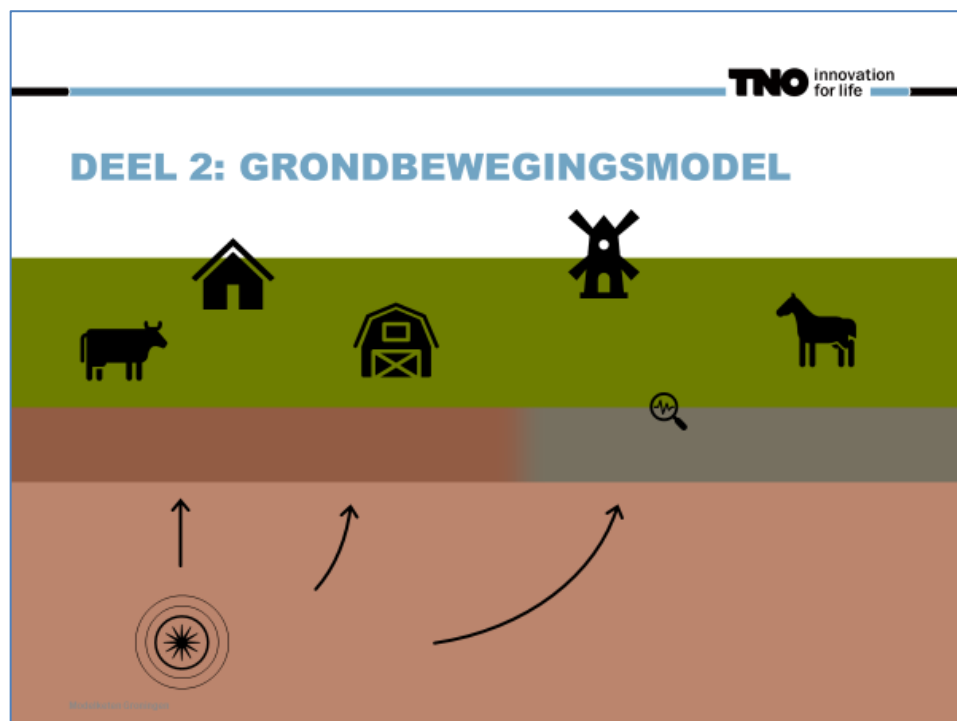
In deze bijlage wordt beknopt omschreven op welke wijze de gebruikte rekenmodellen in de modelketen zijn opgebouwd en gekoppeld. Dit wordt gedaan aan de hand van de omschrijving van de TNO modelketen in de vorm van een stappenwijze presentatie op hoofdlijnen. Voor een meer uitgebreide omschrijving wordt verwezen naar [TNO, 2020a].



Dit overzicht geeft een algemene omschrijving hoe de TNO modelketen werkt en uit welke schakels deze bestaat. De modelketen bestaat uit drie delen die hieronder worden beschreven.

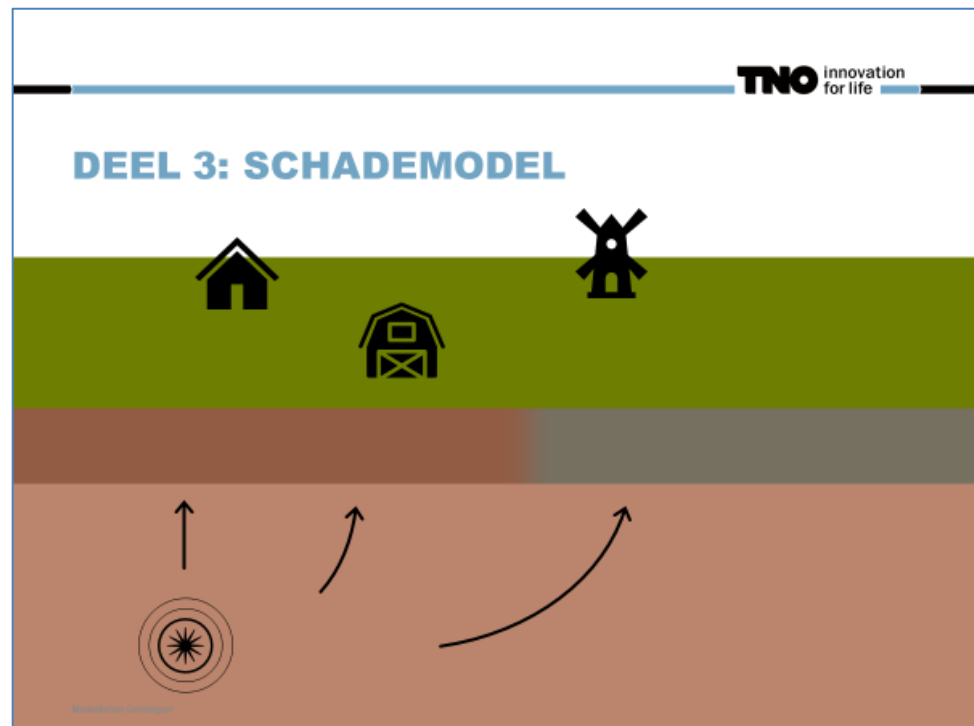


Het seismologisch model beschrijft op basis van de gasproductie het proces van drukverandering naar compactie van het gasreservoir. Er treedt afschuiving op langs aanwezige breuken, indien dit schoksgewijs gebeurt ontstaat een aardbeving.



Een aardbeving in de diepe ondergrond genereert golven in de bodem en deze bereiken via bodemlagen het oppervlak. In de bodem treden meerdere effecten op die worden gemodelleerd in het bodembewegingsmodel.

Resultaat na deze stappen zijn voor elke locatie in Groningen de trillingsniveaus die kunnen optreden met bijbehorende kans op overschrijding van deze niveaus. Dit is de seismische dreiging (hazard). De webtool van de NPR 9998 is gebaseerd op dezelfde typen berekeningen als in deze eerste delen van de modelketen.



Om vast te stellen in welke mate gebouwen bestand zijn tegen de optredende trillingen is een gebouwschademodel (gebouwkwaetsbaarheidsmodel) geïmplementeerd.

Voor de bepaling van het individueel risico is het van belang te omschrijven welke bezwijkmechanismes kunnen leiden tot potentieel dodelijke slachtoffers (individueel risico). Voor de gebouwsterkte wordt onderscheid gemaakt in de volgende bezwijktoestanden:

- 1: Falen van een beperkt deel van het gebouw;
- 2: Instorting van een groter deel van het gebouw;
- 3: Totale instorting van het gebouw.

Per bezwijktoestand kan een kans op dodelijke slachtoffers worden toegekend. Voor elk van deze bezwijktoestanden kunnen 1 of meerdere faalmechanismes worden geïdentificeerd. Per faalmechanisme kan worden vastgelegd bij welk niveau van seismische belasting dit op kan treden. Dit wordt in termen van kansen beschreven in de vorm van kwetsbaarheidskrommen (fragility curves). Het individueel risico wordt berekend door per bezwijktoestand een kans op overlijden te definiëren. Uit de kans op optreden van de bezwijktoestand en deze kans op overlijden gegeven de bezwijktoestand wordt het risico bepaald. Het totale risico is gelijk aan de som van de risicobijdragen uit elk van de vier bezwijktoestanden.

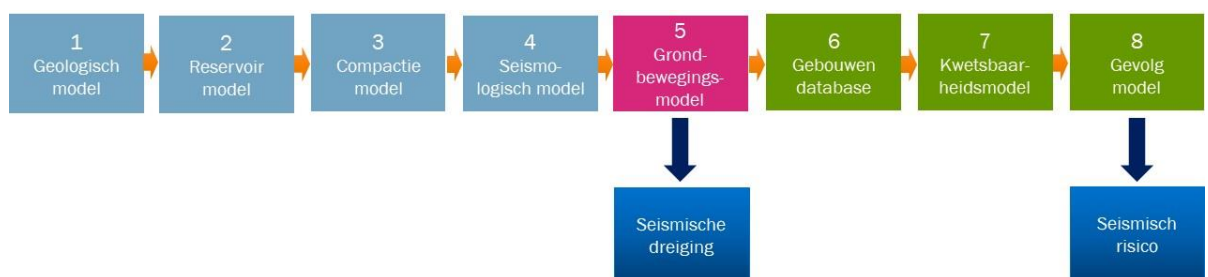
A.2 Aanpassingen modelketen ten behoeve van de typologieaanpak

De TNO modelketen is in opdracht van het Ministerie van EZK ontwikkeld om risicoberekeningen te kunnen uitvoeren om de consequenties van toekomstige winningsplannen voor Groningen in kaart te brengen. Deze risicoberekeningen worden de Seismische Dreiging en Risico Analyse (SDRA) genoemd.

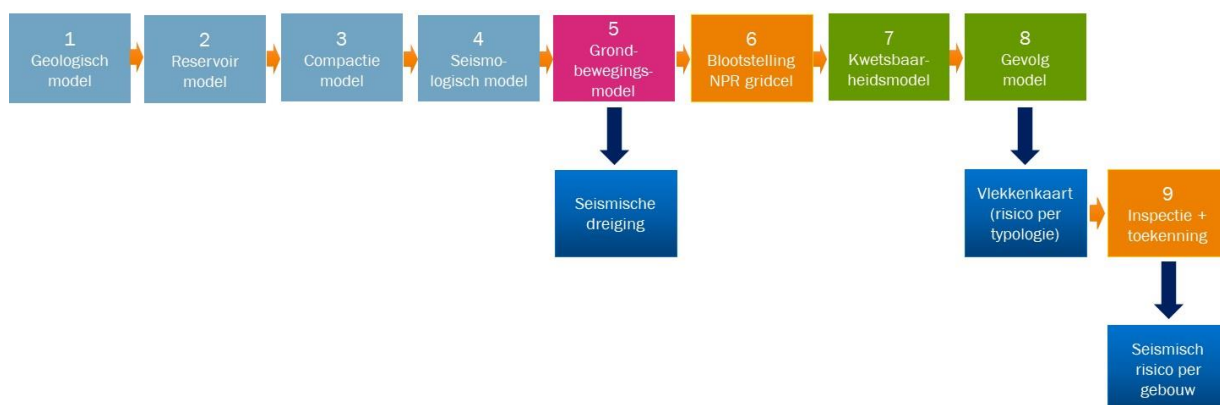
De ontwikkeling van de modelketen volgt de opbouw van de door NAM uitgevoerde *Hazard and Risk Assessment* (HRA). Deze opbouw is bedoeld om op regionaal niveau het risico te bepalen.

De TNO modelketen wordt in de vorm van deze HRA niet geschikt geacht voor de beoordeling van de veiligheid van individuele gebouwen in Groningen. De reden is dat in de modelketen specifieke informatie van individuele gebouwen ontbreekt. TNO heeft binnen de ontwikkelde typologieaanpak haar modelketen daarom op onderdelen zodanig aangepast dat een gebouwspecifieke beoordeling van de veiligheid mogelijk is binnen de kaders van NPR 9998. De NPR 9998 staat een volledig probabilistische aanpak van de veiligheid toe, op basis waarvan een rechtstreekse beoordeling van het risicocriterium (de Meijdam norm voor het individueel risico) mogelijk is. Tevens hebben de aanpassingen in de TNO modelketen de potentie de veiligheidsbeoordeling van *versterkte* gebouwen uit te voeren. De specifieke aanpassingen aan de TNO modelketen ten behoeve van de typologieaanpak worden hierna beschreven.

De TNO modelketen zoals gebruikt in de SDRA is opgebouwd uit 8 modules die in Figuur A.6 schematisch zijn weergegeven. De modelketen met aanpassingen zoals gebruikt voor de typologieaanpak is weergegeven in Figuur A.2. Module 1 tot en met 4 vormen samen het Seismologisch Model (SMM) zoals hiervoor besproken. Module 5 is het bodembewegingsmodel (Ground Motion Model, GMM). Het seismologisch- en bodembewegingsmodel tezamen bepalen de seismische dreiging. De seismische dreiging is opgenomen in de Webtool bij NPR 9998. Modules 1 tot en met 5 zijn in de typologieaanpak ongewijzigd en TNO gebruikt hierbinnen dezelfde keuzes voor de modelversies en inputparameters als in vigerende versie van de NPR Webtool, zie Bijlage A.3. Het is mogelijk in zeer korte tijd na een besluit over te gebruiken modelversies en invoergegevens een aangepaste risicoberekening met de modelketen uit te voeren.



Figuur A.6: Schematisch overzicht van de TNO modelketen zoals gebruikt in de SDRA



Figuur A.6: Aangepaste TNO modelketen ten behoeve van de typologie gebaseerde beoordeling van de veiligheid. De seismische dreiging komt nauw overeen met de NPR 9998 webtool.

De modules 6, 7, 8 en 9 omvatten de bovengrondse effecten van aardbevingen. De eigenschappen van gebouwen, de wijze waarop deze bezwijken en de gevolgen van dat bezwijken zijn in deze modules beschreven. In dit deel van de keten zijn er binnen de typologieaanpak aanpassingen gemaakt, zie Figuur A.1 en A.2.

De grootste aanpassing is dat in de SDRA gebruik wordt gemaakt van een exposure database (module 6) en in de typologieaanpak niet. Deze exposure database (gebouwen database) zoals gebruikt in de SDRA koppelt één of meerdere NAM- kwetsbaarheidsklassen (vergelijkbaar met een typologie) aan adressen. Door het toepassen van zogenoemde '*inference rules*' wordt ten behoeve van de HRA per adres een kans toegekend dat een bepaalde kwetsbaarheidsklasse past bij dat adres. Op deze wijze komen er in de gebouwendatabase adressen voor die aan 2, 3 of zelfs meer kwetsbaarheidsklassen worden toegekend. Voor de meeste gebouwen uit deze database zijn geen bouwkundige opnames uitgevoerd om één kwetsbaarheidsklasse per adres met zekerheid te kunnen vaststellen. Verder zijn in de gebouwendatabase *alle adressen* op deze wijze aan ten minste 1 kwetsbaarheidsklasse toegekend. In de gebouwendatabase (module 6 in Figuur A.6 wordt geen rekening gehouden met de werkelijke bouwkundige staat van de gebouwen. Gebouwen met ernstige schade (die zich manifesteert door scheefstand en/of scheuren in metselwerk) worden net zo behandeld als vergelijkbare gebouwen die onbeschadigd zijn. Er zijn geen uitzonderingen gedefinieerd. Voor een globale risico-inschatting is dit voldoende, voor een individuele risicoboordeling is dit echter niet acceptabel. Daarnaast brengt het gebruik van een exposure database het probleem met zich mee dat de typologie per adres bekend moet zijn voorafgaand aan de risicoberekening. In de typologieaanpak wordt dit vermeden door het gebied op te delen in gridcellen, en op iedere gridcel een gebouw van iedere typologie te beschouwen. Dit is een aangepaste module 6, zoals weergegeven in Figuur A.6. Voor het grid wordt hier hetzelfde grid gebruikt als in de NPR webtool. Voor alle gridcellen wordt voor iedere typologie het risico berekend op basis van de kwetsbaarheidskrommen (module 7) en het gevolgmodel (module 8). Zo ontstaat een vlekkenkaart per typologie met cellen waar het risico voor deze typologie voldoet of niet voldoet (de vlek) aan de veiligheidsnorm. Inspectie en toekenning (module 9) kan plaatsvinden voor een gebouw op een specifiek adres nadat de

typologie vlekkenkaarten bepaald zijn. Indien een typologie kan worden toegekend, kan voor de gridcel waarin dit adres zich bevindt, bepaald worden of dit specifieke gebouw voldoet aan de veiligheidsnorm.

Bovenstaande is de grootste aanpassing ten opzichte van de HRA. Module 9 is in feite geen rekenmodule in de modelketen maar wordt uitgevoerd door de praktijk: gebouwinspecties en toekenning voor specifieke adressen. Modules 7 en 8, het kwetsbaarheids- en gevolgmodel, zijn in de typologieaanpak qua implementatie identiek aan de HRA. Echter de parameters voor deze modellen verschillen, omdat voldoende marge gegarandeerd moet worden om de gebouw-gebouw variatie binnen een typologie af te dekken om individuele beoordeling mogelijk te maken.

Samenvatting aanpassing modelketen ten behoeve van de typologieaanpak

In tegenstelling tot de SDRA is de typologie aanpak zo uitgewerkt dat deze geldig is voor de beoordeling van individuele gebouwen. De aanpassingen zijn hiervoor beschreven en kunnen samengevat worden in vier punten waarop de typologie aanpak verschilt van de SDRA:

1. Er wordt in detail per typologie vastgesteld wat de gebouw-tot-gebouw variatie en modelonzekerheid zijn en er wordt voor gezorgd dat er voldoende marge in rekening wordt gebracht. Hierdoor zijn de berekeningsresultaten van toepassing op alle gebouwen die binnen een typologie vallen (Aanpassing parameters voor de kwetsbaarheids-krommen en het gevolgmodel, modules 7, 8 in Figuur A.6 en Figuur A.6).
2. Er wordt geen gebruik gemaakt van een exposure database maar van vlekkenkaarten. Door toepassing van bouwkundige opnames per gebouw is van individuele gebouwen precies bekend tot welke typologie ze behoren (aanpassing van module 6 en om een vlekkenkaart op het NPR grid te berekenen, zie Figuur A.6).
3. Het kan voorkomen dat er op basis van de opname zoals beschreven onder punt 2 geen typologie toe te kennen valt aan een gebouw en dat daarom individuele beoordeling nodig is (toevoeging module 9, de verbinding met de praktijk: inspectie+toekenning).
4. In de typologie aanpak wordt rekening gehouden met de bouwkundige staat die moet blijken uit de bouwkundige opname. Criteria hiervoor zijn uitgewerkt in het rapport over typologietoedeling en uitsluitingsgronden [TNO, 2021b].

De bouwkundige opname zoals genoemd onder de punten 2), 3) en 4) bepaalt in feite of een gebouw binnen de gestelde marges valt van punt 1).

Indien noodzakelijk geacht kan een risicogradatie worden toegepast in de vlekkenkaarten (bijvoorbeeld door aan te geven in welke cellen het risico groter is dan $1 \cdot 10^{-5}$, $2 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$ etcetera). Hiermee zou het mogelijk moeten zijn te differentiëren naar type maatregelen die volstaan om het risico voldoende te verlagen. Zware maatregelen bij een hoog risico, minder zware maatregelen bij een lager berekend risico. Dit is door TNO niet nader uitgewerkt.

A.3 Keuze inputscenario's voor de modelketenberekeningen voor de typologie vlekkenkaarten

De berekeningen voor de vlekkenkaarten per typologie zijn uitgevoerd met de TNO modelketen [TNO, 2020a]. TNO heeft controleberekeningen uitgevoerd voor alle deelmodellen van de modelketen en het KEM panel heeft de modelketen in zijn geheel gereviewed [TNO, 2019], [TNO, 2020b], [KEM, 2020]. Daarnaast is de broncode regel voor regel gecontroleerd door [Tessella, 2020].

Voor ieder deel van de modelketen zijn verschillende keuzes mogelijk voor modelversies om tot de typologie vlekkenkaarten te komen. Deze keuzes betreffen:

- het gasproductie scenario;
- het seismologisch model;
- het bodembewegingsmodel;
- het model voor de kwetsbaarheidsfuncties en het gevolgmodel voor de typologieën.

Voor de typologie vlekkenkaarten is door EZK aan TNO gevraagd om voor de seismische dreiging, de eerste drie bullets, uit te gaan van dezelfde uitgangspunten als die ten grondslag liggen aan de NPR webtool 2020, [NEN, 2021].

Met dit uitgangspunt sluit TNO aan bij door NCG gebruikte en ook in het bestuursakkoord van 6 november 2020 vastgelegde uitgangspunten voor beoordelingen. Deze uitgangspunten zijn niet typologie afhankelijk. De invoergegevens voor de kwetsbaarheid en de modellering van de gevolgen (de laatste bullet) worden per typologie uitgewerkt. Deze zijn gerapporteerd in de typologiespecifieke rapportages waarbij ook de door ACVG geadviseerde marge is meegenomen.

Hierna wordt nader ingegaan op ieder van die keuzes. Voor een diepgaander beschrijving wordt verwezen naar het achtergrondrapport van de NPR webtool 2020 [NEN, 2021] en het TNO advies voor modelketenkeuzes [TNO 2020c].

Gasproductiescenario

Op basis van het kabinetsbesluit wordt de gasproductie binnen de periode 2020-2023 van 12 bcm naar vrijwel nul teruggebracht [MEZK, 2018a/2018b]. Gasunie Transport Services (GTS) heeft in januari 2020 advies gegeven over de te leveren gasvolumes in deze periode [GTS 2020]. Op verzoek van EZK [MEZK, 2020a] heeft NAM twee operationele strategieën uitgewerkt voor de productie van gas in deze periode, te weten Operationele Strategie 1 (OS1) en Operationele Strategie 2 (OS2). OS1 is een voortzetting van de productiestrategie uit gasjaar 2019-2020, terwijl in OS2 het productiecluster Bierum, in het Noorden van het gasveld, niet, of zo laat mogelijk, ingezet wordt.

In het achtergrondrapport van de NPR webtool 2020, [NEN, 2021] staat:

“Na adviezen van diverse organisaties heeft de minister van EZK in juni 2020 gekozen voor OS2, waar de berekeningen van de update van de NPR in 2020 op zijn gebaseerd (Wiebes, [MEZK, 2020b]). In de scenario's is sprake van een koude, gemiddelde en warme winter. In de update van de NPR webtool is gekozen voor een gemiddeld winter scenario.”

Deze Operationele Strategie 2 (OS2) gasproductie met gemiddeld winter scenario is derhalve ook gebruikt in de risicoberekeningen voor de typologie vlekkenkaarten.

Seismologisch bronmodel (SSM)

Het SSM vertaalt de effecten van de productie van gas uit het Groningen gasveld naar de verwachte aantallen aardbevingen (activity rate) en de verhouding tussen de magnitudes van bevingen die horen bij deze verwachte aantallen.

Voor de modelketenberekeningen ten behoeve van de typologieaanpak wordt aangesloten bij de uitgangspunten in de NPR webtool. De NPR webtool [NEN, 2021] is gebaseerd op door NAM en KNMI uitgevoerde berekeningen op basis van het SSM V6 model ([Bourne & Oates, 2019, 2020]); hierin zijn alle bevingen tot 2018 meegenomen in de kalibratie. Dit V6 bronmodel bevat twee submodellen: het SSM V6-M7 model en het SMM V6-M11 model die via een logic tree gewogen meegenomen worden. Het V6-M7 submodel is een update van het model dat in de SSM V5 versie is gebruikt. Het SMM V6-M11 submodel levert een verminderde kans op hoge magnitude aardbevingen, ten opzichte van de gebruikelijke Gutenberg-Richter verdeling. Deze vermindering van kans begint bij de hoogste magnitudes die tot op heden geobserveerd zijn in Groningen, en wordt steeds sterker voor nog hogere magnitudes. Dit model levert een lagere dreiging vergeleken met het V6-M7 submodel.

In de risicoberekeningen voor de typologie vlekkenkaarten is omwille van de consistentie met de NPR webtool de keuze van de NPR webtool 2020 overgenomen en is gebruik gemaakt van het V6 SSM met weging 100% voor het M7 model en 0% voor het M11 model.

Binnen het V6 bronmodel wordt gebruik gemaakt van het breukenmodel [Bourne & Oates, 2018] en ook van de 7 punts $M_{\max}$ verdeling volgens de expert $M_{\max}$ workshop, [Coppersmith et al, 2016]. Deze zijn ook in de NPR webtool 2020 toegepast [NEN, 2021].

Bodembewegingsmodel (GMM)

Het bodembewegingsmodel voor Groningen is in de afgelopen jaren verder ontwikkeld naar V6 (laatste gepubliceerde versie in [Bommer et al, 2019]). De versies onderscheiden zich door een verdere ontwikkeling in het onderzoek (voortschrijdend inzicht), bijvoorbeeld de verbeterde karakterisatie van de ondergrond, het toevoegen van magnitude en afstandsafhankelijkheid van amplificatiefactoren en modellering van bevingen langs een breuk in plaats van een punt. Bovendien zijn er data toegevoegd van nieuwe opgetreden bevingen. Vanaf V4 hebben de GMMs eenzelfde structuur. TNO heeft aanbevolen om V6 te gebruiken [TNO 2020c]. Een studie voor KEM [Besseling et al, 2020] heeft laten zien dat het V6 bodembewegingsmodel de waarnemingen van opgetreden bevingen beter beschrijft dan het V5 model dat in veel gevallen een onderschatting laat zien ten opzichte van de waarnemingen.

Ook in de NPR webtool 2020 is gebruik gemaakt van het V6 bodembewegingsmodel [NEN, 2021] en daarom is deze keuze overgenomen in het typologieproject.

Correlatiestructuur in het bodembewegingsmodel

Het bodembewegingsmodel V6 schrijft een correlatiestructuur voor tussen spectrale periodes [Bommer et al, 2019]. TNO [TNO 2020b, 2020c] heeft geconstateerd dat

NAM in alle HRA analyses binnen het bodembewegingsmodel deze correlatie tussen spectrale perioden toe heeft gepast op zowel NS_B niveau (ca. 800m diepte) als in de site response van NS_B tot maaiveld. Het bodembewegingsmodel V6 [Bommer et al, 2019] schrijft deze correlatie uitsluitend op NS_B niveau voor en schrijft voor dat er geen correlatie is tussen spectrale perioden in de site response.

Deze keuze voor deze correlatie heeft geen invloed op de NPR hazard, omdat de NPR Uniforme Hazard Spectra oplevert die tot stand gekomen zijn door spectrale periodes los te beschouwen (marginale distributie). Welke keuze ook gebruikt wordt voor de correlatiestructuur tussen spectrale periodes, de Uniforme Hazard Spectra blijven er ongewijzigd door.

In de risicoberekeningen, zoals voor het typologieproject, leidt het weglaten van de correlatie tussen spectrale perioden in de site respons tot een ca 40% lager risico in het centrumgebied [TNO 2020c]. TNO vindt dat de argumenten voor het weglaten van correlatie in de site response vooralsnog onvoldoende onderbouwd zijn [TNO 2020c]. Voor het berekenen van de typologie vlekkenkaarten is gekozen om de correlatiestructuur zowel op NS_B niveau als in de site respons toe te passen, omdat dit een conservatieve optie is en volgens het oordeel van TNO vooralsnog de beste.

Kwetsbaarheidsfuncties en gevolgmodel (FCM)

Kwetsbaarheidsfuncties geven de kans op instorten van een gebouw bij een gegeven bodembeweging en het gevolgmodel geeft de kans op overlijden gegeven instorting. De structuur van het kwetsbaarheidsmodel en gevolgmodel in het typologieproject is hetzelfde als die van de V6 en V7 modellen van [Crowley et al, 2019/2020]. Binnen het typologieproject is per typologie bepaald welke inputparameters voor de kwetsbaarheidsfuncties en gevolgmodel voldoende marge bieden voor het individueel beoordelen. Dit is beschreven in de rapporten van de uitwerking van de typologieën. Daarnaast heeft validatie van deze parameterset plaatsgevonden door het ACVG en in sommige gevallen heeft het ACVG een extra marge geadviseerd ten behoeve van de implementatie in de praktijk. Dit is in de typologiespecifieke rapporten beschreven, en binnen de opgeleverde vlekkenkaarten verwerkt.

Samenvatting

Onderstaande tabel toont het overzicht van gebruikte modelketen instellingen voor de typologie vlekkenkaarten opgeleverd in mei 2021:

Model	Modelketen keuze voor typologie vlekkenkaarten d.d. voorjaar 2021
Productie scenario	Operationele strategie 2. ¹
Seismologisch model (SSM)	Versie 6 met 100% weging voor het M7 model en 0% voor het M11 model ^{1, 2}
Bodembewegings model (GMM)	Versie 6 ¹ , waarbij de period-to-period correlaties aan het maaiveld zijn aangezet ²
Kwetsbaarheid functies en gevolgmodel (FCM)	Conform TNO typologie rapportages aangevuld met ACVG waarborg

¹ Deze keuze is in lijn met de NPR webtool [NEN, 2021]

² Dit is naar verwachting een conservatieve keuze.

Het risico op aardbevingen neemt in de tijd af vanwege de afname van de gasproductie. Daarmee neemt ook de grootte van de vlekken af. In overleg met EZK is bepaald dat de vlekkenkaarten geproduceerd worden voor het tijdvak t5 volgens de NPR webtool 2020. Dit betreft de twee gasjaren 2021/2022 en 2022/2023 [NEN, 2021]. Een gasjaar loopt van 1 oktober tot en met 30 september in het jaar erna. Gasjaar 2021/2022 loopt bijvoorbeeld van 1 oktober 2021 tot en met 30 september 2022.

Mogelijke toekomstige aanpassingen op basis van nieuwe inzichten

Voor de typologie-vlekkenkaarten schrijft EZK op dit moment voor uit te gaan van de hazard conform de NPR webtool. Na beschikbaar komen van de NPR webtool 2020 zijn er nieuwe inzichten verschenen en lopen er nog onderzoeken naar een aantal onderwerpen.

- De gasproductiescenario's zijn nog iets aangepast; de invloed daarvan op de hazard is zeer klein, zie [TNO, 2021a].
- TNO heeft het SSM V6 model nogmaals geïmplementeerd, waarbij een aantal andere implementatiekeuzes gemaakt zijn vergeleken met het SSM V6 model waarop de NPR webtool gebaseerd is. Door TNO is een kalibratie van deze implementatie van het SSM V6 model uitgevoerd waarin alle bevingen tot en met 2020 zijn meegenomen (in de NPR webtool is dit tot 2018). Dit gekalibreerde model levert een iets lagere hazard, zie [TNO, 2021a]; deze nieuwe informatie is echter op dit moment nog niet verwerkt in de NPR webtool.
- Op dit moment werkt een team van internationale deskundigen aan GMM V7 met verdere verbeteringen. Dit model is bij het schrijven van dit rapport nog niet beschikbaar.
- Er loopt nog internationaal onderzoek naar het gebruik van het SSM V6-M11 model dat een verkleinde kans op hogere magnitudes oplevert.
- Er wordt in opdracht van EZK een studie uitgevoerd door TNO op basis van de GMM site response analyse data van Deltares naar de te hanteren waarden voor de correlaties, de uitkomsten hiervan zijn op dit moment nog niet bekend.

B Achtergronden bij backbone curves

Coauteur: Dr.ir. F. Messali, TU Delft

B.1 Gebruik van EEM modellen voor de afleiding van backbone curves

Voor de uitwerking van typologieën wordt gebruik gemaakt van gekalibreerde niet-lineaire tijddomein berekeningen (NLTH, Non Linear Time History analysis) uitgevoerd door Arup. Per typologie wordt in de betreffende rapporten aangegeven welke de gebruikte referentiegebouwen zijn.

De resultaten van deze referentiegebouwen zijn door Eucentre geïnterpreteerd naar backbone curves die gebruikt worden voor het afleiden van de kwetsbaarheidskrommen. Dit is verder toegelicht in [Crowley et al, 2017; Crowley et al, 2019].

Aanvullend op bovenstaande berekeningen zijn door de TU Delft validatieberekeningen gedaan naar de juistheid en aanvaardbaarheid van bovengenoemde Arup berekeningen. Deze worden per typologie in de typologiespecifieke rapporten besproken.

NLTH berekeningen zijn uitgevoerd door Arup in LS-Dyna. Voor de modellering van het metselwerk is een nieuw materiaalmodel ontwikkeld; de validatie daarvan is gerapporteerd in [Arup, 2016] in het 'LS-DYNA Validation Booklet'. Deze validatie is door TNO beoordeeld. Voor de verschillende relevante optredende faalmechanismen wordt het gebruikte model als state-of-the art gezien. Voor zowel in-het-vlak en uit-het-vlak gedrag van metselwerk wanden laat de kalibratie zien dat de mechanismen als voldoende correct kunnen worden gezien.

De validatieberekeningen van de TU Delft zijn uitgevoerd in Diana waarbij kalibratie aan triltafeltesten heeft plaatsgevonden, dit voor zowel in-het-vlak als uit-het-vlak gedrag.

In de door Arup uitgevoerde berekeningen is gebruik gemaakt van in totaal 11 aardbevingssignalen (van oplopende intensiteit) die als representatief worden beschouwd voor de mogelijk optredende signalen. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de belasting in beide hoofddraagrichtingen van de constructie. Per richting en per berekening is de maximale verplaatsing ter plaatse van de zolderverdieping en de maximaal optredende dwarskracht ter hoogte van de begane grond vloer tijdens de berekening (net voor falen) gerapporteerd, deze maken het mogelijk een zogeheten backbone curve te formuleren. Per berekening is gerapporteerd wat de effecten zijn op het gebouw. Deze effecten verschillen per signaal van geen effect (het gebouw blijft intact) tot aan volledige instorting met per berekening bepaalde percentages volumeverlies. Dit is de input naar het gevolgmodel.

B.2 Beschrijving EEM modellen

In deze paragraaf worden de aannames zoals gebruikt door Arup en de TU Delft toegelicht voor vooral de metselwerk modellen. Ook wordt aandacht besteed aan de overeenkomsten en verschillen met de aanpak zoals deze bij NEN Module 3 in het kader van de NPR 9998 ontwikkeling in 2020 is gevolgd [1]. Het vervolg van deze paragraaf is in het Engels. De daarin voorkomende referentie zijn opgenomen in de referentielijst aan het eind van bijlage B. Voor de onderscheiden typologieën wordt verwezen naar [TNO, 2021b].

B.2.1 Analyses performed per typology

This section summarizes the analyses performed by TU Delft for METSELWERK 1, 2, 3, 5, 6 and 7 in support of the Typology project and by Arup in support of the NAM Hazard and Risk (HRA) team's seismic risk assessment for the Groningen province (and then used for the Typology approach).

B.2.1.1 Analyses performed by TU Delft

The following analyses were performed by TU Delft:

- Nonlinear pushover (NLPO) analyses with the finite element software package Diana FEA 10.3 and 10.5 for the typologies METSELWERK1 and METSELWERK2. The main scope of these analyses is to determine the governing failure mode, the maximum force capacity (normalized with respect to the effective mass), the crack pattern at failure, and the hysteretic behaviour for the buildings belonging to these two typologies.
- NLPO analyses with the simplified method SLAMA for typologies METSELWERK1 and METSELWERK2. The main scope of these analyses is to determine the near collapse (NC) displacement for the buildings belonging to these typologies. The NC displacement is estimated by the calibrated equations provided in NPR 9998:2020, and a correction factor equal to 1.77¹ is applied in order to consider the mean capacity (and not the 5th percentile as in the Dutch guidelines).
- Nonlinear time-history analyses (NLTHA) with the finite element software package Diana FEA 10.3 and 10.5 for the following typologies and goals:
 - o METSELWERK1: two sets² of 7 NLTHA are run to study the vulnerability to the out-of-plane collapse of the transversal walls in the terraced houses belonging to this typology;
 - o METSELWERK3: a set of 7 NLTHA is run to compare the different seismic behaviour of a terraced house with timber and concrete floors;
 - o METSELWERK5: a set of 7 NLTHA is run to compare the different seismic behaviour of a self-standing house with double-wythe solid walls and cavity walls;
 - o METSELWERK6: a set of 7 NLTHA is run to compare the different seismic behaviour of a self-standing house with a timber and a concrete floor;

¹ Such value is obtained from [2], as ratio between the values of the coefficient A derived for the 50th and the 5th percentile of the distribution of NC displacements of the masonry structural components.

² In general, each set of NLTH analyses comprehends 7 analyses which differ one another for the applied ground motion. Each ground motion presents different levels of PGA to allow the evaluation of the ultimate capacity of the buildings analysed.

- METSELWERK7: 16 sets of 7 NLTHA are run to characterize thoroughly the typology in terms of force and displacement capacity, and of governing failure modes.
- Nonlinear kinematic analyses (NLKA) and force based calculations of the peak cracking resistance (PCR), both in accordance to Annex H of NPR 9998:2020, are performed for typology METSELWERK5 to compare the out-of-plane capacity of single- and double-wythe walls.

All the finite element analyses made use of models calibrated against shake table tests performed at the laboratories of EUCENTRE and LNEC ([3]-[7]) on buildings similar to those analyzed.

B.2.1.2 Analyses performed by Arup

A number of analyses performed by Arup in support of two versions of the HRA study are considered: version 6 (V6) [8] and version 7 (V7) [9]. For each building typology one or more sets of NLTHA were performed to define the seismic behaviour of an index building (a real representative building from the region). In total, 11 ground motions were adopted for the NLTHA using explicit analysis with the commercial software LS-DYNA, to be applied on both the “weak” and “strong” directions of the building. The records presented increasing intensity with the purpose to cover both the elastic and the non-linear behaviour. The results of the NLTHA simulations were applied to develop backbone curves for simplified single-degree of freedom (SDOF) models.

From the V6 version of the HRA study [8] and the corresponding background calculation reports of Arup [10][11], the following analyses were used to define the seismic capacity for the typologies.

- METSELWERK2: the results for the index building Zijlvest25 (URM4L).
- METSELWERK3: the results for the index building Patrimoniumstraat (URM5L).
- METSELWERK4: the results for the index building Opwierderweg (Drive-In, URM3M_D).
- METSELWERK5: the results for the index building LNEC-BUILD (URM6L).
- METSELWERK6: the results for the index building Kwelder 1 (URM7L).
- METSELWERK7: the results for the index building Badweg12 (URM8L).
- METSELWERK10: the results for the index building Solwerderstraat 55 (URM2L).

From the V7 version of the HRA [9] and the background calculation reports of Arup ([10]-[12]), the following analyses were used for the Typology study :

- METSELWERK1: the results for the index buildings Julianalaan 52, E45 Schildwolde, Oostergoweg, Wilgenbos (URM3L).
- METSELWERK-D: the results for the index building Koeriersterweg (URM3M_U).
- METSELWERK-D: the results for the index building Schuitemzandflat 2-56 (URM3M_B).

B.2.1.3 Summary

The type of analyses performed for each typology according to B.2.1.1 and B.2.1.2 is listed in Table 1.

Table 1. Type of analysis performed for each building typology

Typology	Finite Element Analyses		Simplified methods	analytical
	NLPO	NLTH	SLaMA	NLKA/PCR
METSELWERK1	X	X ◇	X	
METSELWERK2	X	✓	X	
METSELWERK3		X ✓		
METSELWERK4		✓		
METSELWERK5		X ✓		X
METSELWERK6		X ✓		
METSELWERK7		X ✓		
METSELWERK-D		◇		
		◇		
METSELWERK10		✓		

X = analyses performed by TU Delft; ✓ = analyses performed by Arup (V6); ◇ = analyses performed by Arup (V7).

B.2.2 Assumptions for the creation of the models and the post-processing of the analyses

In the following sections, the different assumptions made by TU Delft and Arup are compared to the corresponding ones made for the project NEN Module 3. Note that for this latter project only the micro-modelling NLTHA (performed indeed by TU Delft and Arup) are considered, in order to have a comparison between analyses with the same level of complexity and expected accuracy. The comparison is presented in tables, and the most relevant similarities and differences are discussed below each table. When the approaches followed by TU Delft and Arup differ, they are presented separately in the table. Conversely, when they match only one description is provided.

B.2.2.1 Material properties

Applied for typology properties	NEN Module 3
Use of average material properties as provided in Table F.2 of NPR 9998:2020. $f_d = f_{m,NPR}$	Use of average material properties as provided in Table F.2 of NPR 9998:2020, and application of the correction factors defined in the ABSC document [13]. $f_d = f_{m,NPR} * CF$ For the four buildings considered, excellent properties are considered, which means that a correction factor equal to 1 is used.

For the considered buildings no practical differences are found between the approach used by TU Delft for the typology project and that used in NEN Module 3. It should be noted that the correction factors recommended in the ABSC document [13] can in general reduce the values of the material properties with respect to the

mean values recommended by NPR 9998:2020, but this did not occur for the buildings analysed for NEN Module 3.

B.2.2.2 Diaphragms

Cast-in-situ reinforced concrete diaphragms

Typology project	NEN Module 3
TU Delft: The reinforced concrete (RC) floors are simulated via shell elements with linear elastic isotropic behaviour.	The RC floors are simulated via shell elements with nonlinear behaviour, for which cracking of the concrete and yielding of the reinforcement are allowed.
Arup: The RC floors are simulated via shell elements with non-linear behaviour, for which cracking of the concrete and yielding of the reinforcement are allowed.	

The models used for NEN Module 3 allowed for damage and failure of the diaphragms, but no significant nonlinear behaviour of the floors was observed. Overall, the strategy adopted for the typology approach (although simplified for TU Delft) did not lead to different outcomes.

Hollow core slabs

Typology project		NEN Module 3
TU Delft: No hollow core slabs are present in the buildings modelled by TU Delft for the Typology project.		TU Delft: Continuous layered shell elements are used to simulate the slabs. The layers allow to define the change in geometry throughout the thickness (the slab section is divided in layers throughout the thickness and a different width is assigned to each layer). The pre-stressing steel, present at top and/or bottom of the section, is modelled via two sheets representing the reinforcement having a negative/positive offset from the middle section of the slab. The steel grade used in the model is based on the inspection report of the building

Arup: The hollow core slab is modelled with layered shell elements. The layers allow to define the change in geometry throughout the thickness (the slab section is divided in layers throughout the thickness and a different width is assigned to each layer). The pre-stressing steel, present at top and/or bottom of the section, is modelled as one layer of the section, with different material properties. The steel grade used in the model is based on the inspection report of the building. Discrete beams with non-linear friction based behaviour are used between adjacent slabs and between the concrete and the masonry walls, as shown in Figure 1.		Arup: The same approach used for the calculations in support to the HRA is followed for NEN Module 3 too.
---	--	---

When the hollow core slabs are modelled, TU Delft follows a modelling approach similar to that of Arup (as discussed during the meetings of the project NEN Module 3). This approach allows to capture both stiffness and resistance of the floor due to the irregular geometry and of the presence of the reinforcement.

In addition to that, the models of Arup include nonlinear line elements between the slabs of the floor and between the floor and the walls, whereas TU Delft models do not; however, no failure at the supports or between the slabs of the floor was reported by Arup.

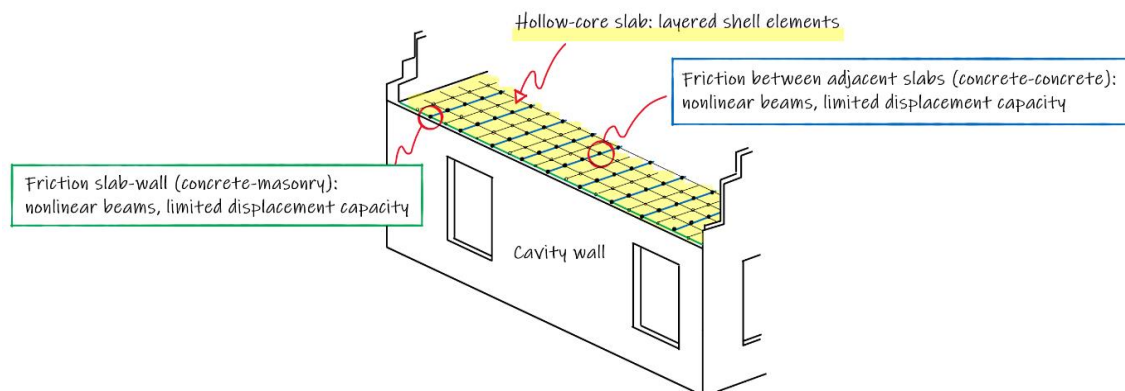


Figure 1. Schematic illustration of the modelling approach followed by Arup to model hollow core slabs

Timber diaphragms

Typology project	NEN Module 3
TU Delft: The flexible diaphragms (including beams and planks) are modelled via shell elements with orthotropic elastic behaviour, whose parameters are calibrated on the basis of the experimental tests performed at TU Delft in 2018 [14] and of the experimental shake table tests performed in EUCENTRE [4][7] and LNEC [5][6].	TU Delft: The flexible diaphragms (including beams and planks) are modelled via shell elements with orthotropic elastic behaviour, following the same approach used for the typology project.
Arup: Each component (beams and planks) of the diaphragm is modelled via elements with nonlinear behaviour. The constitutive models and the material properties are not specified in the background report but are expected to be selected on the base of the experience of Arup, also calibrated against past experimental tests.	Arup: Each component (beams and planks) of the diaphragm is modelled with the same approach used for the HRA study.

The approaches followed by TU Delft and Arup were the same for both projects. The modelling approach of Arup was more detailed, but it followed the same principles of that of TU Delft, which is described in the following paragraph. Below, the first phase of the calibration of the material properties selected by TU Delft against the experimental tests performed at component level at TU Delft in 2018 [14] is summarised in Table 2. The material parameters selected for the numerical analyses performed by TU Delft return an overall secant elastic stiffness lower than that measured experimentally. In other words, it is expected that the

selected values may lead to underestimate the correct stiffness of the diaphragms, rather than to overestimate it. The reason why the values of the numerical and experimental stiffness do not match, is that the values have been further refined in a second phase to improve the accuracy of the numerical predictions of the global behaviour of full-scale structures tested on the shake tables of EUCENTRE and LNEC.

Table 2. Secant stiffness of the diaphragm measured for an imposed displacement of 20 mm

K₂₀ (kN/mm)	Floor (load parallel to joists)	Floor (load perpendicular to joists)	Roof
Experimental tests*	0.41/0.55	0.11/0.11	0.07
Numerical analyses	0.30	0.05	0.03

* Two values are provided for the floors, since two tests are performed for each typology

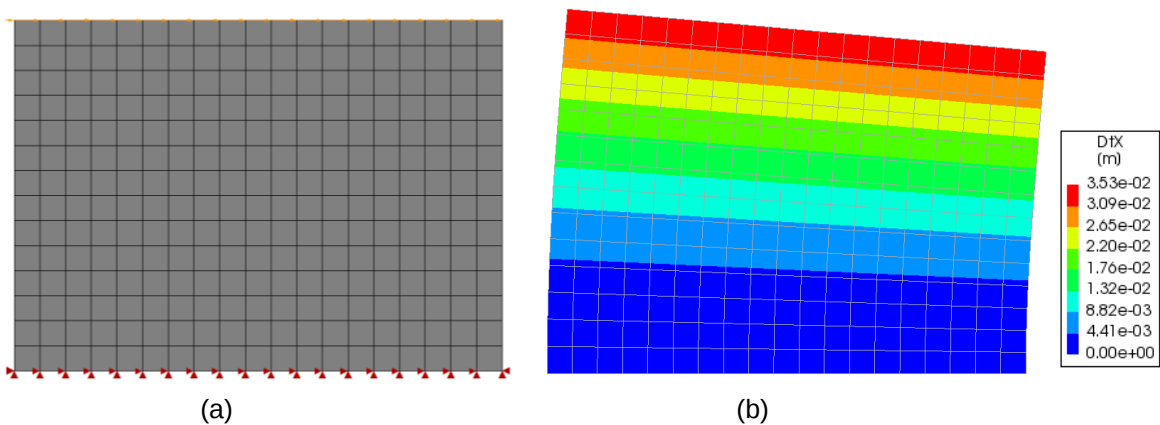


Figure 2. Numerical model used for the simulation of the experimental test performed on an unstrengthened roof (a) and displacements for a load of 1 kN applied at the top of the wall (b).

B.2.2.3 Connections

Timber-masonry connections

Typology project	NEN Module 3
TU Delft: Friction-based interface elements are used to simulate the connections between the timber beams and the masonry walls. The timber planks are disconnected from the walls. The forces in the connections are checked in the post-process phase. The effect of modelling the nonlinear behaviour of the connections (compared to rigid connections) is also evaluated.	TU Delft: Two different approaches are followed: • Building A: Perfect connections are assumed between the timber beams and the masonry walls. The timber planks are disconnected from the walls. The forces in the connections are checked in the post-process phase. • Building B: Friction-based interface elements are used to simulate the connections between the timber components and the masonry walls.
Arup: Friction-based interface elements are used to simulate the connections between the timber components and the masonry walls.	Arup: The same type of friction-based interface elements used for HRA study are adopted.

In the project NEN Module 3, TU Delft simulated the nonlinear behaviour of the connections for one building (Building B, a terraced house which would belong to typology METSELWERK1). Small nonlinear displacements were observed, which did not lead to any significant difference with respect to the case of perfect connections. The same is observed also for the analyses performed for the Typology project. The approach of Arup was consistent for both the projects and similar to that adopted by TU Delft, based on the use of friction-based interface elements.

Masonry-masonry connections

Typology project – TU Delft	NEN Module 3
A perfect connection is modelled between loadbearing masonry walls with running bond at corners. Friction based interface elements are used to model the connection in case of a continue vertical mortar joint (typical for calcium silicate element masonry)	A perfect connection is modelled between loadbearing masonry walls with running bond at corners. A row of elements with reduced material properties and able to reproduce limited tensile and shear capacity are used to model the connection in case of a continue vertical mortar joint (present between internal partition walls and loadbearing walls on the façades).
Arup: A detailed description of the assumptions made to model the inner walls is not provided in the background reports. It is expected that the same methodology adopted later for the NEN Module 3 project is followed (see right column).	

Although the solutions used by TU Delft to simulate the presence of a continuous vertical mortar joint were different (the one used for NEN Module 3 allowed for more stable solutions), they were largely similar and both allowed for capturing the nonlinear behaviour of the masonry-masonry connections. Specific information regarding the analyses of Arup is not found in the reports available, but the methodology adopted later for the NEN Module 3 project was presented as developed according to Arup's current LS-DYNA modelling standards, and for this reason it is likely that the same approach described in detail for the NEN Module 3 project is used also in the previous analyses.

B.2.2.4 Non-loadbearing partition walls

Typology project	NEN Module 3
TU Delft: No internal non-loadbearing partition walls are present in the buildings modelled by TU Delft.	The internal non-loadbearing partition walls are disconnected from the floor above them. The lateral connection with the loadbearing walls depends on the structural detail: perfect connection in case of running bond; a row of elements able to reproduce limited tensile and shear capacity in case of a continue vertical mortar joint.
Arup: A detailed description of the assumptions made to model the inner walls is not provided in the background reports. It is expected that the same methodology adopted later for the NEN Module 3 project is followed.	

The analyses of TU Delft are used only to define the capacity of the buildings at collapse state CS3, whereas the simulations of Arup are used also for the collapse states CS1 and CS2, to which the collapse of the non-loadbearing partition walls directly contributes to. Namely, the explicit simulations performed by Arup via the commercial software LS DYNA allow to trace the fall of debris and compute the percentage of the area covered by the latter. This percentage, called debris cover, is used in the fragility and consequence model as a metric to judge the extent of the collapse and divide between the partial (CS1, CS2) and full collapse. For this reason, this point regards specifically the modelling approach followed by Arup. Such approach is expected to follow the same methodology adopted later for the NEN Module 3 project, as described also at section B.2.2.3.

B.2.2.5 *Cavity walls*

Typology project	NEN Module 3
TU Delft: Only the inner leaf is explicitly modelled. The mass of the outer leaf contributes to the inertia forces acting on the inner leaf, but is not considered as stabilizing load (in other words, it contributes to the seismic demand but not to the stability).	TU Delft: The same modelling approach used for Typology project is adopted.
Arup: Both the leaves are modelled, as well as the wall ties which connect the leaves with nonlinear behaviour.	Arup: The same modelling approach used for HRA study is adopted.

The approaches followed by TU Delft and Arup were different but they were consistently maintained for the two projects. The approach followed by TU Delft conservatively considered the contribution of the outer leaf to the seismic inertia forces acting on the inner leaf but not to the stability of the cavity wall. That does not allow to assess the failure and collapse of the veneers. Such collapse was observed in the analyses performed by Arup, although that did not lead to the global collapse of the building since 20% of volume loss of the building was not exceeded.

B.2.2.6 *Global assessment criteria*

Typology project – TU Delft	NEN Module 3
TU Delft: The check of the NC limit state is based on the displacement capacity of the buildings computed via the SLAMA approach, as described in Section B.2.1.1 of this document. For the self-standing houses (METSELWERK5, METSELWERK6, METSELWERK7), the global behaviour of the buildings is governed by the predicted out-of-plane collapse of the façades, so that the check for the in-plane behaviour via SLAMA is not performed.	TU Delft: The indirect check of the NC limit state via deformation criteria (as indicated in section F.6.3 of NPR 9998:2020) is followed. Namely, the interstorey drift limit and the drift limit at the effective height provided in Table G.2 of NPR 9998:2020 are considered.
Arup: The analyses of Arup follow an explicit approach. For the explicit simulations, the debris cover (DC) is used to determine the entity of the collapse state (CS) observed for the individual simulations. This is a key input for the fragility (CS displacement thresholds)	Arup: Both the indirect check and the explicit check of the NC limit state are followed. The indirect check is as described above for TU Delft. The explicit check follows the recommendations provided in section

and consequence (probability of dying connected to a CS) model for the HRA V5, V6 and V7. Collapse states are divided in CS1, CS2 and CS3, where CS3 represents the full collapse.	F.6.2 of NPR 9998:2020, so that the NC limit state is met as long as none of 11 ground motions does return more than 20% of volume loss of the building.
---	--

From the data reported in [1], when a global failure mechanism governs the structural behaviour at NC, it can be observed that:

- Small differences are found between the assessments performed based on the indirect and the explicit compliance check procedure;
- the maximum displacements obtained via the SLAMA method are overall slightly smaller (and hence conservative) than those found by the NLTHA.

It is also reminded that a correction factor for the SLAMA analyses performed by TU Delft in accordance with the formulations provided in NPR9998:2020 was used to consider the mean capacity of the structural components (piers and spandrels) and not the 5th percentile as in NPR9998:2020.

Overall, a straightforward comparison between the two approaches is not possible, because different methods are used and with a different scope: the definition of the median displacement capacity at NC for the Typology approach (or the definition of a median backbone curve for the HRA study) and a compliance check according to the recommendations of NPR 9998:2020 for NEN Module 3. This explains the difference in terms of predicted capacity for similar buildings.

B.2.2.7 Local assessment criteria

Typology project – TU Delft	NEN Module 3
TU Delft: A wall is expected to collapse when the relative displacement of at least one point (computed with respect to the base support of the wall) exceeds 100% of the wall thickness. This is based on the interpretation of the results of the experimental tests performed by EUCENTRE on cavity walls (reported in [15]).	TU Delft: The indirect check of the NC limit state via deformation criteria (as indicated in section F.6.3 of NPR 9998:2020) is followed. Namely, a wall is expected to collapse when the relative displacement of at least one point (computed with respect to the base support of the wall) exceeds 60% of the wall thickness.
Arup: Local collapse of loadbearing and non-loadbearing walls is accounted for in the Arup simulations to determine the debris cover percentage at the end of the ground motion and hence to determine the entity of the collapse state (CS) observed for the individual simulations.	Arup: Both the indirect check and the explicit check of the NC limit state are followed. The indirect check is as described above for TU Delft. For the explicit check (§F.6.2 of NPR 9998:2020), the local collapse of an individual wall is taken into account only as contribution to the 20% of

	volume loss of the building, but it does not determine by itself the non-compliance of the NC limit state.
--	--

The following is observed:

- In the only building (Building C, terraced house) for which the capacity is limited by the local out-of-plane of a wall, the indirect check is significantly more conservative than the explicit check (the ratio between the capacities computed via the two different methods is 1.70), hinting that the threshold value used as limit for the out-of-plane displacement equal to 60% of the wall thickness as defined in Annex H (originally meant to be used for a NLKA) might be too conservative. However, this remark is based on a single case, and more case studies are needed to confirm or refute it. A recent memorandum [16] investigates the effect of the selection of 60% of the wall thickness as threshold limit for the out-of-plane near collapse displacement capacity on the global performance of the buildings studied by TU Delft for METSELWERK 7. The study shows that the effect of this variation reduces the capacity of the buildings; however, such reduction is within the expected overall variability of the results with the model uncertainty ($V = 0.35$) currently used.
- Gable walls often behave as cantilever walls when it is not properly connected to the roof or when the stiffness of the roof is too low to prevent large out-of-plane displacements at the top of the gable. In fact, for such configuration, an even stricter limit should be considered according to NPR 9998:2020, namely equal to 30% of the instability displacement (which corresponds to the thickness of the wall in most cases, depending on the boundary conditions). Such restrictive limit has not been considered in NEN Module 3 and nevertheless the indirect method resulted to be more conservative than the explicit method.
- For specific boundary conditions (e.g. with timber beams supported on top of the masonry walls), the threshold value provided by Annex H is smaller than 60% of the thickness of the wall. Also in this case, the stricter limit has not been considered, but conservative results were obtained nonetheless.

Similarly to the case of the global assessment criteria, a straightforward comparison is not possible due to the different scope of the projects. Nevertheless, on the one hand the remarks stated above suggest that the values currently recommended in Annex H to determine the local out-of-plane failure of a wall may be too conservative when used to predict the median capacity of the wall. On the other hand, more research would be needed to obtain a sound value from experiments to be used as threshold value in the numerical analyses.

B.2.3 Summary and conclusions

The comparison made between the approaches followed by TU Delft and Arup to perform the finite element analyses used in support to the Typology based project and those for the project NEN Module 3 highlights overall a high degree of similarity.

Specifically, as regards the input assumptions, TU Delft and Arup often follow different approaches (typically Arup creates more detailed models) but each approach is consistently maintained for the analyses used in the two projects. Besides, the outcomes of the analyses performed by Arup show that the

simplifications made by TU Delft for the modelling inputs seem not to affect the results significantly.

As regards the acceptance criteria at both global and local level, they differ due to the different scope of the projects: the analyses used in the Typology project aims to define the mean capacity of a building, whereas in the NEN project the compliance of a building with respect to the recommendations provided in NPR 9998:2020 is assessed and hence design values are used. The NEN design capacity values are therefore back-calculated to mean values or directly experimental outcomes are used, consistent with those used to define the design capacity of NPR 9998:2020.

Based on the previous remarks, it is concluded that the approach followed for the analyses used for the Typology project is reliable and consistent with that used for micro-modelling NLTH analyses for NEN Module 3.

Referenties bij Bijlage B:

- [1] Arup, BORG, TU Delft (2020). NEN Module 3 end conclusions. Concept version v02, 8 december 2020.
- [2] Messali, F., & Rots, J. G. (2018). In-plane drift capacity at near collapse of rocking unreinforced calcium silicate and clay masonry piers. *Engineering Structures*, 164, 183-194.
- [3] Graziotti, F., Tomassetti, U., Kallioras, S., Penna, A., & Magenes, G. (2017). Shaking table test on a full scale URM cavity wall building. *Bulletin of earthquake engineering*, 15(12), 5329-5364.
- [4] Kallioras, S., Guerrini, G., Tomassetti, U., Marchesi, B., Penna, A., Graziotti, F., & Magenes, G. (2018). Experimental seismic performance of a full-scale unreinforced clay-masonry building with flexible timber diaphragms. *Engineering Structures*, 161, 231-249.
- [5] Tomassetti, U., Correia, A. A., Candeias, P. X., Graziotti, F., & Costa, A. C. (2019). Two-way bending out-of-plane collapse of a full-scale URM building tested on a shake table. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(4), 2165-2198.
- [6] Kallioras, S., Correia, A. A., Graziotti, F., Penna, A., & Magenes, G. (2020). Collapse shake-table testing of a clay-URM building with chimneys. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(3), 1009-1048.
- [7] Miglietta, M., Mazzella, L., Grottoli, L., Guerrini, G., Graziotti, F. (2019). Full-scale shaking table test on a Dutch URM cavity-wall terraced-house end unit – EUC-BUILD-6. EUCENTRE report EUC160/2018U. Version 2.0, 07 March 2019.
- [8] Helen Crowley, Rui Pinho and Francesco Cavalieri. Report on the v6 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. March, 2019.
- [9] Helen Crowley, Rui Pinho, Report on the V7 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. 2020.
- [10] Arup (2017). Typology modelling for fragility development, 2017
- [11] Arup (2019). Typology Modelling - Analysis Results in Support of Fragility Functions - 2018-2019
- [12] Arup (2019). Typology Modelling: Analysis Results in Support of Fragility Functions – 2019 Batch Results, December 2019

- [13] De Vries, G., Paksoy, M. (2020). Applicatiedocument Beoordeling Seismische Capaciteit (ABSC). Draft report, v1.2, 4 September 2020
- [14] Mirra, M., Ravenshorst, G., & van de Kuilen, J. W. (2020). Experimental and analytical evaluation of the in-plane behaviour of as-built and strengthened traditional wooden floors. *Engineering Structures*, 211, 110432.
- [15] Graziotti, F., Tomassetti, U., Penna, A., & Magenes, G. (2016). Out-of-plane shaking table tests on URM single leaf and cavity walls. *Engineering Structures*, 125, 455-470.
- [16] Messali, F., Longo, M. (2021). Influence of the out-of-plane displacement capacity on the indirect check of the global capacity of self-standing houses. Memorandum 09.03.2021.

C Achtergronden kwetsbaarheidskrommen

C.1 Kwetsbaarheidsmodel in 3 'collapse states'

In het kwetsbaarheidsmodel is falen beschreven in termen van drie bezwijkvormen, van deelinstorting tot volledige instorting. Deze worden aangeduid met CS1, CS2 en CS3 waar CS staat voor 'Collapse State'. De indices 1, 2 en 3 geven de mate van instorting aan, met index 3 voor volledige instorting. Figuur C.1 uit [Coburn et al, 1992] geeft een indicatie van deze bezwijkvormen. CS1 en CS2 beschrijven nadrukkelijk het instorten van slechts een beperkt deel van het bouwwerk.



Figuur C.1: Voorbeelden van bezwijkvormen en mate van instorting (debris) bij verschillende/toenemende Collapse State (gedeeltelijk/ volledig instorten); van links naar rechts: CS1, CS2, CS3.

Het kwetsbaarheidsmodel bestaat uit kwetsbaarheidskrommen voor de drie bezwijkvormen CS1, CS2 en CS3.

Vallende schoorstenen maken ook deel uit van bezwijken. Binnenshuis zijn deze ingegrepen in bezwijkvormen CS1, CS2, CS3 in de graad van bedekking met puin van het vloeroppervlak. Buitenshuis wordt in het model voor overlijdenskansen een aparte bijdrage voor vallende schoorstenen berekend, zie Bijlage E.

C.2 Afleiding van kwetsbaarheidskrommen (fragility curves)

Voor de typologieaanpak is een efficiënte methode toepast, die vergelijkbaar is met de methode zoals gevolgd door Eucentre [Crowley et al, 2019]. Die methode bestaat uit verschillende stappen. Waar mogelijk is reeds beschikbare informatie gebruikt om het aantal analyses te beperken dat nodig is om tot een gevalideerde kwetsbaarheidskromme per typologie te komen. Samengevat bestaat de methode uit de volgende stappen:

- I. Het constructieve gedrag van één of meerdere gebouwen binnen een typologie is gesimuleerd door middel van een NLTH. De voor de typologie gebruikte representatieve referentiegebouwen zijn onderworpen aan 11 aardbevingssignalen oplopend in intensiteit. Dit levert een hysteresis kracht/verplaatsingsmodel (ofwel backbone curve).
- II. De backbone curve wordt gebruikt om een equivalent model (SDOF) af te leiden. Dit model bevat een effectieve massa, een hysteresis

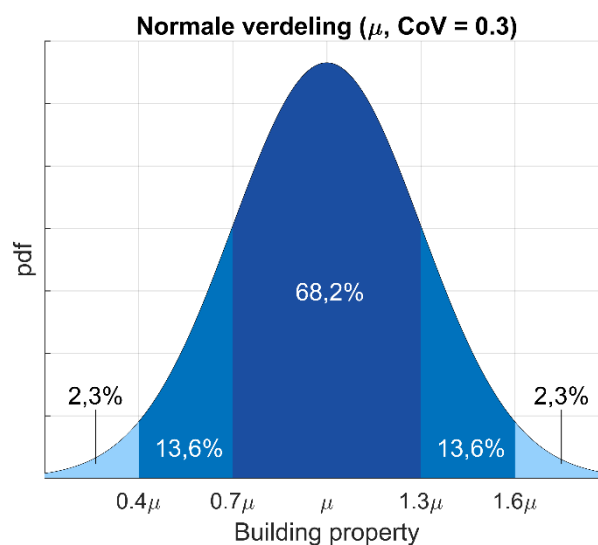
kracht/verplaatsingsmodel (ofwel backbone curve met stijfheidsdegradatie en damping) en een equivalent macro-element om de grond-constructie interactie (SSI) te simuleren. Dit model is gemodelleerd in SeismoStruct [Seismosoft, 2020].

- III. Het model uit de vorige stap wordt belast door een groot aantal aardbevingssignalen om de *record-to record* of signaal-tot-signaal variatie, σ_{RR} te bepalen.
- IV. De kwetsbaarheidskromme behorende bij een bepaalde grensconditie (CS1, 2 en 3) kan vervolgens worden afgeleid. De kwetsbaarheidskromme beschrijft de kans van falen van de constructie gegeven een bepaalde aardbevingsbelasting. Deze kwetsbaarheidskromme beschrijft zowel het gemiddelde gedrag bij een bepaalde aardbevingsbelasting als de variatie in de respons als gevolg van de verschillende aardbevingssignalen met dezelfde intensiteit (*record-to record* of signaal-tot-signaal variatie, σ_{RR}).
- V. Naast de signaal-tot-signaal variatie worden ook de gebouw-tot-gebouw variatie σ_{BB} en een modelonzekerheid in rekening gebracht.

De stappen I t/m IV worden beschreven in de typologie gebonden rapporten.

De volgende opmerkingen worden gemaakt met betrekking tot de stappen IV en V.

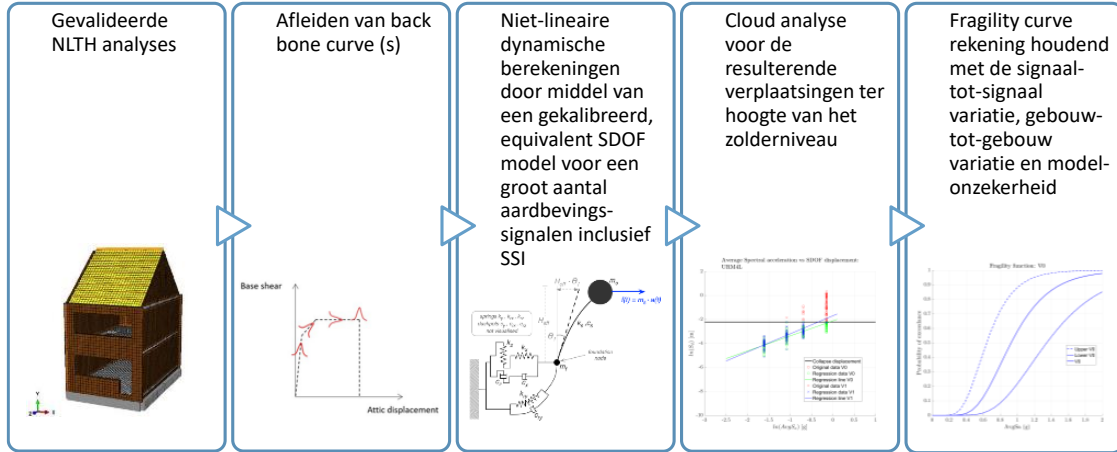
- (1) De gebouw-tot-gebouw variatie brengt het effect in rekening dat er binnen een typologie gebouwen met verschillende eigenschappen en daarmee ook verschillend constructief gedrag bestaan. De waarde van de gebouw-tot-gebouw variatie waarmee in de typologie aanpak per typologie rekening wordt gehouden, wordt door middel van aanvullende analyses afgeleid en onderbouwd. Deze worden onder meer uitgevoerd door de TU Delft. Deze worden in typologie specifieke aanvullende rapportages beschreven. Ter illustratie: een waarde van 0.30 betekent dat ongeveer 95% van de verschillen in gedrag tussen de 0.4 en 1.6 keer het gedrag van een gemiddeld gebouw liggen (zie onderstaande figuur).



- (2) De modelonzekerheid beschrijft de onzekerheid in de uitkomsten door een gebrek aan (juiste en gedetailleerde) informatie en de beperkte precisie van

de modelberekeningen, en wordt daarom ook probabilistisch in de risicoberekening meegenomen. De modelonzekerheid verschilt per typologie en wordt meegenomen via een logic tree in de kwetsbaarheidskromme. Dit wordt beschreven in Bijlage C.3.

Een samenvatting van deze stapsgewijze aanpak is weergegeven in Figuur C.2. De uitwerking wordt per typologie in de typologie specifieke rapportages toegelicht.



Figuur C.2: Stapsgewijze aanpak voor het afleiden van de kwetsbaarheidskrommen inclusief gebouw-tot-gebouw variatie

C.3 Wiskundige beschrijving kwetsbaarheidsmodel

Het kwetsbaarheidsmodel bestaat uit kwetsbaarheidskrommen voor de drie bezwijkvormen CS1, CS2 en CS3. De wiskundige beschrijving is:

$$P_{eDL_{CSi}} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(DL_{CSi}) - \ln(\eta_{SD|\ln(AvgSa)})}{\sigma_s}\right) \quad C3.1$$

met:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{RR}^2 + \sigma_{BB}^2}, \quad C3.2$$

en

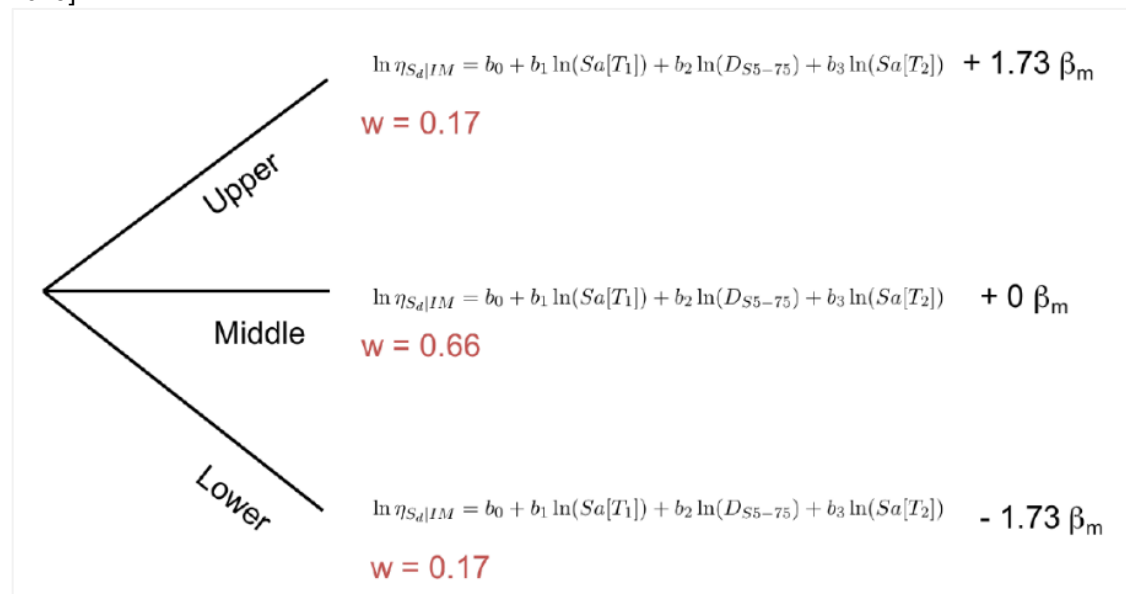
$$\ln(\eta_{SD|\ln(AvgSa)}) = b_0 + b_1 \ln(AvgSa), \quad C3.3$$

$$\ln(AvgSa) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} Sa[T_i], \quad T_i = 0.01s, 0.1s, 0.2s, 0.3s, 0.4s, 0.5s, 0.6s, 0.7s, 0.85s, 1.0s \quad C3.4$$

Hier is $P_{eDL_{CSi}}$ de kans op falen voor bezwijkvorm CSi en i kan hier 1,2 of 3 zijn. De functie $\Phi(x)$ is de cumulatieve standaard normale verdeling. De grootte $\eta_{SD|\ln(AvgSa)}$ is de zogenaamde intensiteitsmaat en hangt af van de gemiddelde spectrale versnelling aan het maaiveld, $AvgSa$. Dit is een gemiddelde over spectrale versnellingen voor 10 perioden binnen dezelfde beving, zie [Kohrangi et

al, 2017]. Deze grootte $AvgSa$ voor een gegeven aardbeving volgt uit het bodembewegingsmodel in de modelketen en wordt met twee inputparameters b_0 en b_1 omgerekend naar de intensiteitsmaat $\eta_{Sd|\ln(AvgSa)}$. Deze intensiteitsmaat is een maat voor de belasting op het gebouw en de parameters b_0 en b_1 leggen feitelijk vast tot welke verplaatsingen in een gebouw een gegeven aardbeving leidt. De input parameter DL_{CSi} is de limietverplaatsing voor bezwijkvorm CSi en is een maat voor hoeveel verplaatsingscapaciteit hoort bij die bezwijkvorm. Deze moet uit rekenmodellen volgen en is zo gedefinieerd dat als de logaritme van de intensiteitsmaat, $\ln(\eta_{Sd|\ln(AvgSa)})$, gelijk is aan de limietverplaatsing DL_{CSi} er 50% kans op falen is voor bezwijkvorm CSi. De input parameter DL_{CSi} kan beschouwd worden als de mediane verplaatsing die het gebouw kan hebben bij die bezwijkvorm. De inputparameter σ_s is een maat voor de spreiding in het model en is opgebouwd uit een component σ_{RR} , de signaal-tot -signaal variatie die de onzekerheid geeft voor de respons van een gebouw op verschillende bevingen (met gelijke intensiteit) en een component σ_{BB} , de gebouw-tot-gebouw variatie, die de spreiding in respons voor verschillende gebouwen binnen een typologie in rekening brengt. Deze laatste in het bijzonder is aandacht gegeven binnen het typologieproject. De kwetsbaarheidskrommen ontstaan door de kans op falen, $P_{eDL_{CSi}}$, te plotten tegen de intensiteitsmaat $\eta_{Sd|\ln(AvgSa)}$ of de logaritme daarvan.

In het bovenstaande ontbreekt de modelonzekerheid β_m , zie voor een toelichting Bijlage D. Deze wordt in rekening gebracht via een zogenaamde logic tree met een 'Lower', 'Middle' en 'Upper' tak, zoals in onderstaande figuur C.3 is geïllustreerd. De achtergronden bij deze wijze van in rekening brengen is gegeven in [Crowley et al, 2019].



Figuur C.3: De logic tree voor het kwetsbaarheidsmodel volgens [Crowley et al, 2019] om de modelonzekerheid β_m in rekening te brengen.

Gegeven de modelonzekerheid β_m wordt de intensiteitsmaat aangepast met ± 1.73 maal de modelonzekerheid en dat bepaalt de 'Upper' en 'Lower' takken van de logic tree. In figuur C.3 is te zien dat de aanpassing van de intensiteitsmaat op deze

manier beschreven kan worden via een aanpassing van de parameter b_0 . Voor de rest bevatten deze takken verder identieke parameters voor het kwetsbaarheidsmodel. Dit betekent dat volgens de logic tree methode in de modelketen de effectieve modelonzekerheid gelijk is aan β_m/b_1 .

De gewichten w voor de 'Upper', 'Middle' en 'Lower' takken van de logic tree zijn respectievelijk 0,17, 0,66, 0,17 en zo wordt de modelonzekerheid verdisconteerd in de risicoberekening. Deze gewichten en de factor 1,73 zijn overgenomen uit [Miller and Rice, 1983].

De totale set inputparameters voor het kwetsbaarheidsmodel voor één typologie is hiermee:

$$b_0, b_1, \sigma_s, DL_{CS1}, DL_{CS2}, DL_{CS3}$$

En voor de 'Lower' en 'Upper' branch is dezelfde set parameters van toepassing, behalve een aangepaste parameter b_0 zoals hierboven beschreven. Op deze wijze ontstaan voor ieder van de drie bezwijkvormen drie takken van de logic tree, in totaal zijn dit 9 kwetsbaarheidskrommen per typologie met bijbehorende gewichten.

C.4 Mediaan en spreiding van de kwetsbaarheidskromme gebaseerd op MDOF en SDOF modellen van Groningse metselwerk gebouwen

De kwetsbaarheid van een typologie wordt beschreven met een kwetsbaarheidskromme en in die kwetsbaarheidskromme zijn alle effecten van verschillende faalmechanismes (waaronder ook in-plane en out-of-plane bezwijken) opgenomen. Kwetsbaarheidskrommen geven de relatie tussen een intensiteitsmaat en de kans op instorten en worden bepaald door een mediaan en een spreiding.

Aan de basis voor de afleiding van de kwetsbaarheidskrommen voor een typologie staan complexe 3D eindige elementenmodellen met materiaalmodellen gekalibreerd aan triltafeltesten, zowel op elementniveau (muren in/uit het vlak) als op gebouwniveau. Deze modellen, in de vorm van NLTH berekeningen en hierna MDOF (Multi Degree of Freedom) modellen genoemd, beschrijven alle relevante faalmechanismen van een gebouw tot en met volledig bezwijken.

In de kwetsbaarheidskrommen moeten 3 typen variabiliteit zijn meegenomen: de variabiliteit in aardbevingssignalen (signaal-tot-signaal variatie), de variabiliteit in parameters binnen gebouwen en de gebouw-gebouw variatie.

De meest geavanceerde methode om tot kwetsbaarheidskrommen te komen zou volledig op MDOF modellen gebaseerd zijn. Deze MDOF modellen zijn echter zeer rekenintensief en om een voldoende grote set aardbevingssignalen door te rekenen met voldoende variaties van gebouw parameters en voor voldoende verschillende gebouwen binnen één typologie is een enorme hoeveelheid berekeningen vereist. Dit is niet haalbaar. Daarom wordt een aanpak gebruikt waarbij MDOF modellen voor één of meerdere referentiegebouwen gebruikt worden in de afleiding van de kwetsbaarheidskrommen. Deze MDOF modellen kunnen vanwege de intensieve rekentijden niet onderworpen worden aan vele aardbevingssignalen.

Daarom is een slag gemaakt van MDOF naar een aan de MDOF getunedede SDOF (Single Degree of Freedom) voor ieder referentiegebouw.

De aldus gekalibreerde SDOF modellen zijn onderworpen aan 200 bevingssignalen om de signaal-tot-signaal variatie te kunnen bepalen. Bij gebruik van meerdere referentiegebouwen per typologie geven deze samen een kwetsbaarheidskromme.

De op deze wijze via SDOF modellen afgeleide kwetsbaarheidskromme beschrijft nog maar ten dele de spreiding binnen een typologie: de variatie van eigenschappen binnen het gebouw moet nog verwerkt worden en de gebouw-gebouw variatie rondom het referentiegebouw of de referentiegebouwen binnen de typologie moet nog verwerkt worden. Deze worden in rekening gebracht door een extra spreiding toe te voegen en een mediaanshift toe te passen indien nodig. Een juiste mediaankeuze moet ervoor zorgen dat de mediane seismische capaciteit in de kwetsbaarheidskromme ook daadwerkelijk overeenstemt met de Groningse praktijk in de typologie.

Op MDOF gebaseerde kwetsbaarheidskrommen met alle variaties zijn slechts beschikbaar voor een beperkt aantal typologieën, namelijk METSELWERK 1 en 2 en voor boerderijen [Arup, 2019b/2019c]. Deze informatie is daarom gecombineerd met informatie uit de literatuur. De in [Arup, 2019b/2019c] afgeleide MDOF kwetsbaarheidskrommen zijn gebaseerd op variaties zoals deze zijn gevonden in de 'Exposure Database' [Arup, 2019d] en kunnen als zodanig worden gezien als een representatieve weergave van de Groningse gebouwenvoorraad. Dit betreft zowel variaties in eigenschappen binnen een gebouw als variaties tussen gebouwen binnen een typologie.

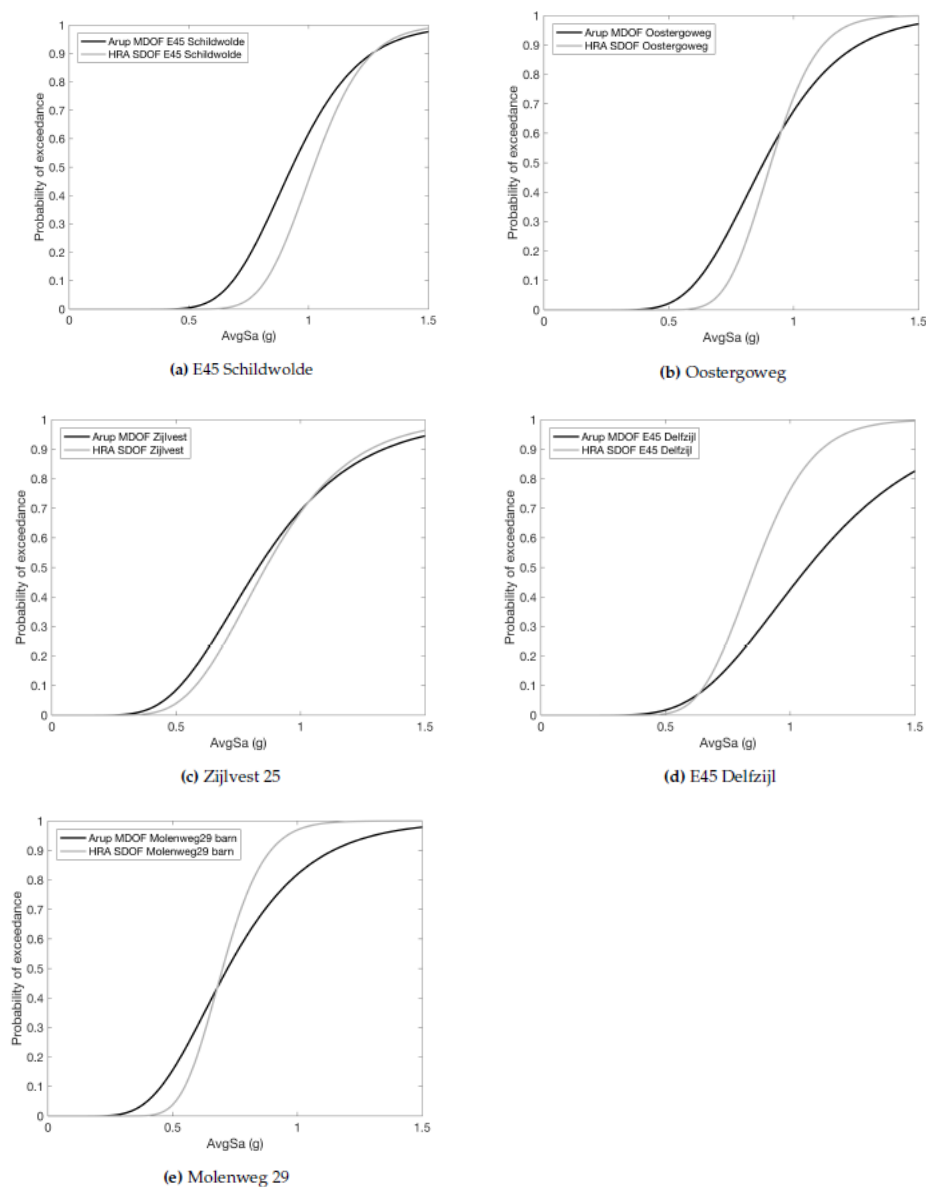
Hierna wordt eerst ingegaan op de kwetsbaarheidskrommen per referentiegebouw die alleen signaal-tot-signaal variatie bevatten. Vervolgens wordt ingegaan op het in rekening brengen van variatie in eigenschappen binnen gebouwen en gebouw-gebouw variatie.

Kwetsbaarheidskromme per referentiegebouw met alleen signaal-tot-signaal variatie

De kwetsbaarheidskrommen met signaal-tot-signaal variatie worden bepaald door als uitgangspunt een NLTH MDOF model van een referentiegebouw te nemen en deze te onderwerpen aan 11 aardbevingssignalen. Deze 11 signalen hebben een toenemende intensiteit, zodat volledig instorten met zekerheid optreedt bij de hogere intensiteiten. Uit deze MDOF berekeningen wordt een stopcriterium bepaald: de verplaatsingscapaciteit voor globaal instorten (CS3). Dit is de verplaatsing van de zolderverdieping waarbij volledig instorten plaatsvindt. Voor ieder referentiegebouw is deze verplaatsing bepaald door het gemiddelde te nemen van de kleinste verplaatsing van de zolderverdieping waarbij instorten optreedt en de grootste verplaatsing van de zolderverdieping in de analyses met aardbevingssignalen die niet tot globaal instorten leiden, zie [Crowley & Pinho, 2020]. Naast het stopcriterium voor volledig instorten (collapse state CS3) zijn voor de referentiegebouwen uit de MDOF simulaties ook verplaatsingscriteria bepaald voor de collapse states CS1 en CS2 bij deelinstorting. Vervolgens wordt een SDOF model geconstrueerd zoals beschreven in C.2.

Dit SDOF model past in termen van verplaatsing van de zolderverdieping zo goed mogelijk bij het MDOF model voor de 11 aardbevingssignalen. Vervolgens wordt dit SDOF model onderworpen aan 200 hazard-consistente aardbevingssignalen en hiermee wordt een kwetsbaarheidskromme afgeleid voor ieder van de collapse states, zie C3. In deze kwetsbaarheidskromme zitten de verplaatsingscriteria (stopcriteria) voor de collapse states CS1, CS2, CS3. En de bij deze collapse states behorende mate van instorting nodig in het gevolgmodel is afkomstig uit de NLTH berekeningen. Op deze wijze zijn alle voor de referentiegebouwen relevante faalmechanismen verwerkt in de SDOF simulaties.

Voor enkele referentiegebouwen zijn door [Arup 2019b] MDOF simulaties gemaakt voor de signaal-tot-signaal variatie en deze zijn in [Crowley & Pinho 2020] vergeleken met de SDOF kwetsbaarheidskrommen afgeleid volgens de procedure zoals hiervoor beschreven. Figuur C.4.1 toont deze vergelijking.



Figuur C4.1 Vergelijking MDOF/SDOF kwetsbaarheidskrommen voor een aantal referentiegebouwen (alleen signaal-tot-signaal variatie), overgenomen uit [Crowley et al, 2020]

Als naar de spreiding gekeken wordt, vertonen de MDOF kwetsbaarheidskrommen over het algemeen iets meer spreiding dan de SDOF kwetsbaarheidskrommen. Nadere analyse geeft aan dat het toepassen van een extra spreiding van 0,15 in doorsnee voldoende is om de spreiding van de SDOF en MDOF modellen overeen te laten komen. In Annex D wordt de modelonzekerheid besproken volgens FEMA P-58 [FEMA, 2012] die voor een superieur model een modelonzekerheid $\beta_q=0,1$ geeft en voor een gemiddeld model 0,25. Deze bevat precies de extra 0,15 spreiding en is de waarde die uiteindelijk gekozen is voor de modelonzekerheid, zie Annex D.

Als gekeken wordt naar de ligging van de mediaan, wordt voor sommige referentiegebouwen een hogere en voor sommige referentiegebouwen een lagere mediaan gevonden, een shift van -9 tot 24%. Voor een hogere (positieve shift) mediaan is het SDOF model conservatiever dan het MDOF model en leidt eerder tot bezwijken. De ligging van de mediaan wordt samen beschouwd met de toevoeging van gebouw-tot-gebouw variatie en gebouw eigenschappen variatie. Dit wordt hierna besproken.

Variatie van eigenschappen binnen gebouwen en gebouw-tot-gebouw variatie in de kwetsbaarheidskrommen

In de vorige paragraaf is het verschil in spreiding en ligging van de mediaan van de kwetsbaarheidskrommen besproken tussen de binnen de typologieaanpak gebruikte methode waar een slag van MDOF naar SDOF gemaakt is en volledige op MDOF gebaseerde kwetsbaarheidskrommen. In die analyse was alleen de signaal-tot-signaal variatie inbegrepen. Voor het bestuderen van het effect van variatie van eigenschappen binnen gebouwen en gebouw-tot-gebouw variatie op de kwetsbaarheidskrommen is voor 3 typologieën een studie beschikbaar, zie [Arup 2020]. Hier wordt nader ingegaan op de resultaten voor METSELWERK1 en METSELWERK2. In [Arup 2020] zijn MDOF kwetsbaarheidskrommen voor de kwetsbaarheidsklassen URM3L en URM4L afgeleid (deze zijn vrijwel equivalent aan respectievelijk de typologieën METSELWERK1 en METSELWERK2). Voor de kwetsbaarheidsklasse URM3L zijn voor twee referentiegebouwen kwetsbaarheidskrommen afgeleid op basis van 300 NLTH analyses. Er zijn zowel kwetsbaarheidskrommes afgeleid met alleen signaal-tot-signaalvariatie als krommes waarbij daarbovenop de variatie van eigenschappen binnen het gebouw is meegenomen. Voor de kwetsbaarheidsklasse URM4L is hetzelfde gedaan voor twee referentiegebouwen maar daarnaast is ook gebouw-tot-gebouw variatie toegepast en is een kwetsbaarheidskromme met inbegrip van de gebouw-tot-gebouw variatie afgeleid. Hier zijn 600 NLTH analyses gebruikt. De resultaten van deze twee studies geven inzicht in de verandering van de spreiding en de mediaan in de kwetsbaarheidskrommen wanneer variatie van eigenschappen binnen gebouwen toegepast wordt en gebouw-tot-gebouw variatie op basis van de daadwerkelijk in Groningen aanwezige gebouwen (via de Exposure Database). Dit is gebruikt om de ligging van de mediaan en de spreiding van de kwetsbaarheidskrommen in de typologieaanpak zo goed mogelijk in te schatten met conservatieve aannamen waar dit nodig geacht wordt.

Controle van de verandering van de spreiding

Het variëren van eigenschappen binnen het gebouw leidt tot een extra spreiding ter grootte van ongeveer 0,2 (de exacte waarde varieert per referentiegebouw) ten opzichte van de kwetsbaarheidskrommen waar alleen de signaal-tot-signaal variatie is meegenomen, voor ieder van de vier doorgerekende referentiegebouwen voor de kwetsbaarheidsklassen URM3L en URM4L. Deze 0,2 extra spreiding is in de typologie kwetsbaarheidskrommen verdisconteerd in het β_c deel van de modelonzekerheid, zie Bijlage D, waar voor $\beta_c = 0,25$ gekozen is.

Voor de kwetsbaarheidsklasse URM4L volgt dat het meenemen van gebouw-tot-gebouw variatie een extra spreiding geeft en dat deze afgedekt wordt met de waarde voor de gebouw-tot-gebouw variatie van 0,3 uit [Crowley et al., 2020]. Deze extra onzekerheid is ook meegenomen in de uitwerking van de typologieën.

De vraag kan gesteld worden of deze enkele controle van de gebouw-tot-gebouw variatie van 0,3 ook de gebouw-tot-gebouw variatie afdekt voor andere typologieën. Als gekeken wordt naar de faalmechanismen van de kwetsbaarheidsklasse URM4L onder gebouw-gebouw variatie dan worden verschillende mechanismen gevonden van out-of-plane tot soft storey gedrag. Out-of-plane falen wordt beschouwd als een belangrijk faalmechanisme voor andere typologieën, terwijl soft storey gedrag als typisch faalmechanisme wordt gezien voor de kwetsbaarheidsklasse URM4L. In deze zin dekt de gebouw-tot-gebouw variatie van 0,3 verschillende faalmechanismen af. Daarnaast zijn voor sommige typologieën meerdere referentiegebouwen meegenomen in de afleiding van de kwetsbaarheidskrommen. Deze kwetsbaarheidskrommen hebben dan al een zekere mate van gebouw-tot-gebouw variatie in zich waar bovenop de 0,3 extra gebouw-gebouw variatie expliciet meegenomen wordt. Daarom lijkt het aanhouden van de 0,3 gebouw-tot-gebouw variatie in het typologieproject niet onredelijk.

Hieronder volgt in Tabel C.1 voor URM3L en URM4L een totaaloverzicht in tabelvorm van de spreiding gebruik makend van de formule

$$\beta_{tot} = \sqrt{\beta_{RR}^2 + \beta_{BB}^2 + \beta_c^2 + \beta_q^2}$$

Tabel C.1: Totale spreiding in MDOF en SDOF modellen

spreiding	URM4L MDOF	URM3L MDOF	URM4L SDOF	URM3L SDOF
β_{RR}	Expliciet	Expliciet	Expliciet	Expliciet
β_{BB}	0.3	0.3	0.3	0.3
β_c	Expliciet	Expliciet	0.25	0.25
β_q	0.1	0.1	0.25	0.25
β_{tot}	0.48	0.40	0.53	0.53

Te zien is dat de spreiding in Tabel C.1 voor de SDOF kwetsbaarheidskrommen groter is dan voor de MDOF kwetsbaarheidskrommen en daarmee toereikend is. Echter in de toepassing van de modelonzekerheid $\beta_m = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_q^2}$ volgens de logic tree methode in de modelketen is de effectieve modelonzekerheid gelijk aan β_m/b_1 met b_1 een parameter in de intensiteitsmaat in de kwetsbaarheidskrommen, zie Bijlage C.3. Voor URM3L is $b_1 = 1.963$ en voor URM4L is $b_1 = 1.2524$. Nu kan de correcte totale spreiding voor de SDOF modellen berekend worden.

Voor URM4L is dit:

$$0.53^2 = \beta_{RR}^2 + \beta_{BB}^2 + \beta_c^2 + \beta_q^2$$

$$\beta_{RR}^2 + \beta_{BB}^2 = 0.53^2 - (\beta_c^2 + \beta_q^2) = 0.53^2 - (0.25^2 + 0.25^2) = 0.156$$

$$\beta = \sqrt{\beta_{RR}^2 + \beta_{BB}^2 + \frac{\beta_c^2 + \beta_q^2}{b_1}} = \sqrt{0.156 + (0.25^2 + 0.25^2)/b_1} = 0.49$$

Analoog wordt voor URM3L een totale spreiding gevonden van 0.45. Deze spreiding is voor beide kwetsbaarheidsklassen groter dan die voor de kwetsbaarheidskrommen op basis van de MDOF modellen in Tabel C.1. Daarmee is de spreiding van de SDOF modellen toereikend op basis van de beschikbare informatie.

Verandering van de mediaan voor variatie eigenschappen binnen het gebouw en gebouw-tot-gebouw variatie.

Het variëren van eigenschappen binnen het gebouw leidt tot een mediaanshift naar lagere intensiteitswaarden. Zie hiervoor Tabel C.2.

Tabel C.2: Mediaanshifts in de MDOF-SDOF vergelijking

Referentiegebouw URM3L	Mediaanshift MDOF/SDOF	Mediaanshift Variatie gebouweigenschappen
E45 Schildwolde	-9,2%	-11,8%
Oostergoweg	-4%	-10,2%

Referentiegebouw URM4L	Mediaanshift MDOF/SDOF	Mediaanshift Variatie gebouweigenschappen
Zijlvest	-3%	-17%
E45 Delfzijl	+24%	-15%

Bovenstaande informatie leidt tot een gecombineerde mediaanshift voor het in rekening brengen van enerzijds de MDOF/SDOF overgang en anderzijds voor het in rekening brengen van de variatie in gebouweigenschappen binnen een gebouw. Deze gecombineerde mediaanshift is verschillend per referentiegebouw. Gemiddeld lijkt een shift van -15% redelijk. Deze is daarom voor alle metselwerk typologieën toegepast door TNO.

Voor de kwetsbaarheidsklasse URM4L is ook gebouw-tot-gebouw variatie bepaald. Hier werd geen significante mediaanverandering gevonden ten opzichte de kwetsbaarheidskromme waarin signaal-tot-signaal variatie en variatie van eigenschappen binnen het gebouw is bestudeerd. De reden hiervoor is dat hoe meer gevarieerd wordt de zwakkere waarden in de variaties de mediaan grotendeels bepalen.

Variatie van de eigenschappen binnen een gebouw leidt waarschijnlijk tot zwakkere realisaties die slechts bij geringere kansen geëvenaard worden in de gebouw-tot-gebouw variatie waardoor geen significante mediaanverschuiving meer waarneembaar is. Gezien het eerder opgemerkte verschillende faalmechanismen bij de gebouw-gebouw variatie van kwetsbaarheidsklasse URM4L wordt verondersteld dat voor andere typologieën het onwaarschijnlijk is dat er een significante mediaanverschuiving optreedt bij gebouw-tot-gebouw variatie. Bovendien is de in rekening gebrachte 15% mediaanverschuiving in veel gevallen al toegepast op conservatieve aannamen voor het mediane gebouw.

Samenvatting

De spreiding in de kwetsbaarheidskromme voor de signaal-tot-signaal variatie volgt uit de analyse van het SDOF model onderworpen aan aardbevingssignalen. Door het vergroten van het β_q deel van de modelonzekerheid van 0,1 voor MDOF naar 0,25 voor SDOF, omdat SDOF modellen minder accuraat zijn (Annex D), is de spreiding van de kwetsbaarheidskromme voor de signaal-tot-signaal variatie equivalent aan die van een MDOF model. De extra spreiding door variatie van gebouweigenschappen is afgedekt met het β_c deel van de modelonzekerheid, door keuze $\beta_c = 0,25$ (Annex D). De gebouw-tot-gebouw variatie is in rekening gebracht met een extra spreiding van 0,3. Deze waarde is afkomstig uit de literatuur en is gecontroleerd met MDOF NLTHA analyses. Doordat meerdere referentiegebouwen gebruikt worden bij de meeste typologieën, hebben de kwetsbaarheidskrommen al ten dele een gebouw-tot-gebouw variatie in zich. De extra 0,3 gebouw-tot-gebouw variatie is hier bovenop gezet.

De mediaan van de kwetsbaarheidskrommen voor de signaal-tot-signaal variatie voor SDOF modellen heeft een iets andere ligging dan voor MDOF modellen voor referentiegebouwen, soms hoger soms lager. Als naast signaal-tot-signaal variatie ook variatie van eigenschappen in gebouwen onderzocht wordt met MDOF modellen dan wordt een mediaanverschuiving geconstateerd voor metselwerk gebouwen. Als de signaal-tot-signaal variatie in SDOF samen genomen wordt met variatie van gebouw eigenschappen is het effect over meerdere referentiegebouwen een mediaanverschuiving naar lagere intensiteitswaarden van ongeveer 15%. Wanneer gebouw-tot-gebouw variatie meegenomen wordt, is geen significante mediaanverschuiving meer waargenomen naast deze 15%. Deze 15% verschuiving is toegepast bij verschillende typologieën waar meerdere referentiegebouwen zijn gebruikt in kwetsbaarheidskrommen. Soms is in plaats meerdere referentiegebouwen het ongunstige referentiegebouw gebruikt en is deze verschuiving niet toegepast. Ook zijn voor bepaalde typologieën extra studies gedaan naar de ligging van de mediaan. Dit is beschreven in de uitwerking van de typologieën.

D Achtergronden modelonzekerheden

Voor de kwantificering van de modelonzekerheid wordt gebruik gemaakt van de aanbevelingen uit het FEMA rapport P-58 [FEMA, 2012]. De modelonzekerheden verrekenen het effect van de nauwkeurigheid van de gebruikte rekenmodellen. De systematiek van FEMA is voor wat betreft de modelonzekerheid generiek toepasbaar. De gebruikte parameters worden specifiek voor de situatie in Groningen afgeleid en onderbouwd.

De modelonzekerheid wordt weergegeven in de vorm van de variatiecoëfficiënt β_m .

Uit FEMA-P58:

“In this methodology, demand parameter dispersions are estimated based on judgment regarding the uncertainty inherent in response calculation.”

FEMA P-58 specificeert de modelonzekerheid β_m als de som van 2 bijdragen: β_c en β_q :

$$\beta_m = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_q^2}$$

De bijdrage β_c is gerelateerd aan de kwaliteitscontrole tijdens het ontwerp en uitvoering van het gebouw. Het betreft de kans dat de aanwezige eigenschappen van de constructieve onderdelen verschillen van de gespecificeerde eigenschappen in bouwtekeningen en berekeningen. Deze hangt onder meer af van de beschikbaarheid en kwaliteit van aanwezige tekeningen en in hoeverre er inspecties zijn om te verifiëren of de kwaliteit overeenkomt. Voor nieuwe gebouwen wordt dit bepaald door de aanname in hoeverre het gebouw overeenkomt met het ontwerp. FEMA P-58 formuleert aanbevelingen voor de waarde voor β_c die hieronder in Tabel D.1 zijn overgenomen.

Tabel D.1 Waarden voor β_c uit FEMA P-58 [FEMA, 2012]

Building Definition and Construction Quality Assurance	β_c
<i>Superior Quality, New Buildings:</i> The building is completely designed and will be constructed with rigorous construction quality assurance, including special inspection, materials testing, and structural observation. <i>Superior Quality, Existing Buildings:</i> Drawings and specifications are available and field investigation confirms they are representative of the actual construction, or if not, the actual construction is understood. Material properties are confirmed by extensive materials testing.	0.10
<i>Average Quality, New Buildings:</i> The building design is completed to a level typical of design development; construction quality assurance and inspection are anticipated to be of limited quality. <i>Average Quality, Existing Buildings:</i> Documents defining the building design are available and are confirmed by visual observation. Material properties are confirmed by limited materials testing.	0.25
<i>Limited Quality, New Buildings:</i> The building design is completed to a level typical of schematic design, or other similar level of detail. <i>Limited Quality, Existing Buildings:</i> Construction documents are not available and knowledge of the structure is based on limited field investigation. Material properties are based on default values typical for buildings of the type, location, and age of construction.	0.40

De bijdrage β_q is gerelateerd aan de kwaliteit en de mate van volledigheid van het gebruikte analytische model. De keuze voor β_q wordt gemaakt op basis van begrip van de gevoeligheid van de berekende respons voor constructieve eigenschappen als sterkte, stijfheid, vervormingscapaciteit en zaken als degradatie als gevolg van de cyclische belasting. FEMA P-58 formuleert aanbevelingen voor de waarde voor β_q die hieronder in Tabel D.2 zijn overgenomen.

Tabel D.2 Waarden van β_q aanbevolen door FEMA P-58 [FEMA, 2012]

Quality and Completeness of the Analytical Model	β_q
<i>Superior Quality:</i> The numerical model is robust over the anticipated range of response. Strength and stiffness deterioration and all likely failure modes are explicitly modeled. Model accuracy is established with data from large-scale component tests through failure. <i>Completeness:</i> The mathematical model includes all structural components and nonstructural components in the building that contribute to strength or stiffness.	0.10
<i>Average Quality:</i> The numerical model for each component is robust over the anticipated range of displacement or deformation response. Strength and stiffness deterioration is fairly well represented, though some failure modes are simulated indirectly. Accuracy is established through a combination of judgment and large-scale component tests. <i>Completeness:</i> The mathematical model includes most structural components and nonstructural components in the building that contribute significant strength or stiffness.	0.25
<i>Limited Quality:</i> The numerical model for each component is based on idealized cyclic envelope curves from ASCE/SEI 41-13 or comparable guidelines, where strength and stiffness deterioration and failure modes are not directly incorporated in the model. <i>Completeness:</i> The mathematical model includes structural components in the seismic-force-resisting system.	0.40

Voor metselwerk gebouwen wordt door Eucentre [Crowley et al, 2017] gesteld dat:

- *For β_c , the model uncertainty due to construction quality assurance is assessed as “average” and the value of dispersion is taken as 0.25. This is because, even though documents regarding the building design are available and material properties have been tested, those refer to a specific index building. For the other buildings in the class β_c will be larger and “superior” quality cannot be assigned.*
- *For β_q , the analytical model was judged as “superior” due to “the extensive cross validation of the LS-DYNA and ELS software” and a value of 0.1 has been assigned.[...]. These software tools have been validated and/or calibrated for seismic analysis of Groningen buildings using the results of a large number of experimental tests.”*

The combination of the two yields a value of 0.27 for β_m .

TNO adviseert voor metselwerk gebouwen voor β_q een hogere waarde te hanteren in plaats van 0,10; dit in verband met het feit dat de gebruikte SDOF modellen voor de afleiding van de kwetsbaarheidskrommen niet als ‘superior’ te zien zijn, omdat het een vereenvoudiging betreft van de gekalibreerde 3D modellen, zie ook bijlage C.4. De gehanteerde waarde wordt in de typologiespecifieke rapporten gespecificeerd en onderbouwd.

Voor gebouwen die niet uit metselwerk zijn opgebouwd wordt door Eucentre [Crowley et al, 2017] gesteld:

- *For β_c , the model uncertainty due to construction quality assurance is assessed as “limited” as material properties have been assigned default typical values based on type location and age of construction. The corresponding value of dispersion is 0.40.*
- *For β_q , the analytical model was judged as “average”. This is due to the fact that even though extensive validation already mentioned for URM was performed also for Non-URM, “not all non-structural elements are included in the models and some failure modes are simulated indirectly”. A value of 0.25 has thus been assigned.*

The combination of these values yields a value of 0.47 for β_m .

TNO neemt deze waarde over in de definities van de typologieën. Voor alle gebouwen die een draagconstructie hebben van hout, staal of beton wordt de waarde van 0,47 voor β_m toegepast.

Voor de uiteindelijke implementatie van de modelonzekerheid middels een ‘logic tree’ benadering wordt verwezen naar paragraaf C.3.

E Achtergronden gevolgmodel

Met het gevolgmodel wordt de kans op overlijden gegeven falen berekend. In het kwetsbaarheidsmodel is falen beschreven in termen van drie bezwijkvormen, van deelinstorting tot volledige instorting. Deze worden aangeduid met CS1, CS2 en CS3 waar CS staat voor 'Collapse State'. De indices 1, 2 en 3 geven de mate van instorting aan, met index 3 volledige instorting. In het gevolgmodel wordt de kans op overlijden voor ieder van deze drie 'Collapse States' gegeven, zowel in het gebouw als net daaromheen. Dit is typologie afhankelijk. Daarom moet voor iedere typologie deze set van totaal drie overlijdenskansen voor binnenshuis en drie voor buitenshuis, in totaal zes kansen apart gedefinieerd worden. Onder buitenshuis wordt hier verstaan binnen een afstand van 5 m tot het gebouw. Zoals opgemerkt in Bijlage C, is het effect van vallende schoorstenen binnenshuis inbegrepen in de bezwijkvormen CS1, CS2 en CS3 via het vergrote percentage vloeroppervlak dat bedolven wordt met puin in de eindige elementenberekeningen. Buitenshuis wordt een aparte bijdrage aan de kans op overlijden door vallende schoorstenen toegepast, deze wordt hierna besproken. De wiskundige vorm van het gevolgmodel is overgenomen uit [Crowley et al, 2019/2020] en wordt hierna beschreven. Voor de bepaling van de parameters van het gevolgmodel is ook gebruik gemaakt van [Crowley et al, 2019/2020] waar per typologie is bekeken of deze aanpassing behoeven.

E.1 Wiskundige beschrijving van het gevolgmodel

De kansen op overlijden gegeven falen worden in de TNO modelketen toegepast uitgaande van het principe dat instorting sequentieel is. Dat wil zeggen dat als volledige instorting optreedt de twee lichtere vormen van instorting al zijn opgetreden en dat die kansen op optreden van deze lichtere vormen van instorting in dit geval niet dubbel geteld worden. In formulevorm worden de kansen op overlijden binnenshuis, $P_{d_{inside}}$ en buitenshuis, $P_{d_{outside}}$, dan als volgt berekend op basis van de kansen op falen uit het kwetsbaarheidsmodel:

$$P_{d_{inside}} = (P_{eDL_{CS1}} - P_{eDL_{CS2}})P_{d_{inside|CS1}} + (P_{eDL_{CS2}} - P_{eDL_{CS3}})P_{d_{inside|CS2}} + P_{eDL_{CS3}}P_{d_{inside|CS3}} \quad E1.1$$

$$P_{d_{outside}} = (P_{eDL_{CS1}} - P_{eDL_{CS2}})P_{d_{outside|CS1}} + (P_{eDL_{CS2}} - P_{eDL_{CS3}})P_{d_{outside|CS2}} + P_{eDL_{CS3}}P_{d_{outside|CS3}} + (1 - P_{eDL_{CS1}})P_{d_{outside|Chd}} \quad E1.2$$

Met :

$P_{eDL_{CSi}}$ de kans op falen voor bezwijkvorm CSi zoals berekend met het kwetsbaarheidsmodel

$P_{d_{inside|CSi}}$ de drie kansen op overlijden binnenshuis gegeven falen voor bezwijkvorm CSi

$P_{d_{outside|CSi}}$ de drie kansen op overlijden buitenshuis gegeven falen voor bezwijkvorm CSi

$P_{d_{outside|Chd}}$ is de kans op overlijden buitenshuis door bezwijken van de schoorsteen (de kans op overlijden door bezwijken van de schoorsteen binnenshuis zit impliciet in de bezwijkvormen CSI) en deze wordt berekend met:

$$P_{d_{outside|Chd}} = \Phi\left(\frac{\ln(PGA) - \ln(\overline{PGA}_{chd})}{\beta_{chd}}\right), \quad PGA < 0.75g$$

$$P_{d_{outside|Chd}} = \Phi\left(\frac{\ln(0.75) - \ln(\overline{PGA}_{chd})}{\beta_{chd}}\right), \quad PGA \geq 0.75g$$

Met PGA de piek grondversnelling en $\overline{PGA}_{chd}$, β_{chd} invoergegevens.

Er wordt van uitgegaan dat een persoon zich voor 1% van de tijd buitenshuis binnen 5 m afstand van het gebouw bevindt en voor 99% van de tijd binnenshuis. Dan is de totale kans op overlijden:

$$P_d = 0.99P_{d_{inside}} + 0.01P_{d_{outside}}$$

Het gevolgmodel per typologie heeft in totaal de volgende parameters:

$$P_{d,in,CS1}, P_{d,in,CS2}, P_{d,in,CS3}, P_{d,out,CS1}, P_{d,out,CS2}, P_{d,out,CS3}, \overline{PGA}_{chd}, \beta_{chd}$$

Op de specifieke waarden hiervoor wordt ingegaan in de rapporten per typologie.

E.2 Achtergrond parameters voor het gevolgmodel

In paragraaf 2.3 werd ingegaan op risicomiddeling en de verschillende doorsnedes waarlangs risicomiddeling wordt toegepast in de NPR 9998:2020 en in de typologie gebaseerde beoordeling. Daar is onder andere vermeld dat er in de NPR wordt gewerkt met één kans op overlijden gegeven instorten en dat daarom in de NPR wordt gemiddeld over alle gebouwen (en daarmee over typologieën). In de typologie gebaseerde beoordeling zijn de overlijdenskansen specifiek per typologie uitgewerkt en toegepast.

Het gevolgmodel voor de overlijdenskansen toegepast in de typologie gebaseerde beoordeling berust op een empirische component en een numerieke component en omvat het beste van deze twee werelden. Dit wordt gezien als een redelijke aanname.

Uit analyse van empirische gegevens over overleden personen bij aardbevingsgebeurtenissen hebben [Coburn & Spence 1992, 2002] drie coëfficiënten afgeleid:

- 1) De kans dat iemand niet kan ontsnappen bij volledige instorting
- 2) De kans dat iemand onmiddellijk overlijdt bij insluiting onder puin
- 3) De kans dat iemand die niet direct sterft bij insluiting, niet op tijd gered wordt en uiteindelijk toch overlijdt

Deze coëfficiënten zijn door [Coburn & Spence 2002] gegeven voor verschillende constructietypes, waaronder types die overeenkomen met typologieën van METSELWERK, BETON, HOUT en STAAL in de typologie gebaseerde beoordeling.

Deze op basis van empirie afgeleide coëfficiënten worden gecombineerd met de kans dat een persoon in een gebouw ingesloten raakt. Dit is aan de hand van numerieke NLTH simulaties van de referentiegebouwen vastgesteld als zijnde dat gedeelte van het vloeroppervlak dat bedolven is met puin. Dit verschilt per typologie en per collapse state. De parameters behorende bij collapse states CS1, 2 en 3 zijn beschreven in de typologiespecifieke rapporten.