

Stieltjesweg 1  
2628 CK Delft  
Postbus 155  
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 20 00  
F +31 88 866 06 30

## TNO-rapport

2020 R10628

# Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Achtergrond bij de methode

Datum	3 juni 2020
Auteur(s)	Dr.ir. (10)(2e), Prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen, Dr.ir. (10)(2e) (10)(2e)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	71 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Ministerie van EZK t.a.v. Mr. (10)(2e)
Projectnaam	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.

© 2020 TNO

## Samenvatting

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van een onafhankelijke en eenduidige beoordelingsmethode voor de veiligheid van (met name woon-) gebouwen in Groningen. Deze methode maakt het mogelijk om op basis van een beperkt aantal relevante kenmerken van een gebouw snel tot het besluit te komen of, en zo ja welke, versterkingsmaatregelen nodig zijn.

De beoordelingsmethode is gebaseerd op een onderverdeling van gebouwen in zogeheten typologieën. De veiligheidsbeoordeling gebeurt aan de hand van de eigenschappen van deze typologieën en de methode ontleent daaraan de naam typologie aanpak. Dit rapport beschrijft de indeling, omschrijving en de achtergrond van deze typologieën. Bij de definities en uitwerking van de typologieën wordt gebruik gemaakt van reeds bestaande berekeningen van Eucentre en Arup die in het kader van de HRA zijn uitgevoerd en openbaar gemaakt.

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

CONCEPT

## Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>4</b>
1.1	Afbakening .....	4
1.2	Ontwikkeling van de typologie gebaseerde beoordeling .....	4
1.3	Gebruik van de typologie-gebaseerde beoordeling in de praktijk .....	5
1.4	Relatie met NPR 9998 .....	5
1.5	Leeswijzer .....	7
<b>2</b>	<b>Berekening van aardbevingsrisico's .....</b>	<b>9</b>
2.1	Algemeen .....	9
2.2	Typologie aanpak .....	9
2.3	Risicomiddeling .....	11
<b>3</b>	<b>Typologie aanpak in de praktijk .....</b>	<b>13</b>
3.1	Inleiding .....	13
3.2	Stappenplan voor toepassing in de praktijk .....	13
3.3	Voorbeeld werking in de praktijk .....	15
<b>4</b>	<b>Indeling in typologieën .....</b>	<b>17</b>
4.1	Inleiding .....	17
4.2	Keuze van kenmerken voor typologie indeling .....	17
4.3	Stappen voor toekenning van gebouwen aan een typologie .....	18
4.4	Overzicht typologieën hout, staal en beton .....	20
4.5	Typologiekenmerken voor gebouwen uit metselwerk .....	21
4.6	Overzicht typologieën metselwerk .....	22
4.7	Aanvullende bepalingen bij de typologie-indeling .....	23
<b>5</b>	<b>Uitgangspunten voor de beoordeling .....</b>	<b>26</b>
5.1	Seismische dreiging .....	26
5.2	Kwetsbaarheids- en consequentiemodellen .....	26
5.3	Berekening van het risico .....	27
5.4	Uitwerking per typologie .....	27
5.5	Vaststellen vlekkenkaart .....	28
5.6	Kwaliteitscontrole .....	28
<b>6</b>	<b>Versterkingsmaatregelen .....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>33</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Omschrijving TNO modelketen	
	B Overzicht van de typologieën	
	C Inspecties	
	D Achtergronden	

# 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 te zorgen voor herstel van ontstane schade, en het veiligheidsniveau voor de bewoners van Groningen te borgen.

De afgelopen jaren is veel onderzoek verricht naar de beoordeling van de veiligheid van de bestaande gebouwvoorraad in Groningen. In het huidige proces voor de beoordeling van de veiligheid van gebouwen wordt per gebouw vastgesteld wat de precieze staat is, waarna tijdrovende berekeningen worden uitgevoerd. Dit kost te veel tijd om binnen afzienbare tijd 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. Per typologie worden de seismische kenmerken bepaald, rekening houdend met de variaties tussen gebouwen binnen die typologie. Met 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]. De beoordelingsprocedure is zodanig opgezet dat uiteindelijk alle gebouwen (indien nodig na het nemen van versterkingsmaatregelen) voldoen aan de Meijdam norm.

## 1.1 Afbakening

Dit rapport beschrijft de beoordeling van gebouwen met een verblijfsfunctie. 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 is ontwikkeld op basis van een stapsgewijze aanpak. Deze aanpak omvat de volgende stappen:

1. Eerst zijn gebouwtypologieën en subtypologieën gedefinieerd. Deze zijn erop gebaseerd dat gebouwen die tot dezelfde (sub)typologie behoren, vergelijkbare seismisch-constructieve eigenschappen bezitten. Er is vastgelegd hoe bij een opname (verificatie-inspectie) bepaald kan worden of een gebouw tot een van de gekozen typologieën gerekend mag worden. Deze opname wordt zodanig opgezet dat de inspectie snel kan worden uitgevoerd zonder dat (delen) van het gebouw worden beschadigd om eigenschappen van constructieonderdelen (zoals verbindingen) vast te stellen. De omschrijving van deze gebouwtypologieën is in hoofdstuk 4 gegeven.
2. Voor elk van de gebouwtypologieën uit stap 1 worden 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 bijlage D. Deze variaties betreffen ook de onzekerheden die samenhangen met het gekozen inspectieniveau. In de toets aan de veiligheidsnorm (stap 3) worden dus alle verwachte onzekerheden meegenomen.

3. Voor elke typologie wordt met behulp van deze sterktemodellen vastgesteld of, en waar, deze typologie wel of niet voldoet aan de veiligheidsnorm. De risicoberekening wordt uitgevoerd met behulp van de TNO modelketen. Dit wordt nader uitgewerkt voor het actuele scenario voor de (afbouw van de) gaswinning. Overigens is een beoordeling op basis van andere scenario's eenvoudig door te voeren zonder dat daarvoor uitgebreide additionele berekeningen nodig zijn.
4. Voor typologieën waarvan verwacht wordt dat het risico te groot is in sommige gebieden in Groningen, is een set van maatregelen opgesteld. Door toepassing van deze maatregelen kan een eventuele normoverschrijding ongedaan gemaakt worden.

In dit rapport worden de relevante achtergronden bij deze stappen beschreven. Stap 1 is in dit rapport verder uitgewerkt. De stappen 2, 3 en 4 zijn typologie specifiek en worden ingevuld in aanvullende rapportages voor de betreffende (sub)typologieën.

### 1.3 Gebruik van de typologie-gebaseerde beoordeling in de praktijk

De uitkomst van de typologie gebaseerde beoordeling, in termen van "waar wordt, gegeven een typologie, niet voldaan aan de norm" (punt 3 uit voorgaande paragraaf), wordt gebruikt als basis voor de beoordeling van gebouwen in de regio. In hoofdstuk 3 wordt de werkwijze beschreven hoe op basis van de ontwikkelde typologie aanpak wordt bepaald welke gebouwen moeten worden versterkt en welke maatregelen moeten worden toegepast om ervoor te zorgen dat deze gebouwen aan de norm voldoen.

### 1.4 Relatie met NPR 9998

Voor de beoordeling van de weerstand van gebouwen in Groningen wordt door NEN gewerkt aan de ontwikkeling van NPR 9998. Van deze Nationale Praktijk Richtlijn is in 2015 de eerste versie uitgekomen. Thans is NPR9998:2018 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 (de semiprobabilistische benadering wordt in de praktijk gebruikt). 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 van  $10^{-5}$ . Voor de verificatie wordt zowel een probabilistische als semi probabilistische benadering aangewezen. De semi probabilistische 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 herhalingsijd) wordt gedefinieerd, die de constructie moet kunnen weerstaan. Er worden bepalingmethoden gegeven, vaak vereenvoudigde modellen waarmee constructeurs kunnen toetsen of aan de gegeven belasting wordt voldaan. De vereenvoudigde modellen zijn zodanig opgesteld dat deze toegepast kunnen worden voor meerdere typen constructies, en dat een beoordeling relatief snel kan worden gedaan. Vaak betekent dit dat er een zekere marge is opgenomen in deze modellen. Deze marge maakt dat het voor een constructie die niet voldoet aan de hand van deze eenvoudige modellen, niet betekent dat deze niet voldoet aan de gestelde veiligheidsnorm.

Voor de toe te passen berekeningen staan in NPR 9998 naast eenvoudige rekenmethoden (zoals uitgewerkt in de bijlagen van deze NPR) ook geavanceerde analyses (NLTH berekeningen) ter beschikking. Deze geavanceerde analyses zijn zeer tijdrovend, en zijn daarom minder geschikt voor een benadering waarbij vele duizenden gebouwen moeten worden doorgerekend.

De eenvoudige rekenmethoden zijn sneller, maar nog steeds is de opgave zo groot dat dit een substantiële inspanning vraagt. Bovendien zijn de marges in deze eenvoudige methoden vaak zo groot dat veel gebouwen rekenkundig niet zullen voldoen, terwijl wellicht het risico wel onder de norm ligt. In dit geval wordt dan ten onrechte versterking voorgeschreven.

Voor een scherpe toets van gebouwen is het mogelijk met een probabilistische aanpak te werken. Voor de grondslagen wordt in NEN-EN 1990 3.5(5) 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 is het ook mogelijk een kansverdeling te bepalen, 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 typologie aanpak worden de gebouwen ingedeeld volgens typologieën met binnen de typologie vergelijkbare relevante kenmerken voor het gedrag van de constructie. De verschillen tussen gebouwen in een typologie worden in rekening gebracht door een gebouw-tot-gebouwvariatie toe te passen in de berekening van de kwetsbaarheidskromme. Toepassen van deze kwetsbaarheidskromme in

combinatie met de beschrijving van de belasting in een risicoberekening leidt tot een berekening van het risico voor de typologie.

In een typologieaanpak is een beperkt aantal berekeningen nodig. Per typologie worden 1 of hooguit enkele representatieve gebouwen doorgerekend, en worden de variaties zowel binnen als tussen gebouwen in rekening gebracht door het toevoegen van extra variaties die zich vertalen in een marge op het resultaat. Door de typologie indeling fijn genoeg te kiezen kan deze marge binnen acceptabele grenzen blijven. Zo kan op basis van een beperkte rekeninspanning met relatief beperkte marges 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 een eenduidige toekenningsmethode van woningen aan een typologie kan de veiligheidsbeoordeling vervolgens snel worden uitgevoerd.

## 1.5 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit een hoofdrapport met 6 hoofdstukken en een reeks bijlagen. Daarnaast wordt verwezen naar een aantal rapporten die in het kader van de ontwikkeling van de typologie aanpak zijn opgesteld. Het hoofdrapport is zo geschreven dat de gebruiker met het resultaat van de typologie gebaseerde beoordeling besluiten kan nemen over de benodigde versterkingsmaatregelen en hiermee de versterkingsoperatie concreet kan uitwerken.

In de bijlagen zijn de belangrijkste achtergronden en resultaten gegeven van de uitgevoerde werkzaamheden. 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 gegeven.

Hoofdstuk 2 geeft een algemene inleiding en achtergrond bij de uitgangspunten die zijn gebruikt voor de veiligheidsbeoordeling. Bijlage B geeft, aanvullend, nadere informatie over de gehanteerde aanpak.

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 omschrijft de werkwijze hoe een gebouw aan een van de gedefinieerde typologieën toegewezen kan worden en hoe om te gaan met uitzonderingen.

Hoofdstuk 5 geeft de uitgangspunten voor de beoordeling in termen van achtergronden van de gebruikte modellen en presentatie van de vlekkenkaarten.

Hoofdstuk 6 gaat in op de versterkingsmaatregelen.

Bijlage A geeft 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 geeft per typologie het overzicht van de relevante kenmerken die de typologie beschrijven.

Bijlage C geeft een checklist die bij de inspecties van woningen kan worden gebruikt.

Bijlage D geeft de achtergronden bij de wijze waarop de relevante kenmerken per typologie zijn vastgesteld:

- Hoe worden de modelonzekerheden bepaald?
- Hoe worden de kwetsbaarheidskrommen afgeleid en welke keuzes worden gemaakt voor het in rekening brengen van onzekerheden?
- Hoe is de variatie in gebouweigenschappen meegenomen in de berekening?
- Welke keuzes worden gemaakt om de gevolgen van falen in rekening te brengen?

CONCEPT



## 2 Berekening van aardbevingsrisico's

### 2.1 Algemeen

Voor de toetsing van de veiligheid van gebouwen in Groningen is het individueel risico bepalend. Dit moet voldoen aan de Meijdam norm ( $IR \leq 10^{-5}$ ). De berekening van het individueel aardbevingsrisico voor personen in een bepaald gebied gebeurt aan de hand van modellen. Voor deze modellen zijn (model)aannames gedaan voor een groot aantal onbekende factoren die bijdragen aan dit risico. Dit betreft onder andere de eigenschappen van de diepe ondergrond, de ondiepe ondergrond, de overdracht naar de bovengrond, en ook de eigenschappen van 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 of het optreden van een effect.

Dit is de gebruikelijke wijze waarop ook in andere risicogebieden omgegaan wordt met risico's. Omdat we nu eenmaal niet alles precies weten is dit de geaccepteerde werkwijze. Het modelleren door middel van kansmodellen als gevolg van ons gebrek aan kennis is in veel gebieden waar omgegaan moet worden met risico's niet alleen een geaccepteerde, maar ook een succesvolle methode om toch relevante conclusies te kunnen trekken.

Dezelfde systematiek ligt ook ten grondslag aan gehanteerde bouwnormen voor nieuwbouw en bestaande bouw.

In dit rapport wordt de wijze waarop omgegaan wordt met de sterkte (of kwetsbaarheid) van gebouwen in Groningen onder seismische belasting nader omschreven.

Om tot een werkbaar proces voor de beoordeling te komen is het van belang om te kunnen werken met een beperkt aantal gebouwklassen, hier typologieën genoemd. Gebouwen binnen een typologie hebben vergelijkbare seismische eigenschappen. Dit rapport richt zich specifiek op de beschrijving van de aanpak en de indeling in typologieën.

### 2.2 Typologie aanpak

In de praktijk is geen gebouw gelijk. Dit geldt ook voor de eigenschappen die het gedrag van een gebouw tijdens een aardbeving bepalen. In werkelijkheid hebben alle huizen in Groningen elk een unieke seismische weerstand.

Deze kan – in theorie – alleen door het uitvoeren van een proefbelasting worden vastgesteld, maar dit is geen gaanzame weg. Het is praktisch ook niet mogelijk om voor alle gebouwen trillafeltesten of gekalibreerde modelberekeningen uit te voeren. De tijd is daarvoor ontbreekt, en daarnaast is het aantal huizen dat moet worden beoordeeld te groot (>10.000). Ten behoeve van een snelle beoordeling, en indien nodig snelle toekenning van benodigde versterkingsmaatregelen, biedt een indeling in typologieën duidelijke voordelen.

Indien we in de berekeningen zouden uitgaan van één sterktemodel voor alle huizen (oftewel, alle huizen worden door middel van 1 typologie beschreven), met

daarover een *spreiding*, dan wordt deze spreiding zeer groot. De onzekerheid van het resultaat is dan ook zeer groot, en in de risicoberekeningen wordt veel marge ingebouwd. Dit leidt tot onrealistische resultaten. Een fijnere indeling in typologieën leidt tot een kleinere spreiding binnen een typologie en minder marge, maar ook tot een groter aantal typologieën.

Voorgesteld wordt om de verzameling gebouwen in Groningen onder te verdelen in een beperkt aantal typologieën. Deze hebben dan 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 onderverdeling van de gebouwen in Groningen in typologieën vindt plaats op basis van hoofd seismische kenmerken die op basis van inspectie- en archiefgegevens kunnen worden vastgesteld.

De risicoanalyse wordt gebaseerd op die informatie over de gebouwen die vanwege de grote schaal van het probleem op korte termijn kan worden verkregen, zonder overlast voor de bewoner of beschadiging van interieur. Indien bijvoorbeeld door een zeer gedetailleerde inspectie meer over een gebouw bekend is, dan kan deze informatie gebruikt worden om voor dat gebouw een nieuwe inschatting van de veiligheid te maken. Het op grote schaal uitvoeren van dergelijke uitgebreide inspecties en bijbehorende berekeningen leidt echter tot vertraging van het proces. Bovendien is dan vaak sprake van destructieve inspecties (er wordt dus schade aangebracht aan het gebouw). Dit levert veel praktische bezwaren op in de uitvoerbaarheid, en heeft daarom niet de voorkeur.

De gehanteerde aanpak betekent niet dat de onzekerheden, de zogenaamde gebouw-tot-gebouw variatie binnen een typologie, worden verwaarloosd. Deze worden in de risicoanalyse meegenomen en zijn vertaald naar een gehanteerde marge bij gebruik van de typologie aanpak. Hiermee wordt de uitkomst van de risicoanalyse toepasbaar op het niveau van individuele huizen.

In de typologie aanpak wordt per typologie gebruik gemaakt van één of meerdere aan de hand van proefresultaten gekalibreerde modelberekeningen (veelal niet-lineaire Eindige Elementen Model (EEM) berekeningen). Een belangrijk uitgangspunt in de typologie aanpak is dat gewerkt wordt met aantoonbaar aan experimenten gekalibreerde modelberekeningen. Deze werkwijze voorkomt een systematische bias (veelal onderschatting) van de sterkte zoals die optreedt bij gebruik van vereenvoudigde eerste orde modellen.

De onzekerheden en spreiding binnen een typologie worden vertaald naar de zogenaamde gebouw-tot-gebouw variatie. De resultaten van de gekalibreerde modelberekeningen en het verrekenen van de gebouw-tot-gebouw variatie leiden tot de kwetsbaarheidskromme voor de betreffende typologie. Deze kwetsbaarheidskromme wordt in de risicoberekeningen toegepast. TNO en TU Delft hebben voor de meest kwetsbare typologieën gevoeligheidsstudies uitgevoerd. Op basis daarvan zijn de keuzes onderbouwd voor de uiteindelijk toegepaste kwetsbaarheidskrommen en waarden voor de gebouw-tot-gebouw variatie in de uitgevoerde risicoberekeningen. In de gevoeligheidsstudies zijn alle relevante modelparameters binnen een typologie gevarieerd binnen een range die in werkelijkheid verwacht wordt op te treden. Het resultaat van deze

gevoeligheidsstudie is de gebouw-tot-gebouw variatie zoals die binnen een typologie wordt aangehouden.

Op de hiervoor beschreven wijze wordt voor een individueel huis een correcte berekening gemaakt van het overlijdensrisico conform de Meijdam norm. Dit resultaat is eveneens conform NPR 9998, die het gebruik van risicogebaseerde rekenmethoden toestaat.

Tevens wordt op deze wijze snel gekomen tot een eenduidige keuze voor de versterking van gebouwen, zodanig dat alle gebouwen in Groningen aantoonbaar veilig zijn (een aantoonbaar individueel risico  $<10^{-5}$  hebben).

## 2.3 Risicomiddeling

### 2.3.1 Algemeen

In de bepaling van risico's wordt een zekere mate van risicomiddeling toegepast. Dit is de mate waarin risico's in tijd en ruimte gemiddeld worden. Hoewel we risicomiddeling ten principale zoveel mogelijk proberen te vermijden ontkomen we er nooit helemaal aan. 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 vaak de specifieke exacte eigenschappen van het bouwwerk dat onderhevig is aan de dreiging nooit precies bekend. Deze zijn slechts met veel moeite of door middel van destructief onderzoek vast te stellen. Daarnaast geldt dat de studietijd beperkt is en veel onzekerheden daardoor onbekend (epistemisch) 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, soms verborgen, 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 IR 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 bouwnormen

Net zoals in andere normen worden in bouwnormen, en meer specifiek NPR 9998, risico's gemiddeld langs bepaalde doorsnedes in de gebouwenpopulatie. Dit betreft onder meer onderstaande aspecten (de opsomming is niet volledig):

- er wordt gewerkt met één kans op overlijden gegeven instorten (in de NPR wordt gemiddeld over alle gebouwen en daarmee dus over typologieën, in een typologie aanpak is dit specifiek per typologie);

- er wordt gewerkt met één waarde voor de drift limit (in de NPR wordt gemiddeld over alle gebouwen en daarmee dus over typologieën, in een typologie aanpak is dit specifiek per typologie);
- er is één formule voor de dynamische demping (in de NPR wordt gemiddeld over alle gebouwen en daarmee dus typologieën, in een typologie aanpak is dit specifiek per typologie)

Daarom levert een NPR 9998 berekening niet automatisch een fijnere differentiatie naar risico op dan een typologiebenadering.

#### 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: risicomiddeling 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.

CONCEPT

## 3 Typologie aanpak 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.

Gebouwen worden 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 simpele inspecties snel 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. Er zullen waarschijnlijk altijd gebouwen zijn die tot de uitzonderingen behoren. Hoe hiermee om te gaan is afzonderlijk beschreven.

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

Per gebouw worden op basis van archiefgegevens en een gerichte inspectie de kenmerken vastgesteld die tezamen bepalen tot welke typologie dit gebouw hoort. De kenmerken die daarbij van belang zijn, betreffen de seismische hoofdkenmerken van het gebouw, constructietype en -materiaal en de opbouw van de gevels.

In hoofdstuk 4 is per typologie omschreven welke de relevante seismische kenmerken zijn en hoe deze vastgesteld kunnen worden. Toelichting op de keuzes voor deze kenmerken is beschreven in bijlage D.1.

In bijlagen B en D is aangegeven hoe tot de keuze van deze kenmerken is gekomen, en hoe de uiteindelijke indeling in typologieën tot stand is gekomen. Bijlage C geeft een checklist die gebruikt kan worden bij de inspectie van gebouwen.

Een afzonderlijk criterium betreft de bouwkundige staat van de constructie. Deze wordt bepaald door de beoordeling van aanwezige schade (scheurvorming). Indien de staat als 'slecht' wordt beoordeeld, wordt het gebouw als uitzondering beschouwd, vervallen de vervolgstappen 2 en 3 en wordt een beoordeling uitgevoerd volgens paragraaf 3.2.4.

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

Zodra het gebouw is ingedeeld in een typologie, wordt op basis van de locatie van het gebouw bepaald of dit aan de norm voldoet. Hiertoe worden per typologie kaarten ontwikkeld waarin per geografische locatie en per typologie is aangegeven of die typologie wel of niet voldoet aan de norm, gegeven het gekozen scenario voor de gasproductie.

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 is constructieve versterking nodig. 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 de woning aan de norm te laten voldoen.

Indien uit stap 2 volgt dat versterking nodig is, dan moeten één of meerdere versterkingsmaatregelen worden gekozen die ervoor zorgen dat deze woning zodanig wordt versterkt dat deze voldoet aan de norm. Per typologie wordt een overzicht van maatregelen vastgesteld waarmee een normoverschrijving ongedaan gemaakt kan worden. Deze worden gegeven in de rapportages per typologie. Deze maatregelen dienen nog wel uitgewerkt te worden tot een definitief ontwerpadvies, toegespitst op een specifieke woning.

Indien uit stap 2 volgt dat geen versterking nodig is hoeven geen maatregelen te worden toegepast. Voor zover van toepassing, volstaat herstel van aanwezige lichte schade.

### 3.2.4 *Uitzonderingen*

Indien op basis van de kenmerken die zijn bepaald in stap 1 een toewijzing aan een van de typologieën niet mogelijk is, dan is maatwerk nodig. Uitgangspunt van de typologie aanpak is om het toekennen van uitzonderingen tot een minimum te beperken gezien de tijd en overlast die gepaard gaat met een individuele beoordeling.

Een belangrijke categorie uitzonderingen betreft gebouwen waarbij uit de inspecties volgt dat de bouwkundige staat zodanig is dat de constructie is aangetast.

Criteria om gebouwen in deze categorie in te delen zijn ten minste dat:

1. Het materiaal van de hoofdconstructie sterk gedegradeerd is. Voorbeelden zijn: grootschalige corrosie van staal, aanwezigheid van betonrot, houten constructiedelen beschadigd, forse scheuren in metselwerk. Voor de definitie van forse scheuren in metselwerk wordt als criterium gebruikt dat er in het dragende metselwerk van het gebouw één of meerdere scheuren aanwezig zijn met een scheurwijdte van 15 mm of meer. Dit komt overeen met schadeklasse 4 of 5 conform de schade-classificatie in [CUR COB, 2012]. Dit is nader toegelicht in paragraaf 4.7.

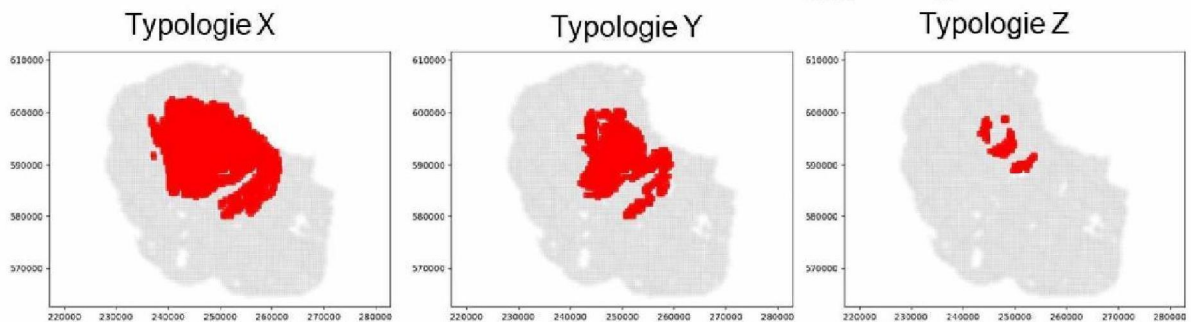
2. Er sprake is van scheefstand van (delen van) de draagconstructie waardoor gevaar is ontstaan voor instorting. Herstel is noodzakelijk waarbij de scheefstand evenals de oorzaak ervan worden verholpen.

Voor deze categorie gebouwen wordt geadviseerd om onderdelen van het gebouw die gevoelig zijn voor seismische belastingen en niet of niet voldoende bevestigd of verankerd zijn aan de rest van het gebouw, direct vast te zetten.

### 3.3 Voorbeeld werking in de praktijk

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

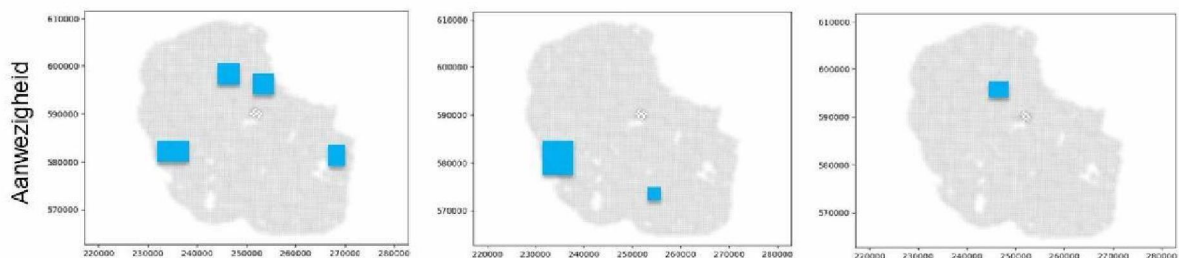
1: Gegeven een kaartje van typologieën X, Y en Z, waarvan per typologie is bepaald waar binnen het aardbevingsgebied deze wel (grijs) of niet (rood) voldoet aan de veiligheidsnorm. In dit voorbeeld, dat alleen dient ter illustratie van de ontwikkelde typologie aanpak, is een aantal fictieve typologieën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



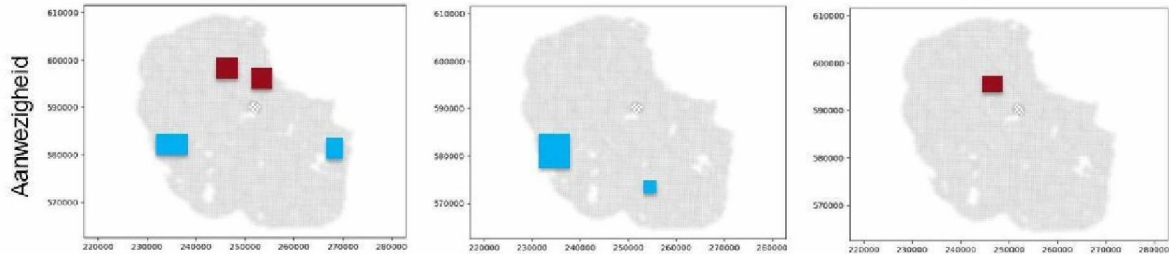
Voor typologie X geldt dat deze in een groot deel van het aardbevingsgebied niet voldoet. Dat gebied is kleiner voor typologie Y en nog kleiner voor typologie Z.

Opgemerkt wordt dat in deze figuren niet wordt getoond in welke mate de typologie niet aan de norm voldoet. Uitgangspunt in de procedure is dat de meest kritische locatie bepaalt welke mate van versterking in stap 4 wordt toegepast, en dat deze wordt gehanteerd voor het gehele ingekleurde gebied.

2: Vervolgens wordt met de aanwijzingen uit hoofdstuk 4 bepaald welke gebouwen behoren tot typologie X, Y en Z. Dit kan schematisch als volgt worden weergegeven, waarbij de blauwe vlakjes aangeven wat de locaties zijn van de beschouwde gebouwen die behoren tot respectievelijk typologie X, Y en Z:



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 versterkt moeten worden. In dit voorbeeld leidt dit tot onderstaand resultaat:



De rood ingekleurde vlakjes geven aan dat de beschouwde gebouwen zich bevinden op locaties waar de betreffende typologie niet voldoet aan de norm. Deze gebouwen moeten dus versterkt worden. 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 alle gebouwen van typologie Z versterkt moeten worden.

4: Als laatste stap wordt het maatregelenpakket per typologie toegepast waarmee die typologie in het hele gebied aan de norm voldoet. Dit maatregelenpakket moet vervolgens per woning nader worden uitgewerkt en gedetailleerd door de ingenieursbureaus, waarna het kan worden toegepast.



## 4 Indeling in typologieën

### 4.1 Inleiding

De indeling van gebouwen in typologieën is gebaseerd op de gebouwkenmerken die relevant zijn voor het gedrag van gebouwen onder aardbevingsbelasting. Dit is van belang voor een goede beoordeling of gebouwen in een bepaalde typologie voldoen aan de veiligheidsnorm (Meijdam norm voor individueel risico).

### 4.2 Keuze van kenmerken voor typologie indeling

Voor de toekenning van een gebouw aan een typologie moeten voor alle te beoordelen gebouwen in elk geval de volgende vier kenmerken worden vastgesteld (deze worden verder uitgewerkt in paragraaf 4.3):

1. Het materiaal van de draagconstructie die de horizontale krachten afdraagt in beide horizontale draagrichtingen (X en Y);
2. Het constructiesysteem in X en Y richting;
3. De gebouwhoogte (uitgedrukt in aantal verdiepingen; een kelder telt niet mee, aanwezigheid van een zolder wordt afzonderlijk benoemd);
4. Keuze of het een vrijstaande woning is of geschakelde bouw (bijvoorbeeld rij, 2-onder-1 kap of een appartementengebouw). Bij geschakelde bouw aangeven of dit een seriematige of niet-seriematige bouw is.

Op basis van deze kenmerken kan een deel van de gebouwen al eenduidig in een typologie worden ingedeeld. Dit betreft gebouwen waarvan de draagconstructie uit hout, staal of beton bestaat.

Voor metselwerk gebouwen is een verdere verfijning noodzakelijk. Daarvoor moeten onderstaande aanvullende kenmerken worden vastgesteld:

5. Materiaal van de verdiepingsvloeren (keuze uit Beton of Hout);
6. Opbouw van de gevels (is het wel of geen spouwmuur);
7. Hoeveelheid openingen in de maatgevende doorsnede van de gevel, uitgedrukt in een percentage.

Een toelichting op het belang van deze kenmerken is gegeven in bijlage D.1.

Naast deze kenmerken zijn er meerdere overige kenmerken die het constructieve gedrag van een gebouw beïnvloeden. Deze kenmerken zijn per typologie nader onderzocht. De invloed ervan op de seismische sterkte is verrekend in de waarde van de gebouw-tot-gebouw variatie die wordt vastgesteld per typologie. Deze overige kenmerken zijn dus niet bepalend voor de toewijzing van een gebouw aan een typologie. Dit wordt in bijlage B en D nader toegelicht en onderbouwd.

De toekenning van een gebouw aan een typologie gaat stap-voor-stap waarbij bovengenoemde zeven kenmerken worden bepaald. De eerste vier stappen worden voor alle gebouwen doorlopen. Alleen voor gebouwen waarvan het deel van de constructie dat de seismische krachten afdraagt uit metselwerk bestaat, zijn drie aanvullende stappen nodig.

De stappen, die overeenkomen met de hiervoor genoemde kenmerken, zijn hierna verder uitgewerkt.

### 4.3 Stappen voor toekenning van gebouwen aan een typologie

De toekenning van een gebouw aan een typologie gaat in stappen. Per stap kunnen gebouwen al dan niet definitief worden ingedeeld in een typologie. Deze stappen worden hieronder omschreven.

#### 4.3.1 *Stap 1: Bepaal het materiaal van de draagconstructie die de horizontale belasting moet afdragen*

Een belangrijk mechanisme voor falen van een gebouw is het verlies aan stabiliteit in één van de draagrichtingen als gevolg van de aardbevingsbelasting. Het materiaal van de constructie is daarin de eerste onderscheidende parameter.

Deze keuze wordt voor de beide hoofddraagrichtingen van het gebouw (X en Y) vastgelegd. De toegepaste materialen kunnen voor X en Y richting verschillen, maar in de praktijk zal dit niet vaak voorkomen. Is dit wel het geval, dan wordt de betreffende woning niet aan een van de typologieën toegekend en is maatwerk nodig (zie ook paragraaf 4.7). Er worden 5 mogelijke keuzes gegeven voor het constructiemateriaal:

- constructies uit staal
- constructies uit hout
- constructies uit gewapend, ter plaatse gestort, beton (gietbouw)
- constructies uit geprefabriceerd beton
- constructies van metselwerk (stapelbouw; zoals baksteen metselwerk, kalkzandsteen)

Opgemerkt wordt dat dit uitsluitend de dragende delen betreft. Gebouwen met een metselwerk gevel, maar met een draagconstructie van een ander materiaal (hout, staal of beton) worden bij het materiaal van de draagconstructie ingedeeld.

Indien het constructiemateriaal niet op basis van archieven kan worden vastgesteld dient dit op basis van een (visuele) inspectie van het gebouw en de constructie bepaald te worden.

#### 4.3.2 *Stap 2: Bepaal het constructiesysteem voor het gebouw in beide richtingen*

Het constructiesysteem van het gebouw moet worden bepaald voor de beide hoofddraagrichtingen van het gebouw (X en Y). Dit systeem kan in beide hoofddraagrichtingen verschillen. Er wordt onderscheid gemaakt in de volgende constructiesystemen:

1: Er is een draagconstructie van kolommen en balken. De belasting wordt alleen door de kolommen en balken afgedragen, alsmede door schijfwerking van de vloeren. De invloed van eventuele wanden en gevels wordt voor de berekening verwaarloosd.

Opmerking: Dit type draagconstructie komt alleen voor bij draagconstructies van staal, hout en gewapend beton.

2: Er is sprake van een raamwerk met momentvaste verbindingen. Deze draagconstructie is een variant op 1 waarbij de belasting uitsluitend via het raamwerk wordt afgedragen.

Opmerking: Dit type draagconstructie komt alleen voor bij stalen en betonnen draagconstructies.

3: Er is sprake van een raamwerk met schoren.

Opmerking: Dit komt alleen voor bij stalen constructies en komt niet voor bij de andere constructiematerialen.

4: De constructie is opgebouwd uit portalen.

5: Er is sprake van een hybride (gemengd) constructiesysteem.

Voorbeeld is een constructiesysteem met betonnen kolommen met ingevulde metselwerk wanden waarbij de stabiliteit volgt uit de samenwerking van beide bouwdelen. In dit geval wordt geen typologie toegekend, en wordt geadviseerd een afzonderlijke beoordeling uit te voeren.

6: De horizontale stabiliteit wordt ontleend aan schijfwerking van gevels en/of wanden.

Opmerking 1: Dit komt alleen voor bij constructies uit hout, beton of metselwerk.

Opmerking 2: In geval van metselwerk woningen betreft dit een constructiesysteem waarbij de horizontale stabiliteit wordt ontleend aan o.a. penanten (in de gevel of binnenin het huis) eventueel aangevuld met flenswerking uit de dragende wanden.

7: De horizontale stabiliteit wordt ontleend aan doorgaande, constructief gekoppelde, betonnen vloeren opgelegd op wanden uit metselwerk of beton.

8: Er is een ander constructiesysteem voor de stabiliteit.

Opmerking: Bij aanwezigheid van een ander constructiesysteem wordt het gebouw niet in een van de typologieën ingedeeld en wordt het beschouwd als een uitzondering.

Indien er geen duidelijk zichtbaar constructiesysteem is, moet worden nagegaan welke gebouwonderdelen bij kunnen dragen aan de stabiliteit. Een specifiek voorbeeld hiervan zijn gebouwen uit metselwerk met grote openingen op de begane grond. Indien deze openingen zijn ingevuld met grote glaspartijen of een zogeheten vliesgevel, dan kan aan die invulling geen constructieve eigenschap worden toegekend. Overigens wil dit niet zeggen dat de constructie geen weerstand geeft. In de praktijk kan de stabiliteit dan worden ontleend aan aanwezige binnenwanden of wordt de stabiliteit ontleend aan over woningscheidende bouwmuren doorlopende vloeren (constructief systeem 6). In bijlage C wordt bij de beschrijving van de kenmerken per typologie, bij de gebouwen van metselwerk expliciet aandacht besteed aan deze categorie.

#### 4.3.3 Stap 3: Bepaal het aantal verdiepingen

Hiervoor geldt dat de begane grond als verdieping telt. Eventuele kelders en zolders of vlieringen (een zolder is de hoogste begaanbare vloer onder een hellend dak) tellen niet mee. Deze worden wel genoteerd als deze aanwezig zijn. Bij een gebouw met hoogteverschillen geldt het hoogste aantal verdiepingen.

#### 4.3.4 *Stap 4: Bepaal of het een vrijstaande woning is of dat er sprake is van geschakelde bouw*

Onder geschakelde bouw worden in elk geval de volgende typen gebouwen verstaan:

- rijtjeswoningen
- 2-onder-1 kap woningen
- appartementengebouwen (woonblokken)
- binnenstedelijke woningbouw, die aan elkaar gebouwd is.

Onderscheid wordt gemaakt in seriematig geschakeld (zoals bij rijtjeswoningen, die met hetzelfde bouwsysteem binnen hetzelfde bouwproject zijn gerealiseerd) of niet-seriematig geschakeld (voorbeeld zijn de binnenstedelijke woningen, waarbij de woningen individueel zijn gerealiseerd). Bij de beoordeling van vrijstaande woningen zijn de volgende aspecten van belang:

- Indien een woning voorzien is van een aanbouw met hetzelfde constructieve systeem, is deze aanbouw onderdeel van de woning, en wordt het geheel als vrijstaande woning beschouwd. Ook een aangebouwde garage valt hieronder.
- Als twee woningen zeer dicht naast elkaar zijn gebouwd, echter met een eigen constructief systeem, zonder gedeelde fundering of gedeelde bouwmuren, zijn beide woningen als vrijstaand te beschouwen. Indien er een mandelige bouwmuur is, dan is er sprake van geschakelde bouw.

#### 4.4 **Overzicht typologieën hout, staal en beton**

Naar aanleiding van deze eerste 4 stappen worden de gebouwen met een hoofddraagconstructie uit Hout, Staal of Beton in een typologie ingedeeld. De uitgebreide beschrijving van de kenmerken per (sub)typologie is gegeven in bijlage B.

##### 4.4.1 *Typologie HOUT*

Typologie HOUT met daaronder 2 subtypologieën:

HOUT1: Houtskeletbouw met maximaal 2 verdiepingen

HOUT2: Portaalconstructie met gelamineerd hout met maximaal 2 verdiepingen

Opmerking: Houten gebouwen met meer verdiepingen komen volgens een eerste inventarisatie niet voor in het Groninger aardbevingsgebied. Indien dit toch het geval blijkt te zijn, dan wordt een individuele beoordeling aanbevolen.

Opmerking: Landbouwschuren met een houten draagconstructie zijn (nog) niet ingedeeld. Deze worden binnen de typologie METSELWERK-F (boerderijen) nader onderzocht.

##### 4.4.2 *Typologie STAAL*

Typologie STAAL, met de volgende subtypologieën:

STAAL1: Raamwerk met 1 of 2 verdiepingen

STAAL2: Raamwerk met 3 of 4 verdiepingen

STAAL3: Raamwerk met 5 of meer verdiepingen

- STAAL4: Constructie met schoren met 1 of 2 verdiepingen
- STAAL5: Constructie met schoren met 3 of 4 verdiepingen
- STAAL6: Constructie met schoren met 5 of meer verdiepingen
- STAAL7: Bedrijfsgebouw met stalen portaalconstructie (driesscharnierspant)

#### 4.4.3 *Typologie PREFAB en typologie BETON*

Bij gebouwen van beton wordt onderscheid gemaakt tussen gebouwen van geprefabriceerd beton of gemaakt van ter plaatse gestort beton:

Typologie PREFAB met 3 subtypologieën:

- PREFAB1: Prefab betonnen constructie met 1 of 2 verdiepingen
- PREFAB2: Prefab betonnen constructie met 3 of 4 verdiepingen
- PREFAB3: Prefab betonnen constructie met 5 of meer verdiepingen

Typologie BETON met 7 subtypologieën:

- BETON1: Gietbouw woningen met stabiliteitswanden, 1 of 2 verdiepingen
- BETON2: Gietbouw woningen met stabiliteitswanden, 3 of 4 verdiepingen
- BETON3: Gietbouw woningen met stabiliteitswanden, 5 of meer verdiepingen
- BETON4: Laag betonnen gebouw met kolommen en balken/vloeren
- BETON5: Ter plaatse gestort beton met raamwerkconstructie met 1 of 2 verdiepingen
- BETON6: Ter plaatse gestort beton met raamwerkconstructie met 3 of 4 verdiepingen
- BETON7: Ter plaatse gestort beton met raamwerkconstructie met 5 of meer verdiepingen

#### 4.5 **Typologiekenmerken voor gebouwen uit metselwerk**

Voor gebouwen waarvan de draagconstructie uit metselwerk bestaat geldt dat naast de hiervoor genoemde kenmerken aanvullende kenmerken nodig zijn om de gebouwen in een typologie in te delen.

Bij metselwerk gebouwen geldt dat in de meeste gevallen de stabiliteit wordt verzorgd door wanden. De opbouw en dimensies van die wanden zijn daarom ook relevant. Daarnaast speelt de uitvoering van de vloeren een grote rol. De volgende aanvullende kenmerken zijn bij metselwerk gebouwen relevant voor de typologie indeling.

##### 4.5.1 *Stap 5: Bepaal het materiaal van de verdiepingsvloer*

Hiervoor kan worden gekozen tussen een vloer van beton of van hout.

##### 4.5.2 *Stap 6: Bepaal de opbouw van de gevel*

Onderscheid wordt gemaakt tussen gevels opgebouwd uit steens metselwerk zonder spouw en gevels opgebouwd als spouwmuur met een halfsteens gemetseld buitenspouwblad.

#### 4.5.3 *Stap 7: Bepaal het percentage openingen in de langsgevel*

Seriematige woningbouw wordt gekenmerkt door woningscheidende dragende muren waarop de vloeren liggen. Haaks op de dragende muren staan de langsgevels die bijdragen aan de stabiliteit in de langsrichting en dus ook horizontale krachten ten gevolge van een aardbeving moeten afdragen. Een eventuele aanbouw wordt niet tot deze langsgevels gerekend.

De horizontale doorsnede van de langsgevel op de begane grondvloer wordt beschouwd op die hoogte waar sprake is van het kleinste aandeel metselwerk in die doorsnede. Dit betreft dus zowel de voor- als de achtergevels. Ramen, deuren en zogeheten vliesgevels worden volledig als openingen meegeteld (ook de kozijnen), zoals ook de doorgang richting een eventuele aanbouw. De langsgevel met het hoogste percentage openingen in de doorsnede is de maatgevende gevel.

Voor geschakelde woningbouw (rijtjeswoningen of 2-onder-1 kap) is het onderscheid van belang tussen woningen met minder dan 85% openingen in de maatgevende langsgevel en woningen met 85% of meer openingen in de maatgevende langsgevel. Bij meer dan 85% openingen domineert het faalmechanisme waarbij een soft-storey optreedt en wordt een hogere kwetsbaarheid gevonden. Dit wordt bevestigd door berekeningen van Mosayk [Mosayk, 2019].

In de praktijk is het percentage openingen in de langsgevel alleen van belang voor geschakelde seriematige metselwerk gebouwen. Dit zijn de gebouwen die vallen binnen de hierna gedefinieerde typologie METSELWERK-A.

#### 4.6 **Overzicht typologieën metselwerk**

Er worden op basis van de kenmerken uit stap 1 tot en met 7 in totaal 6 typologieën met naar verwachting 10 á 12 subtypologieën onderscheiden voor metselwerk. De eigenschappen van deze subtypologieën zijn gegeven in bijlage B. De subtypologieën zijn hierna benoemd. Opgemerkt wordt dat bij de nadere uitwerking van de genoemde subtypologieën besloten kan worden tot een aanvullende splitsing dan wel samenvoeging. Dit wordt indien nodig in het betreffende typologie specifieke rapport benoemd en uitgewerkt.

##### 4.6.1 *Typologie METSELWERK-A*

Typologie METSELWERK-A bestaat uit geschakelde seriematige metselwerk gebouwen.

Subtypologieën binnen deze typologie zijn:

METSELWERK1: Seriematige bouw van rijtjeswoningen of 2 onder 1 kap, percentage openingen < 85% en betonnen vloeren

METSELWERK2: Seriematige bouw van rijtjeswoningen of 2 onder 1 kap, percentage openingen ≥ 85% en betonnen of houten vloeren

METSELWERK3: Seriematige bouw van rijtjeswoningen of 2 onder 1 kap, percentage openingen < 85% en houten vloeren

#### 4.6.2 *Typologie METSELWERK-B*

Typologie METSELWERK-B bestaat uit drive-in woningen.

De enige subtypologie binnen deze typologie is:

METSELWERK4: Seriematige bouw met 3 verdiepingen met percentage opening van 100% in de langsgevel op de begane grond. Dit betreft drive-in woningen.

#### 4.6.3 *Typologie METSELWERK-C*

Typologie METSELWERK-C bestaat uit Vrijstaande woningen.

Subtypologieën binnen deze typologie zijn:

METSELWERK5: Vrijstaande woning, steens muur, houten vloeren

METSELWERK6: Vrijstaande woning, spouwmuur, betonnen vloeren

METSELWERK7: Vrijstaande woning, spouwmuur, houten vloeren

#### 4.6.4 *Typologie METSELWERK-D*

Typologie METSELWERK-D bestaat uit Woonblokken met 3 of meer verdiepingen.

Mogelijke subtypologieën binnen deze typologie zijn:

METSELWERK8: Woonblok type 1

METSELWERK9: Woonblok type 2

De verdere uitwerking van deze subtypologieën wordt beschreven in het typologiespecifieke rapport.

#### 4.6.5 *Typologie METSELWERK-E*

Typologie METSELWERK-E bestaat uit Panden in de binnenstad.

De enige subtypologie binnen deze typologie is:

METSELWERK10: Binnenstedelijk pand

#### 4.6.6 *Typologie METSELWERK-F*

Typologie METSELWERK-F bestaat uit Woonhuizen van Boerderijen.

Subtypologieën binnen deze typologie zijn nog niet gedefinieerd.

In een later te verschijnen rapportage wordt deze typologie nader uitgewerkt.

### 4.7 **Aanvullende bepalingen bij de typologie-indeling**

De volgende opmerkingen worden gemaakt bij de bovenstaande typologie-indeling:

Opmerking 1: De voorgestelde typologie-indeling is gebaseerd op onversterkte gebouwen. Deze indeling houdt geen rekening met de noodzaak tot versterking. Gebouwen die reeds versterkt zijn, worden per definitie geacht te voldoen aan de veiligheidseis.

Opmerking 2: Er zijn uitzonderingen op deze indeling. Dit betreft gebouwen die (een) zodanige (combinatie van) kenmerken hebben dat deze niet in één van de beschreven typologieën kunnen worden ingedeeld. In dat geval is maatwerk nodig. Dit kan bestaan uit een nadere analyse van de constructie om na te gaan of een typologie toekenning mogelijk is, waarbij een conservatieve keuze wordt gemaakt

(bijvoorbeeld als gekozen moet worden tussen 2 mogelijke typologieën). Dit kan ook betekenen dat een individuele beoordeling van het gebouw nodig is.

Opmerking 3: Een aspect dat eveneens moet worden beschouwd als aanvullende informatie is de bouwkundige kwaliteit van de constructie. De eigenschappen voor de typologieën in termen van kwetsbaarheid die in bijlage C worden beschreven, zijn afgeleid voor een staat van de constructie die, ten aanzien van de seismische eigenschappen, als voldoende tot goed kan worden aangemerkt.

Indien dit niet het geval is, dan dienen voor het betreffende gebouw aanvullende werkzaamheden te worden uitgevoerd. De kwalificatie 'onvoldoende' voor de bouwkundige staat, is van toepassing als er schade aan de constructie is waargenomen die zodanig ernstig is dat de constructie niet in staat is de krachten af te dragen. Om dit te kunnen bepalen wordt voor gebouwen van metselwerk gebruik gemaakt van de schade classificatietabel zoals weergegeven in Tabel 1 [CUR/COB, 2012]. Indien sprake is van schadeklasse 4 of 5, dan is mogelijk sprake van schade die zodanig is dat deze invloed kan hebben op de seismische sterkte. Deze gebouwen worden dan niet in de typologie ingedeeld waar ze normaal zouden passen, maar moeten afzonderlijk worden beschouwd. Deze tabel is opgenomen in het inspectieformulier, dat in bijlage C is gegeven.

Geadviseerd wordt om schade uit schadeklasse 3 op korte termijn te verhelpen om te voorkomen dat na verloop van tijd schades van hogere klassen gaan ontstaan. De invloed van schades van klasse 3 of minder wordt gezien als van onderschikt belang voor de seismische weerstand. Een eventuele invloed op het seismisch gedrag is impliciet opgenomen in de gebouw-tot-gebouw variatie.

Hierbij moet worden opgemerkt dat bij het aanwezig zijn van schadeklasse 4 en 5 geadviseerd wordt na te gaan of het gebouw aan het afkeurniveau voldoet zoals dat door het Bouwbesluit wordt voorgeschreven.



Tabel 1 Schade classificatietabel (overgenomen uit [CUR/COB, 2012])

Schade-categorie	Schade-klasse	Omschrijving	Scheurwijdte (metselwerk)	Karakterisering schadebeeld	Indicatie Relatieve Hoekverdraaiing
	0	Verwaarloosbaar	< 0,1 mm	Haarscheurtjes	< 1:1600 – 1:500
Esthetisch	1	Zeer licht	0,1 tot 1 mm	Enige scheurvorming in metselwerk. Kleine scheuren, meestal beperkt tot pleisterwerk, die eenvoudig kunnen worden weggewerkt.	1:1600 – 1:300
	2	Licht	tot 5 mm	Scheuren kunnen aan de buitenzijde zichtbaar zijn en kunnen tot vochtdoorslag leiden. Deuren en ramen klemmen licht. Geringe scheurvorming, kan eenvoudig hersteld worden.	1:1600 – 1:300
Functioneel	3	Matig	5 tot 15 mm, of meerdere scheuren > 3 mm	Deuren en ramen klemmen. Mogelijke schade aan nutsaansluitingen. Vochtdoorslag mogelijk. Scheuren zijn zodanig dat metselwerk dient te worden hersteld	1:1600 – 1:100
	4	Ernstig	15-25 mm, Ook afhankelijk van het aantal scheuren	Bruikbaarheid en toegankelijkheid ernstig aangetast. Voelbare scheefstand. Herstel vergt vervanging van muurdelen en andere constructieve elementen.	1:1600 – 1: 100
Constructief	5	Zeer ernstig	> 25 mm, hangt van aantal af	Instortingsgevaar. Volledige renovatie noodzakelijk.	> 1:300

## 5 Uitgangspunten voor de beoordeling

De berekeningen voor de vlekkenkaarten per typologie worden uitgevoerd met de bevroren versie van de TNO modelketen zoals gereviewed door het KEM panel [KEM, 2020; TNO, 2019]. Naast het vastleggen van deze versie van de TNO modelketen moet bepaald worden welke input keuzes voor de modelketen gemaakt worden om tot de definitieve versie van de vlekkenkaarten te komen.

Deze keuzes betreffen:

- het gasproductie scenario
- het seismologisch model
- het bodembewegingsmodel
  - Inclusief de keuze voor het al dan niet gebruiken van correlaties tussen spectrale periodes voor de bodembeweging aan het maaiveld
- het model voor de kwetsbaarheidskrommen
- het consequentie model: de kans op overlijden gegeven een bepaalde mate van instorting

De eerste drie genoemde modellen tezamen leveren de seismische dreiging, waarvoor de gebruikte uitgangspunten hieronder worden gegeven.

### 5.1 Seismische dreiging

In de berekening van de vlekkenkaarten zijn voor de berekening van gasproductie tot seismische dreiging dezelfde uitgangspunten gehanteerd als die momenteel worden gebruikt voor de huidige (mei 2020) beschikbare NPR webtool (geïmplementeerd in de webtool in november 2018 en tot op heden ongewijzigd). Verwezen wordt naar de volgende referenties en uitgangspunten:

1. Kamerbrief kabinetspad afbouw gasproductie [MEZK, 2018a] en verwachtingenbrief productie [MEZK, 2018b]
2. Gasproductie drukken conform [NAM, 2018a] op basis van het gemiddelde winter scenario van het kabinetspad, conform inzetstrategie 1, oktober 2018
3. Het seismisch bronmodel V5, [Bourne et al, 2019]
4. Het breukenmodel, [Bourne & Oates, 2018]
5. De 7 punts Mmax verdeling volgens de expert Mmax workshop, [Coppersmith et al, 2016]
6. Het bodembewegingsmodel V5, [Bommer et al, 2017]

Zodra er nieuwe modellen beschikbaar zijn, die breed geaccepteerd zijn, kunnen die nieuwe modellen worden geïmplementeerd in de TNO modelketenberekening. Op basis van die nieuwe instellingen kunnen dan updates van de vlekkenkaarten worden gemaakt. Dit kan snel worden uitgevoerd.

### 5.2 Kwetsbaarheids- en consequentiemodellen

Met het kwetsbaarheidsmodel wordt de kans op falen van een gebouw uit een typologie uitgerekend en met het consequentiemodel wordt vervolgens de kans op overlijden gegeven falen berekend.

Het kwetsbaarheidsmodel bestaat uit een aantal kwetsbaarheidskrommen die de kans op het optreden van falen als functie van een intensiteitsmaat weergeeft. Het

consequentiemodel geeft vervolgens aan wat de kans op overlijden is, gegeven het optreden van falen.

De kwetsbaarheidskrommes worden gedefinieerd door de mediane seismische weerstand (op basis van één of meerdere referentiegebouwen) en de spreiding rondom de mediaan. Deze spreiding wordt gedefinieerd door:

- De zogenaamde record-to-record variability, oftewel de spreiding in gedrag van het referentiegebouw bij verschillende aardbevingssignalen.
- Een getalswaarde voor de gebouw-tot-gebouw variatie, waarmee de spreiding in gedrag binnen de typologie wordt verrekend.
- Een factor die de modelonzekerheid in rekening brengt. De modelonzekerheid verrekent de spreiding in rekenresultaten, vergeleken met het werkelijke gedrag van het gebouw.

Voor de beschrijving van zowel het kwetsbaarheidsmodel als het consequentiemodel wordt als startpunt gebruik gemaakt van [Crowley et al, 2019] en [Crowley et al, 2020]. Per typologie is vervolgens door studies van TNO en TU Delft bepaald of de invoerparameters voor de bepaling van de kwetsbaarheidskrommes aanpassing behoeven. Is dat niet het geval, dan zijn de kwetsbaarheidskrommen en de bijbehorende spreidingsparameters gelijk aan die in de NAM HRA studies van 2019 en 2020 respectievelijk.

In deze studie wordt als uitgangspunt gehanteerd dat de grootste van de onzekerheidsmarges zoals gevonden door [Crowley et al, 2019], [Crowley et al, 2020] en de resultaten uit onze berekeningen zal worden gebruikt in de uiteindelijke berekening van het risico en het vastleggen van de vlekkenkaarten.

### 5.3 Berekening van het risico

Het berekende risico is opgebouwd uit bijdragen van drie zogenaamde 'collapse states'. Per collapse state worden de gevolgen in termen van overlijdenskansen gekwantificeerd. Onderscheid is gemaakt in collapse state (CS) 1, 2 en 3. CS1 en CS2 zijn de collapse states voor het bezwijken van kleine gedeeltes van het gebouw waarbij een beperkte overlijdenskans in rekening is gebracht. CS3 beschrijft het globaal instorten van het gebouw met daaraan gekoppeld een grote overlijdenskans. Daarnaast is ook de bijdrage van het falen van schoorstenen toegevoegd aan het overlijdensrisico. De achtergronden hiervan zijn verder toegelicht in bijlage **Error! Reference source not found.** Deze werkwijze komt overeen met het consequentiemodel dat voorgesteld is door Eucentre [Crowley et al, 2019]. Per typologie wordt nader onderzocht met welke waarden als invoer voor het consequentiemodel wordt gerekend. Gemotiveerd wordt of dit de V6 [Crowley et al, 2019], de V7 [Crowley et al, 2020] dan wel aangepaste inputwaarden zijn. Dit wordt in de typologie specifieke rapporten nader uitgewerkt.

### 5.4 Uitwerking per typologie

De modelketenberekening wordt uitgevoerd voor elk van de onderscheiden subtypologieën die in hoofdstuk 4 en bijlage B zijn omschreven. Per typologie is rekening gehouden met de onzekerheden in gebouweigenschappen binnen de typologie en met de onzekerheden bij de gebruikte rekenmodellen. Per typologie wordt in een afzonderlijke rapportage weergegeven welke waarden voor de

onzekerheden zijn bepaald, hoe deze zijn afgeleid en hoe deze waarden vertaald zijn naar marges in de berekening.

De modules die in de TNO modelketen zijn gebruikt voor de beoordeling van de typologieën vertonen gelijkenis met de NAM HRA. In tegenstelling tot de NAM HRA is de typologie aanpak zo uitgewerkt dat deze geldig is voor de beoordeling van individuele gebouwen. Er zijn in essentie vier hoofdpunten die dit mogelijk maken en waarop de typologie aanpak dus verschilt van de NAM HRA:

1. Er wordt in detail per typologie bestudeerd 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.
2. Er wordt geen gebruik gemaakt van een exposure database maar van vlekkenkaarten. Door toepassing van de inspectieprocedure in dit rapport is van individuele gebouwen precies bekend tot welke typologie ze behoren.
3. Het kan voorkomen dat er bij de inspectie zoals beschreven onder punt 2 geen typologie toe te kennen valt aan een gebouw en dat daarom individuele beoordeling nodig is.
4. In de typologie aanpak wordt rekening gehouden met de bouwkundige staat die moet blijken uit inspectie. Indien een gebouw in schadeklasse 4 of 5 valt is individuele beoordeling nodig.

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

## 5.5 Vaststellen vlekkenkaart

Per typologie wordt een vlekkenkaart bepaald. Deze vlekkenkaarten zijn berekend per kalenderjaar. Dit verschilt van de seismische dreiging in de huidige NPR webtool die gegeven wordt voor perioden van drie jaren, waarbij de dreiging gemiddeld is over deze jaren. Het berekenen van vlekkenkaarten per jaar geeft een duidelijker beeld van de ontwikkeling van het risico in de tijd met de afbouw van de gasproductie.

Er is voor gekozen om de vlekkenkaarten op hetzelfde grid weer te geven als voor de NPR webtool is gebruikt. Als het risico in een gridcel voor de betreffende typologie boven de Meijdam norm komt voor dat jaar, wordt deze cel ingekleurd. Blijft het risico onder de norm dan wordt de cel leeg (of wit) weergegeven. Voor iedere kaart is in de legenda het maximum risico over alle gridcellen, voor de desbetreffende typologie in dat jaar, weergegeven.

## 5.6 Kwaliteitscontrole

Omwillen van de kwaliteitscontrole wordt opgemerkt dat iedere module van de TNO modelketen onafhankelijk is geprogrammeerd op basis van de beschikbare achtergrondinformatie. Eind 2019 is door TNO voor een gegeven set invoerparameters 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] en gereviewed door het KEM panel, zie [KEM, 2020].

## 6 Versterkingsmaatregelen

Voor typologieën die in een of meerdere gridcellen niet voldoen aan de Meijdam norm zijn versterkingsmaatregelen nodig.

Op basis van de resultaten van beschikbare berekeningen geeft TNO per typologie een overzicht van de faalmechanismes die voor die typologie van belang zijn. Deze faalmechanismes moeten door middel van versterkingsmaatregelen worden voorkomen.

Voor de van belang zijnde faalmechanismes levert TNO per typologie een globale omschrijving van de uit te voeren versterking. Deze zijn opgenomen in de typologie specifieke rapporten. De uitdetaillering van de versterkingsmaatregelen per adres (of cluster van adressen) naar een definitief ontwerp voor de versterking moet vervolgens worden uitgevoerd door de ingenieursbureaus.

CONCEPT

## 7 Referenties

[Arup,2017]

Typology modelling for fragility development, 2017

[Arup, 2019]

Typology Modelling - Analysis Results in Support of Fragility Functions - 2018-2019

[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, 2017]

V5 Ground-Motion Model (GMM) for the Groningen Field, Julian J Bommer, Benjamin Edwards, Pauline P Kruiver, Adrian Rodriguez-Marek, Peter J Stafford, Bernard Dost, Michail Ntinalexis, Elmer Ruigrok and Jesper Spetzler, Independent Consultant, Deltares, KNMI, October 2017

[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

[Bommer 2019]

V7 GMM slides, J. Bommer, KEM workshop 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 et al, 2019]

A Monte Carlo method for probabilistic seismic hazard and risk analysis of induced seismicity in the Groningen gas field – S.J. Bourne, S.J. Oates, R. Scheefhals, P. Castellanos Nash, A. Mar-Or, T. Storck, P. Omid, J., 2019

[Brzev et al, 2013]

Brzev S., C. Scawthorn, A.W. Charleson, L. Allen, M. Greene, K. Jaiswal, V. Silva, 2013; GEM Building Taxonomy, version 2, GEM Foundation

[Coburn et al, 1992]

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

[Coppersmith et al, 2016]

Report on Mmax Expert Workshop, K.J. Coppersmith, Jon P. Ake (US Nuclear Regulatory Commission), Dr. Hilmar Bungum (consultant, oud-NORSAR), Prof. dr. Torsten Dahm (GFZ, Potsdam), Prof. Ian Main (university of Edinburgh), Dr. Art McGarr (US Geological Survey), Dr. Ivan Wong (AECOM) en Dr. Bob Youngs (EMEC Foster Wheeler), 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.

[CUR/COB, 2012]

Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijk gebied, CUR/COB L530, 2012

[FEMA, 2004]

Hazus – MH, Technical Manual, FEMA, Washington DC, USA

[FEMA, 2012]

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

[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. (2017) "Conditional spectrum-based ground motion record selection using average spectral acceleration," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(10), pp. 1667-1685

[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, 2020]

Verzoek tot voorstellen operationele strategie voor het gasjaar 2020-2021, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, februari 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

[Mosayk, 2019]

Impact of ground floor openings percentage on the response of a terraced house unit model, 2019

[NAM, 2018a]

Production Optimisation 2018, Per Valvatne, Leendert Geurtsen, Assaf Mar-Or, Gosia Kaleta, Jan Limbeck and Gerard Joosten, oktober 2018

[NAM, 2018b]

Assurance Meeting on Exposure, Fragility and Fatality Models for the Groningen Building Stock, Editors J. van Elk & D. Doornhof, March 2018

[NAM, 2019]

Assurance Check on Exposure, Fragility and Fatality Models for the Groningen Building Stock, Editors J. van Elk & D. Doornhof, December 2019

[SODM, 2019]

Validatie van het seismisch netwerk van het KNMI in Groningen, tussentijdse rapportage, SodM, juli 2019

[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, 2020]

Probabilistic Seismic Hazard and Risk Analysis in the TNO Model Chain Groningen, TNO Report (draft), 2020



## 8 Ondertekening

Delft, <datum>

TNO

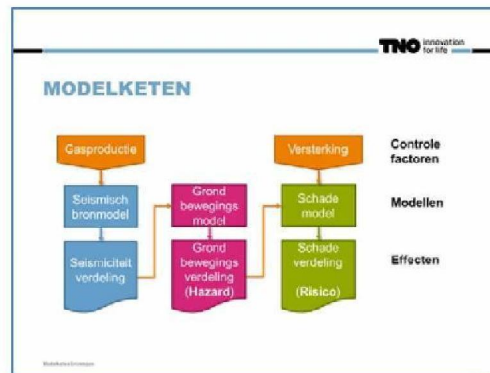
<naam afdelingshoofd>  
Steenbergen, Dr.ir. (10)(2e)  
Afdelingshoofd

Dr.ir. (10)(2e) Prof.dr.ir. R.D.J.M.  
Auteur

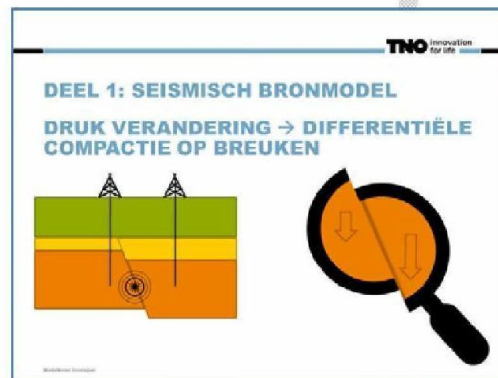
CONCEPT

## A Omschrijving TNO modelketen

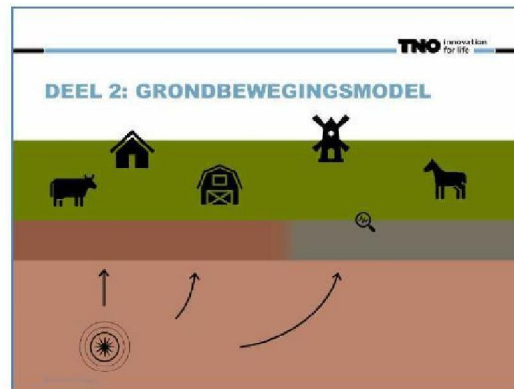
In deze bijlage wordt beknopt omschreven op welke wijze de gebruikte rekenmodellen zijn opgebouwd. Dit wordt gedaan aan de hand van de omschrijving van de TNO modelketen in de vorm van een stapsgewijze presentatie op hoofdlijnen. Voor een meer uitgebreide omschrijving wordt verwezen naar het TNO rapport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



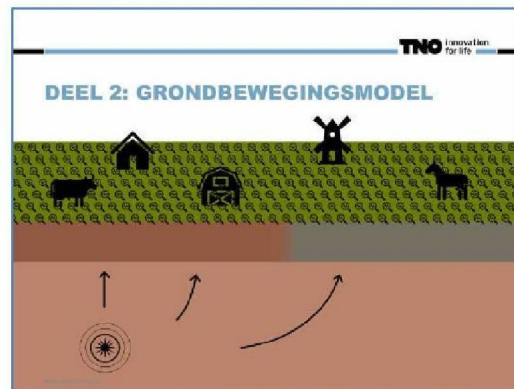
Algemene omschrijving hoe de TNO modelketen werkt, uit welke schakels deze bestaat.



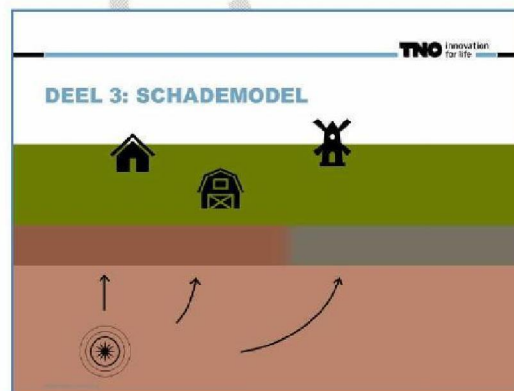
Van gasproductie naar drukverandering, compactie, afschuiving langs aanwezige breuken, gaat schoksgewijs: aardbeving.



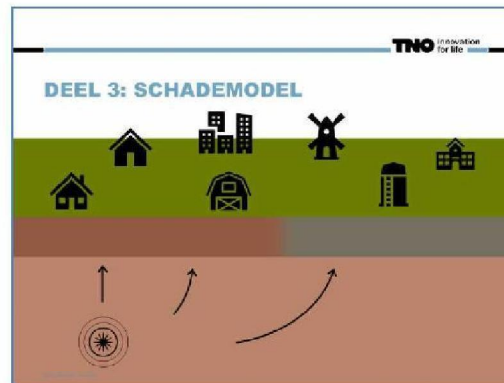
Aardbeving in ondergrond, genereert golven in de bodem, deze bereiken via bodemlagen het oppervlak. In bodem treden meerdere effecten op die worden gemodelleerd in het grondbewegingsmodel.



Resultaat na deze stappen is voor elke locatie in Groningen een omschrijving van de (kans op) optreden van trillingsniveaus (de hazard). De webtool van NPR 9998 is gebaseerd op dezelfde typen berekeningen als in deze eerste delen van de modelketen.



Stap drie is om vast te stellen welke gebouwen wel of niet bestand zijn tegen de optredende trillingen. Hiervoor 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 4 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
- 4: Het falen van onderdelen die naar beneden kunnen vallen (met name schoorstenen).

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).

Als laatste stap wordt het risico berekend. Daartoe wordt per bezwijktoestand een kans op overlijden gedefinieerd. 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.

## B Overzicht van de typologieën

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de kenmerken die tezamen de typologieën definiëren. Per typologie is een tabel (1 pagina per typologie) gegeven met het overzicht van de relevante seismische kenmerken. Deze gebouwkenmerken worden door middel van inspectie bepaald.

### B.1 Relevante eigenschappen

In deze bijlage zijn de verschillende subtypologieën (gegeven het materiaal van de hoofddraagconstructie) omschreven en zijn de relevante seismische kenmerken van een gebouw gegeven, die de indeling in een typologie bepalen. Per typologie is ook een overzicht gegeven van kenmerken die binnen deze typologie zijn opgenomen in de gebouw-tot-gebouw variatie.

Per subtypologie is weergegeven:

- Naam van de typologie
- Korte omschrijving/benaming van de typologie
- De kenmerken die uit een inspectie volgen:
  1. Materiaal van de hoofddraagconstructie (in twee hoofddraagrichtingen)
  2. Constructiesysteem van de draagconstructie (in twee hoofddraagrichtingen)
  3. Aantal verdiepingen
  4. Vrijstaand of geschakelde bouw
  5. Materiaal van de verdiepingsvloer(en)
  6. Opbouw van de (metselwerk) gevel (spouwmuur of steens muur)
  7. Percentage openingen in de gevel in maatgevende doorsnede

Per subtypologie wordt in aanvullende rapporten de sterktemodellering en de berekening van het risico uitgewerkt.

In de deelrapporten worden per typologie de waarden voor de volgende parameters vastgesteld:

- Waarde voor de in rekening te brengen modelonzekerheid
- Waarde voor de in rekening te brengen gebouw-tot-gebouw variatie
- Waarden voor het consequentiemodel

## B.2 Gebouwen met draagconstructie van staal

Voor gebouwen waarvoor de aardbevingsbelasting wordt afgedragen via een stalen draagconstructie (in beide hoofddraagrichtingen), wordt verder nog onderscheid gemaakt naar het type stalen draagconstructie en tussen een laag, middelhoog en hoog gebouw. Dit levert 7 subtypologieën op zoals omschreven in de volgende tabel.

Alle andere eigenschappen en variaties die het seismisch gedrag beïnvloeden zijn opgenomen in de gebouw-tot-gebouw variatie. In bijlage D.3 is dit nader toegelicht. De invloed van deze variaties kan per typologie verschillen. Tot deze variaties behoren:

- Funderingswijze
- Locatie en grootte van openingen
- Type bekleding van gevel en dak
- Afmetingen van gebouwplattegrond
- Eigenschappen van vloeren, wanden etcetera.

CONCEPT

TYPOLOGIE omschrijving	STAAL Gebouwen met stalen draagconstructie		
SUBTYPOLOGIE	STAAL1	STAAL2	STAAL3
NADERE OMSCHRIJVING	Raamwerkconstructie staal laag	Raamwerkconstructie staal middelhoog	Raamwerkconstructie staal hoog
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Staal	Staal	Staal
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Raamwerk	Raamwerk	Raamwerk
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Staal	Staal	Staal
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Raamwerk	Raamwerk	Raamwerk
AANTAL VERDIEPINGEN	1-2	3-4	5+
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien metselwerk en geschakeld: wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT	NVT	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	NVT	NVT	NVT

TYPOLOGIE omschrijving	STAAL Gebouwen met stalen draagconstructie		
SUBTYPOLOGIE	STAAL4	STAAL5	STAAL6
NADERE OMSCHRIJVING	Geschoorde constructie staal laag	Geschoorde constructie staal middelhoog	Geschoorde constructie staal hoog
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Staal	Staal	Staal
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Raamwerk met schoren	Raamwerk met schoren	Raamwerk met schoren
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Staal	Staal	Staal
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Raamwerk met schoren	Raamwerk met schoren	Raamwerk met schoren
AANTAL VERDIEPINGEN	1-2	3-4	5+
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien metselwerk en geschakeld: wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT	NVT	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	NVT	NVT	NVT



TYPOLOGIE omschrijving	<b>STAAL</b> Gebouwen met stalen draagconstructie
SUBTYPOLOGIE	<b>STAAL7</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Bouwwerk met schuin dak, 3-scharnierspant
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>	
<b>ALGEMEEN</b>	
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Staal
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Anders, namelijk Driescharnierspant
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Staal
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Anders, namelijk Windverbanden
AANTAL VERDIEPINGEN	1-2
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien metselwerk en geschakeld: wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>	
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>	
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>	
SCHADECATEGORIE	NVT

### B.3 Gebouwen met draagconstructie van hout

Nadat is vastgesteld dat de aardbevingsbelasting wordt afgedragen via een houten draagconstructie (in beide hoofddraagrichtingen), wordt alleen nog onderscheid gemaakt naar het type houten draagconstructie. In Groningen betreft het gebouwen met maximaal 2 verdiepingen. Dit leidt tot in totaal 2 subtypologieën.

Alle andere eigenschappen en variaties die het seismisch gedrag beïnvloeden zijn opgenomen in de gebouw-tot-gebouw variatie. In bijlage D.3 is dit nader toegelicht. De invloed van deze variaties kan per typologie verschillen. Tot deze variaties behoren:

- Funderingswijze
- Locatie en grootte van openingen in de gevels
- Bekleding van gevel en dak
- Afmetingen van gebouwplattegrond
- Eigenschappen van vloeren, wanden etcetera.

CONCEPT

TYPOLOGIE omschrijving	<b>HOUT</b> Woonhuizen met houten draagconstructie	
	<b>HOUT1</b>	<b>HOUT2</b>
SUBTYPOLOGIE		
NADERE OMSCHRIJVING	Houten woonhuis met puntdak	Portaalconstructie van gelamineerd hout
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>		
<b>ALGEMEEN</b>		
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Hout	Hout
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Raamwerk en/of Schijfwerking	Portaalconstructie
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Hout	Hout
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Raamwerk en/of Schijfwerking	Portaalconstructie
AANTAL VERDIEPINGEN	1 - 2	1 - 2
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien metselwerk en geschakeld: wel of niet seriematig)	Vrijstaand	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>		
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>		
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSLEVEL	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>		
SCHADECATEGORIE	NVT	NVT

## B.4 Gebouwen met draagconstructie van beton

Nadat is vastgesteld dat de aardbevingsbelasting wordt afgedragen via een betonnen draagconstructie (in beide hoofddraagrichtingen), wordt voor de typologie indeling onderscheid gemaakt tussen:

- het constructietype
- of het prefab of ter plaatse gestort beton betreft
- het aantal verdiepingen

Dit leidt tot in totaal 10 subtypologieën. Daarvan hebben 3 betrekking op gebouwen van geprefabriceerd beton (PREFAB1 tot en met 3), en 7 betrekking op gebouwen gemaakt van ter plaatse gestort beton (BETON1 tot en met 7).

Alle andere eigenschappen en variaties die het seismisch gedrag beïnvloeden zijn opgenomen in de gebouw-tot-gebouw variatie. In bijlage D.3 is dit nader toegelicht. De invloed van deze variaties kan per typologie verschillen. Tot deze variaties behoren:

- Funderingswijze
- De verbindingen tussen de verschillende onderdelen
- Locatie en grootte van openingen in de gevel
- Bekleding van gevel en dak

CONCEPT

TYPOLOGIE omschrijving	<b>BETON</b> Gebouwen met betonnen draagconstructie		
SUBTYPOLOGIE	<b>PREFAB1</b>	<b>PREFAB2</b>	<b>PREFAB3</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Seriematig prefab beton wand-vloer-wand A	Seriematig prefab beton wand-vloer-wand B	Seriematig prefab beton wand-vloer-wand C
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Beton (geprefabriceerd)	Beton (geprefabriceerd)	Beton (geprefabriceerd)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking	Schijfwerking	Schijfwerking
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Beton (geprefabriceerd)	Beton (geprefabriceerd)	Beton (geprefabriceerd)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking en/of Doorlopende betonnen vloeren	Schijfwerking en/of Doorlopende betonnen vloeren	Schijfwerking en/of Doorlopende betonnen vloeren
AANTAL VERDIEPINGEN	2 (met eventueel zolder)	3-4	5+
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT	NVT	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	NVT	NVT	NVT

TYPOLOGIE omschrijving	<b>BETON</b> Gebouwen met betonnen draagconstructie		
SUBTYPOLOGIE	<b>BETON1</b>	<b>BETON2</b>	<b>BETON3</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Ter plaatse gestorte woningen met betonnen wanden en vloeren, laagbouw	Ter plaatse gestorte woningen met betonnen wanden en vloeren, middelhoge gebouwen	Ter plaatse gestorte woningen met betonnen wanden en vloeren, hoge gebouwen
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking	Schijfwerking	Schijfwerking
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Doorlopende betonnen vloeren	Doorlopende betonnen vloeren	Doorlopende betonnen vloeren
AANTAL VERDIEPINGEN	2 (met eventueel zolder)	3-4	5+
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT	NVT	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	NVT	NVT	NVT

TIPOLOGIE omschrijving	<b>BETON</b> Gebouwen met betonnen draagconstructie
SUBTIPOLOGIE	<b>BETON4</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Kolom/vloer constructies
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>	
<b>ALGEMEEN</b>	
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Beton (ter plaatse gestort)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Kolommen en balken
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Beton (ter plaatse gestort)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Kolommen en balken
AANTAL VERDIEPINGEN	Maximaal 2
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>	
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>	
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSLEVEL	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>	
SCHADECATEGORIE	NVT

TYPOLOGIE omschrijving	<b>BETON</b> Gebouwen met betonnen draagconstructie		
SUBTYPOLOGIE	<b>BETON5</b>	<b>BETON6</b>	<b>BETON7</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Portaalconstructie laag	Portaalconstructie middelhoog	Portaalconstructie hoog
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Portaalconstructie	Portaalconstructie	Portaalconstructie
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)	Beton (ter plaatse gestort)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking of anders, namelijk windverbanden	Schijfwerking of anders, namelijk windverbanden	Schijfwerking of anders, namelijk windverbanden
AANTAL VERDIEPINGEN	1 - 2	3-4	5+
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld	Vrijstaand/geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	NVT	NVT	NVT
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	NVT	NVT	NVT



## B.5 Gebouwen met draagconstructie van ongewapend metselwerk

Nadat is vastgesteld dat de aardbevingsbelasting wordt afgedragen via een draagconstructie van ongewapend metselwerk is een verdere onderverdeling in typologieën noodzakelijk.

Er wordt voor de typologie indeling voor metselwerk gebouwen onderscheid gemaakt tussen:

- geschakelde bouw en vrijstaande bouw;
- het constructietype;
- het aantal verdiepingen;
- de aanwezigheid van spouwmuren in de gevel;
- het percentage openingen in de gevel;
- het materiaal van de vloer (beton of hout);

Alle andere eigenschappen en variaties die het seismisch gedrag beïnvloeden zijn opgenomen in de gebouw-tot-gebouw variatie. In bijlage D.3 is dit nader toegelicht. De invloed van deze variaties kan per typologie verschillen. Tot deze variaties behoren:

- Funderingswijze
- Bekleding van gevel en dak
- Opleglengtes van vloeren
- Variaties in aanwezigheid van en aantallen (spouw) ankers
- Type en materiaal metselwerk
- Aanwezigheid van niet dragende binnenwanden

TYPOLOGIE omschrijving	METSSELWERK-A Rijteswoningen van metselwerk, seriematige bouw		
	METSSELWERK1	METSSELWERK2	METSSELWERK3
NADERE OMSCHRIJVING	Minder dan 85% openingen in maatgevende doorsnede op begane grond; betonnen verdiepingsvloeren	85% of meer openingen in maatgevende doorsnede op begane grond	Minder dan 85% openingen in maatgevende doorsnede op begane grond; houten verdiepingsvloeren
INSPECTIEGEGEVENS			
ALGEMEEN			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking wanden (woningscheidend en kopgevels)	Schijfwerking wanden (woningscheidend en kopgevels)	Schijfwerking wanden (woningscheidend en kopgevels)
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking wanden (door langsgewel + eventuele binnenwanden)	Schijfwerking wanden (door langsgewel + eventuele binnenwanden) EN/OF Doorlopende betonnen vloeren	Schijfwerking wanden (door langsgewel + eventuele binnenwanden)
AANTAL VERDIEPINGEN	1 of 2 + eventueel zolderverdieping	1 of 2 + eventueel zolderverdieping	1 of 2 + eventueel zolderverdieping
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Geschakeld, seriematige bouw	Geschakeld, seriematige bouw	Geschakeld, seriematige bouw
ALLEEN VOOR METSELWERK:			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	Beton	Beton of Hout	Hout
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	Spouwmuur	Spouwmuur	Spouwmuur
ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	< 85%	≥ 85%	< 85%
SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):			
SCHADECATEGORIE	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3

TYOLOGIE omschrijving	<b>METSELWERK-B</b> Drive-in Woningen
SUBTYPOLOGIE	<b>METSELWERK4</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Seriematige bouw, 3 verdiepingen, begane grond 100% open
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>	
<b>ALGEMEEN</b>	
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking wanden (woningscheidend en kopgevels)
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Doorgaande betonnen vloeren
AANTAL VERDIEPINGEN	3 + eventueel zolderverdieping
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Geschakeld, seriematige bouw
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>	
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	Beton
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	Spouwmuur
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>	
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	100 %
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>	
SCHADECATEGORIE	0, 1, 2 of 3

TYPOLOGIE omschrijving	METSSELWERK-C Vrijstaande Woningen		
SUBTYPOLOGIE	METSSELWERK5	METSSELWERK6	METSSELWERK7
NADERE OMSCHRIJVING	Vrijstaande woning, 1 verdieping + 1 (bewoonde) zolder; Gevel van steens metselwerk	Vrijstaande woning, 1 verdieping + 1 (bewoonde) zolder; Spouwmuur gevel Betonnen verdiepingsvloer	Vrijstaande woning, 1 verdieping + 1 (bewoonde) zolder; Spouwmuur gevel Houten verdiepingsvloer
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden
AANTAL VERDIEPINGEN	1 + bewoonde zolderverdieping	1 + bewoonde zolderverdieping	1 + bewoonde zolderverdieping
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Vrijstaand	Vrijstaand	Vrijstaand
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	Beton of hout	Beton	Hout
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	Steens muur, geen spouw	Spouwmuur	Spouwmuur
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSLEVEL	NVT	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3

TYOLOGIE omschrijving	METSSELWERK-D Meerlaagse bouw (appartementen)	
SUBTYPOLOGIE	<b>METSSELWERK8</b>	<b>METSSELWERK9</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Vrijstaande woning, 1 verdieping + 1 (bewoonde) zolder; Gevel van steens metselwerk	Vrijstaande woning, 1 verdieping + 1 (bewoonde) zolder; Spouwmuur gevel Betonnen verdiepingsvloer
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>		
<b>ALGEMEEN</b>		
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden
AANTAL VERDIEPINGEN	3 of 4 eventueel met zolder	3 of 4 eventueel met zolder
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Geschakeld	Geschakeld
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>		
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	Beton of hout	Beton of hout
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	Spouwmuur	Spouwmuur
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>		
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>		
SCHADECATEGORIE	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3

TYOLOGIE omschrijving	<b>METSELWERK-E</b> Woningen in historische stadskern
SUBTYPOLOGIE	<b>METSELWERK10</b>
NADERE OMSCHRIJVING	Unieke woningen, geschakeld via mandelige muur
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>	
<b>ALGEMEEN</b>	
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking wanden
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking wanden
AANTAL VERDIEPINGEN	Maximaal 2 met zolder
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)	Geschakeld, niet seriematig
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>	
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER	Hout
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL	Steens muur
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>	
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL	NVT
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>	
SCHADECATEGORIE	0, 1, 2 of 3

TIPOLOGIE omschrijving	METSSELWERK-F Boerderijen		
SUBTIPOLOGIE	METSSELWERK11	METSSELWERK12	METSSELWERK13
NADERE OMSCHRIJVING	Omschrijving wordt later verder uitgewerkt		
<b>INSPECTIEGEGEVENS</b>			
<b>ALGEMEEN</b>			
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting X)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting X)	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden
MATERIAAL CONSTRUCTIE (richting Y)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)	Metselwerk (stapelbouw)
CONSTRUCTIESYSTEEM (richting Y)	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden	Schijfwerking wanden
AANTAL VERDIEPINGEN			
VRIJSTAAND of GESCHAKELD (indien geschakeld, wel of niet seriematig)			
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK:</b>			
MATERIAAL EERSTE VERDIEPINGSVLOER			
OPBOUW METSELWERK IN GEVEL			
<b>ALLEEN VOOR METSELWERK, SERIEMATIG GESCHAKELD:</b>			
PERCENTAGE OPENINGEN IN LANGSGEVEL			
<b>SCHADE (ALLEEN VOOR METSELWERK):</b>			
SCHADECATEGORIE	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3	0, 1, 2 of 3

## C Inspecties

De toekenning van een gebouw aan een typologie gebeurt door middel van een inspectie. Deze inspectie bestaat zowel uit het inventariseren van beschikbare informatie als een bezoek ter plaatse. De kenmerken die moeten worden bepaald in deze inspectie zijn toegelicht in hoofdstuk 4 van dit rapport.

Voor de toekenning van de schadeklasse op basis van waargenomen scheurvorming wordt verwezen naar Tabel 1 in paragraaf 4.7. Indien het gebouw in schadeklasse 4 of 5 wordt ingedeeld, is een individuele beoordeling nodig, waarbij het mogelijke effect van de schades op de gebouwsterkte in rekening moet worden gebracht.

Bijgaande checklist kan als basis worden gebruikt bij het uitvoeren van de inspecties. Deze checklist is in drie delen gegeven. Deel 1 betreft de kenmerken die voor alle gebouwen moeten zijn vastgesteld. Deel 2 is alleen van toepassing voor gebouwen met een draagconstructie van metselwerk. Deel 3 betreft de beoordeling van aanwezige schade en de consequentie ervan voor de indeling in een typologie.

*Deel 1: Kenmerken vast te stellen voor alle gebouwen*

Kenmerk	Keuze	Opmerkingen
<b>Materiaal Draagconstructie</b> (per hoofddraagrichting)	<input type="checkbox"/> Staal <input type="checkbox"/> Hout <input type="checkbox"/> Beton (Ter plaatse gestort) <input type="checkbox"/> Beton (Prefab) <input type="checkbox"/> Metselwerk <input type="checkbox"/> Anders of Onbekend	Definieer in inspectierapport X en Y richting (in plattegrond schets)
<b>Constructiesysteem</b> (per hoofddraagrichting)	<input type="checkbox"/> Kolom-Balk <input type="checkbox"/> Raamwerk momentvast <input type="checkbox"/> Raamwerk met schoren <input type="checkbox"/> Portaalconstructie <input type="checkbox"/> Hybride <input type="checkbox"/> Schijfwerking wanden <input type="checkbox"/> Doorgaande betonnen vloeren <input type="checkbox"/> Anders	Voor beide hoofddraagrichtingen afzonderlijk bepalen
<b>Aantal Verdiepingen</b> (zolder en kelder niet meetellen)	Noteer aantal:	
<b>Vrijstaand of geschakeld</b>	<input type="checkbox"/> Vrijstaand <input type="checkbox"/> Geschakeld, seriematig <input type="checkbox"/> Geschakeld, niet seriematig <input type="checkbox"/> Anders	



*Deel 2: Kenmerken vast te stellen voor gebouwen met draagconstructie van metselwerk*

Kenmerk	Keuze	Opmerkingen*
<b>Materiaal verdiepingsvloer(en)</b>	<input type="checkbox"/> Beton <input type="checkbox"/> Hout <input type="checkbox"/> Anders	Zoldervloer wordt niet beschouwd
<b>Opbouw gevel</b>	<input type="checkbox"/> Steens muur <input type="checkbox"/> Spouwmuur met steens buitenblad <input type="checkbox"/> Betonnen buitenblad <input type="checkbox"/> Anders of Onbekend	
<b>Percentage openingen in langsegevel begane grond, in de maatgevende doorsnede</b>	Waarde:	Maatgevende doorsnede is die horizontale doorsnede waarin het aandeel metselwerk het kleinst is. Kozijnen, ramen, puien behoren alle tot de openingen.
<b>Aanwezigheid scheurvorming in draagconstructie</b>	Ja/Nee  <i>Indien ja, ga verder met Deel 3</i>	

\*De kolom Opmerkingen is met name bedoeld voor die gevallen waarbij het kenmerk als 'anders' of 'onbekend' wordt aangeduid.

## Deel 3: Vaststelling van de schadeklasse in geval van aanwezige schade

Kenmerk	Keuze	Opmerkingen
<b>Aanwezigheid scheurvorming in draagconstructie</b>	Geef Schadeklasse op basis van onderstaande tabel:  <i>In geval van schadeklasse 4 of 5 is een individuele beoordeling nodig</i>	

Schade-categorie	Schade-klasse	Omschrijving	Scheurwijdte (metselwerk)	Karakterisering schadebeeld	Indicatie Relatieve Hoekverdraaiing
	0	Verwaarloosbaar	< 0,1 mm	Haarscheurtjes	< 1:1600 – 1:500
Esthetisch	1	Zeer licht	0,1 tot 1 mm	Enige scheurvorming in metselwerk. Kleine scheuren, meestal beperkt tot pleisterwerk, die eenvoudig kunnen worden weggewerkt.	1:1600 – 1:300
	2	Licht	tot 5 mm	Scheuren kunnen aan de buitenzijde zichtbaar zijn en kunnen tot vochtdoorslag leiden. Deuren en ramen klemmen licht. Geringe scheurvorming, kan eenvoudig hersteld worden.	1:1600 – 1:300
Functioneel	3	Matig	5 tot 15 mm, of meerdere scheuren > 3 mm	Deuren en ramen klemmen. Mogelijke schade aan nutsaansluitingen. Vochtdoorslag mogelijk. Scheuren zijn zodanig dat metselwerk dient te worden hersteld	1:1600 – 1:100
	4	Ernstig	15-25 mm, Ook afhankelijk van het aantal scheuren	Bruikbaarheid en toegankelijkheid ernstig aangetast. Voelbare scheefstand. Herstel vergt vervanging van muurdelen en andere constructieve elementen.	1:1600 – 1: 100
Constructief	5	Zeer ernstig	> 25 mm, hangt van aantal af	Instortingsgevaar. Volledige renovatie noodzakelijk.	> 1:300

## D Achtergronden

### D.1 Seismische kenmerken

De criteria voor het indelen van gebouwen in typologieën zijn gebaseerd op de relevante seismische kenmerken. Deze kenmerken bepalen het seismische gedrag van gebouwen. De bepaling van deze kenmerken is gebaseerd op internationale literatuur, en is nader ingevuld voor de situatie in Groningen. De belangrijkste bron is de GEM taxonomie [Brzev et al, 2013]. In dit rapport is een uitgebreide omschrijving gegeven van relevante seismische kenmerken van gebouwen, gebaseerd op uitgebreid internationaal onderzoek. Hieronder wordt per kenmerk dat is gekozen voor de typologieaanpak kort weergegeven wat de relevantie is voor het seismisch gedrag.

***Kenmerk: Materiaal van de draagconstructie***

Het materiaal van de draagconstructie, waarbij binnen dit project de keuze is gemaakt uit hout, staal, beton (gietbouw of prefab) en metselwerk (ook stapelbouw genoemd), bepaalt de sterkte van de constructie en verbindingen en is ook van belang voor de beschrijving van het gedrag.

***Kenmerk: Type draagconstructie***

De wijze waarop de stabiliteit van het gebouw wordt verzorgd door de constructie, bepaalt hoe het gebouw de krachten door een aardbeving verdeelt en hoe het gebouw vervormt. Dit is zeer relevant voor de seismische weerstand. Een raamwerk van staal of hout reageert anders dan bijvoorbeeld een constructie van metselwerk wanden. Daarom is de draagconstructie in combinatie met het materiaal een uniek kenmerk voor de typologie. Met andere woorden: binnen 1 typologie is sprake van 1 constructiemateriaal en 1 type draagconstructie per hoofddraagrichting.

***Kenmerk: Aantal verdiepingen***

Een aardbeving leidt tot opslingering van gebouwen. Hoe hoger het gebouw des te meer massa wordt er in beweging gezet, wat leidt tot grotere krachten op de onderste verdiepingen. Anderzijds leidt een hoger gebouw tot een hogere normaalkracht op de onderliggende constructie, wat bij kan dragen aan de weerstand. Tevens is de trillingsperiode (of eigenfrequentie) afhankelijk van de gebouwhoogte, wat een gunstig of ongunstig effect kan hebben op de belasting. Er kan dus zowel een gunstig als ongunstig effect uitgaan van het aantal verdiepingen. Deze effecten kunnen verschillen afhankelijk van gebruikte materialen en type draagconstructie. Het aantal verdiepingen is daarom een relevante parameter binnen de typologieën.

***Kenmerk: Vrijstaand of geschakeld***

Een belangrijk verschil tussen vrijstaande woningen en geschakelde woningen is dat bij geschakelde bouw er in de meeste gevallen sprake is van een verschil in draagconstructie in de hoofdrichtingen. Er is duidelijk sprake van een sterke en zwakke richting. De sterke richting is dwars op een rij woningen, waarbij de kopgevels en woningscheidende wanden voor de stabiliteit zorgen. De zwakke

richting is in langsrichting, waarbij sprake is van (grote) gevelopeningen voor daglichttoetreding. Bij vrijstaande woningen is die verdeling van openingen meer gelijk over de gevels.

In Groningen geldt voorts dat de meerderheid van de vrijstaande woningen opgebouwd is uit een enkele verdieping (begane grond) met een zolderverdieping die ook als woonlaag wordt gebruikt. Bij rijtjeswoningen is doorgaans sprake van 2 volwaardige verdiepingen en een zolder. Dit onderscheid is ook in de vorm van het aantal verdiepingen expliciet gemaakt.

Een ander onderscheid tussen een vrijstaande en geschakelde woning is dat de massa die in beweging wordt gezet in de langsrichting van een blok woningen, opgenomen moet worden door een constructie die zeer waarschijnlijk op een veel lagere horizontale belasting is berekend. Daarnaast zien we bij geschakelde bouw andere constructietypen dan bij vrijstaande woningen.

***Kenmerk: Materiaal verdiepingsvloer***

Het materiaal van de verdiepingsvloer (hout of beton) bepaalt in hoeverre het gebouw in staat is de krachten te verdelen over de stabiliteitsvoorzieningen. Een slappe vloer zal dat minder goed doen dan een stijve vloer. In de onversterkte situatie is een betonnen vloer daar beter toe in staat.

Een ander aspect betreft de massa van de vloeren, die als een normaalkracht werkt op de onderliggende wanden en zo bijdraagt aan de seismische weerstand van die wanden. Een zwaardere vloer kan gunstiger zijn voor die weerstand.

***Kenmerk: Opbouw van de metselwerk gevel***

Bij metselwerk gebouwen wordt in de Nederlandse (en daarmee Groningse) bouwwijze onderscheid gemaakt in twee opbouwen van gevels: In oudere (met name vooroorlogse) woningen komen steeds muren (zonder spouw) voor. Deze zijn ongeveer 200 mm dik, en vaak ongeïsoleerd. Sinds de jaren '20 van de twintigste eeuw is de spouwmuur in opkomst, bestaande uit twee bladen van ongeveer 100 mm dik met een luchtspouw ertussen. Het binnenste blad draagt de krachten af van dak en vloeren. De buitenste laag, het buitenblad, heeft de functie van klimaatbuffer en is zelfdragend. Via de spouwankers kunnen binnen- en buitenblad constructief samenwerken

Belangrijk kenmerk van de spouwmuur is dat deze gevoeliger is voor uit het vlak falen dan een steeds muur.

***Kenmerk: percentage openingen in begane grond vloer***

Een kenmerk dat voor rijtjeswoningen zeer relevant is voor de seismische weerstand in de zwakke richting (langsrichting) is de mate waarin de gevel bijdraagt of bij kan dragen aan de seismische weerstand. Hiervoor is als parameter het percentage opening in de maatgevende doorsnede gedefinieerd. De maatgevende doorsnede is de horizontale doorsnede over de gevel waar de verhouding opening/totale doorsnede het grootst is. Onder openingen wordt verstaan alles wat niet bijdraagt aan de seismische weerstand. In de praktijk is dit alles wat geen metselwerk in de gevel is. Met andere woorden kozijnen, puien en zogeheten vliesgevels worden geacht niet bij te dragen aan de seismische weerstand.

Indien het aandeel openingen groot is, dan is er een risico op het ontstaan van een zogeheten 'soft storey', waarbij de onderste verdieping bij een hoge

aardbevingsbelasting faalt als gevolg van de bewegende massa uit bovenliggende verdiepingen.

#### **Overige kenmerken**

Andere kenmerken die een rol spelen bij het seismisch gedrag zijn niet bepalend voor de typologie indeling. Het effect van deze kenmerken wordt binnen de typologie in rekening gebracht door de gebouw-tot-gebouw variatie. Deze variatie wordt per typologie bestudeerd en vastgelegd, en resulteert in een gehanteerde marge binnen de risico beoordeling per typologie. Een overzicht van eigenschappen die tot deze gebouw-tot-gebouw variatie behoren is gegeven in bijlage D.3. In de typologie specifieke rapportages is aangegeven welke variaties zijn beschouwd voor de bepaling van de gebouw-tot-gebouw variatie voor de betreffende typologie.

## **D.2 Gevolgde werkwijze bij ontwikkeling typologie aanpak**

Voor het vaststellen van de te hanteren seismische kenmerken voor de typologieën zijn de volgende stappen doorlopen:

- 1) Keuze van een aantal typologieën op basis van seismisch gezien dominante kenmerken van gebouwen, die ook door middel van een eenvoudige niet invasieve inspectie vast te stellen zijn. Het aantal typologieën moet ook passend zijn bij de mate waarin informatie beschikbaar is en de beschikbare berekeningen op het moment van het vastleggen van de typologie indeling.

Vervolgens per typologie:

- 2) Vaststellen van een backbone-curve voor een referentiegebouw binnen de typologie. Hierin worden alle relevante faalmechanismen meegenomen. Hiervoor zijn NLTH en NLPO 3D FEM berekeningen gebruikt die zijn gekalibreerd aan triltafeltesten.
- 3) Vaststellen in hoeverre het referentiegebouw kan worden beschouwd als een mediaan gebouw.
- 4) Vaststellen van de volgende onzekerheden en in rekening te brengen marges:
  - De variabiliteit als gevolg van verschillende eigenschappen van de aardbevingsbelasting, de zogenaamde 'record-to-record variability'. Verschillen in aardbevingssignalen kunnen leiden tot verschillende respons van het gebouw. Deze verschillen worden verrekend met een onzekerheidsmarge.
  - Onzekerheden in de eigenschappen van gebouw, materiaaleigenschappen, eigenschappen van verbindingen etc. De eigenschappen van het materiaal en constructiedetails zijn per gebouw niet exact bekend; met name niet in de minder bereikbare delen van een gebouw.
  - Modelonzekerheid: tenzij experimenten ter beschikking staan, moet rekening gehouden worden met de mate waarin de modellen het precieze gebouwgedrag wel of niet beschrijven.

- 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 de onderzochte gebouwen overeenkomen met de andere gebouwen binnen een typologie, wordt een onzekerheidsmarge aangehouden in de vorm van de gebouw-tot-gebouw variatie. Denk bijvoorbeeld aan verschillen in oplegglengtes van vloeren of de mate waarin binnenwanden bijdragen aan de stabiliteit.
- 5) Het afleiden van de te gebruiken kwetsbaarheidskrommen als functie van een goed correlerende intensiteitsmaat.

## D.3 Gebouw-tot-gebouw variatie

### D.3.1 Achtergrond

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, die voor de betreffende categorie als minder van belang worden geacht.

### D.3.2 Kenmerken die meegenomen zijn in de gebouw-tot-gebouw variatie

De typologie indeling is gebaseerd op een aantal, voor die typologie, relevante seismische kenmerken. Die kenmerken zijn expliciet gemodelleerd in het gebruikte mediane gebouw.

Kenmerken waarvan kan worden gesteld dat deze binnen een typologie ofwel niet van belang zijn, ofwel waarvan de invloed is meegenomen in de gebouw-tot-gebouwvariatie kunnen per typologie verschillen. Door GEM [Brzev et al, 2013] wordt een overzicht gegeven van eigenschappen die het seismisch gedrag bepalen. 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
- Onregelmatigheden in de gebouwworm
- Afmetingen van het gebouw
- Plaatsing van een woning binnen een bouwblok

#### **Fundering**

- Type fundering: in berekeningen van een woning met een fundering op palen vergeleken met een fundering op staal blijkt dat de verschillen voor de woning klein zijn. De fundering op staal is enigszins conservatief.

**Verbindingen**

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

**Materiaalgerelateerd**

- Variaties binnen het gebruikte bouwmateriaal
- Materiaaleigenschappen
- Veroudering van materialen
- Percentage openingen in een gevel; dit speelt een rol bij de typologie METSELWERK-A (rijtjeswoningen) voor de toekenning van de typologie. Voor andere typologieën is dit ondergebracht in de gebouw-tot-gebouw variatie.

**D.4 Modelonzekerheid**

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  $\beta_m$ .

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  $\beta_m$  als de som van 2 bijdragen:  $\beta_c$  en  $\beta_q$ :

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

De bijdrage  $\beta_c$  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 aanneme in hoeverre het gebouw overeenkomt met het ontwerp. FEMA P-58 formuleert aanbevelingen voor de waarde voor  $\beta_c$  die hieronder zijn overgenomen.

Tabel D.1 Waarden voor  $\beta_c$  uit FEMA P-58 (FEMA, 2012)

Building Definition and Construction Quality Assurance	$\beta_c$
<p><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.</p> <p><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.</p>	0.10
<p><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.</p> <p><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.</p>	0.25
<p><i>Limited Quality, New Buildings:</i> The building design is completed to a level typical of schematic design, or other similar level of detail.</p> <p><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.</p>	0.40

De bijdrage is gerelateerd aan de kwaliteit en de mate van volledigheid van het gebruikte analytische model. De keuze voor  $\beta_c$  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.

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

Quality and Completeness of the Analytical Model	$\beta_q$
<p><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.</p> <p><i>Completeness:</i> The mathematical model includes all structural components and nonstructural components in the building that contribute to strength or stiffness.</p>	0.10
<p><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.</p> <p><i>Completeness:</i> The mathematical model includes most structural components and nonstructural components in the building that contribute significant strength or stiffness.</p>	0.25
<p><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.</p> <p><i>Completeness:</i> The mathematical model includes structural components in the seismic-force-resisting system.</p>	0.40

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



- *For  $\beta_c$ , 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  $\beta_c$  will be larger and "superior" quality cannot be assigned.*
- *For  $\beta_q$ , 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  $\beta_m$ .*

TNO adviseert voor metselwerk gebouwen voor  $\beta_q$  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. 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  $\beta_c$ , 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  $\beta_q$ , 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  $\beta_m$ .*

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  $\beta_m$  toegepast.

Voor de uiteindelijke implementatie van de modelonzekerheid wordt verwezen naar D.6.

## D.5 Afleiding van kwetsbaarheidskrommen (fragility curves)

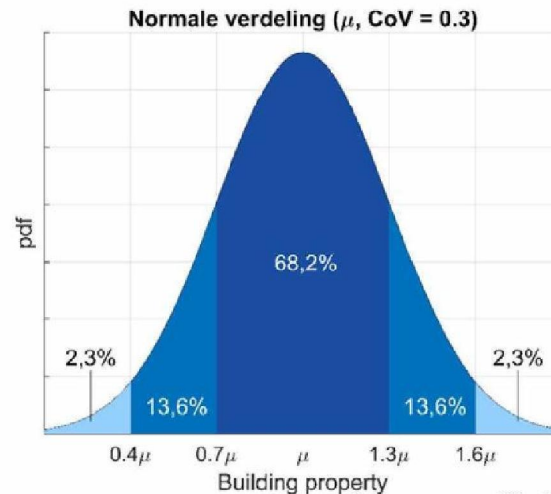
Voor de typologie aanpak is een efficiënte methode toepast, die vergelijkbaar is met de methode zoals gevolgd door Eucentre [Crowley et al, 2019]. Die methode bestaat uit verschillende stappen. Waar mogelijk is reeds beschikbare informatie gebruikt om het aantal analyses te beperken dat nodig is om tot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

- I. Het constructieve gedrag van de gebouwen binnen een typologie is gesimuleerd door middel van een geavanceerde niet-lineaire tijd domein analyse (NLTHA) van een model van de constructie met meerdere vrijheidsgraden. Hiervoor is een gemiddeld gebouw gebruikt dat is onderworpen aan 11 aardbevingssignalen. Dit gemiddelde gebouw en diens constructieve gedrag (gepresenteerd in een backbone curve) is steeds vergeleken met 3D FEM NLPO analyses.
- II. De resultaten van de NLTH-analyses zijn gebruikt om een eenvoudiger, maar equivalent model (SDOF) af te leiden. Dit model bevat een effectieve massa, een hysteresis kracht/verplaatsingsmodel (ofwel backbone curve) en een equivalent macro-element om de grond-constructie interactie (SSI) te simuleren. Dit model is gemodelleerd in SeismoStruct [Seismosoft, 2018] gebruik makend van de eigenschappen zoals gerapporteerd in [Crowley et al, 2019].

Niet-lineaire dynamische analyses zijn uitgevoerd met dit SDOF-model voor een groot aantal hazard-consistente aardbevingssignalen. Door middel van deze analyses kan de verdeling van een geschikte 'engineering demand parameter' (EDP) afgeleid worden, gegeven een set aan aardbevingsintensiteiten. In deze analyses is de verplaatsing ter hoogte van het zolder niveau aangehouden als EDP (vergelijkbaar met [Crowley et al, 2017] en [Crowley et al, 2019]).

- III. De kwetsbaarheidskromme behorende bij een bepaalde grensconditie (bepaalde mate van schade) kan vervolgens worden afgeleid. Verschillende grenscondities, die horen bij verschillende consequenties, worden doorgerekend om het individueel risico, uitgedrukt in een jaarlijkse kans van overlijden voor een persoon continu en onbeschermd aanwezig binnen of dichtbij een gebouw. 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 variabiliteit tussen verschillende aardbevingssignalen met dezelfde intensiteit (*record-to record* of signaal-tot-signaal variatie,  $\sigma_R$ ).
- IV. Naast de signaal-tot-signaal variatie worden ook de gebouw-tot-gebouw variatie en de model onzekerheid in rekening gebracht in de kwetsbaarheidskromme. 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 door een verschuiving in gemiddelde waarde van de kwetsbaarheidskromme met een boven- en ondergrens.

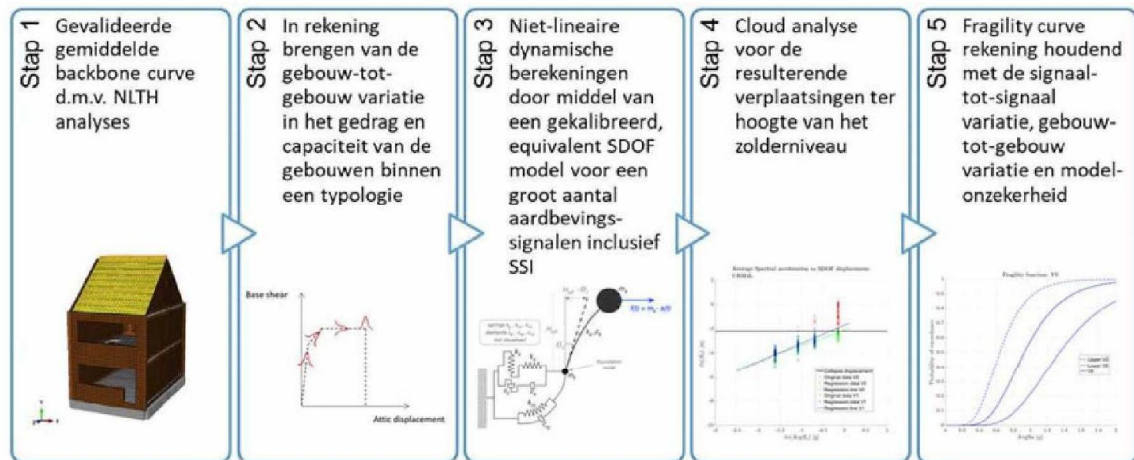
De gebouw-tot-gebouw variatie volgt uit het feit dat er binnen een typologie gebouwen met verschillende eigenschappen en daarmee ook verschillend constructief gedrag bestaan. In [Crowley et al, 2019] is een waarde van 0.30 toegepast voor de gebouw-tot-gebouw variatie ( $\sigma_{BB}$ ). Deze waarde beschrijft zowel de onzekerheid in gedrag als in capaciteit. 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).



De waarde van de gebouw-tot-gebouw variatie waarmee in de typologie aanpak per typologie rekening wordt gehouden, wordt door middel van aanvullende analyses onderbouwd. Deze worden onder meer uitgevoerd door de TU Delft. Deze worden in typologie specifieke aanvullende rapportages beschreven.

De modelonzekerheid wordt in rekening gebracht via een beslisboom in de kwetsbaarheidsfuncties, conform [Crowley et al, 2019].

Een samenvatting van deze stapsgewijze aanpak is weergegeven in Figuur D.1. De uitwerking wordt per typologie in de typologie specifieke rapportages toegelicht.



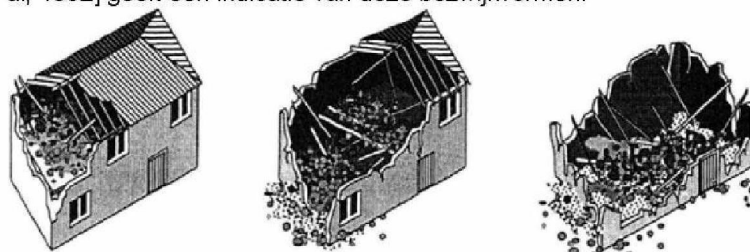
Figuur D.1: Stapsgewijze aanpak voor het afleiden van de kwetsbaarheidskrommen inclusief gebouw-tot-gebouw variatie

## D.6 Implementatie kwetsbaarheidsmodel en consequentiemodel

Zoals in dit rapport beschreven wordt voor de beschrijving van zowel het kwetsbaarheidsmodel als het consequentiemodel als startpunt gebruik gemaakt van [Crowley et al, 2019] en [Crowley et al, 2020]. Per typologie is vervolgens uit studies van TNO en TU Delft bepaald of de invoerparameters voor de bepaling van de kwetsbaarheidskrommes en of het consequentiemodel aanpassing behoeven. Hieronder wordt de formulering beschreven zoals deze toegepast wordt in de modelketen. De keuze voor de parameters is te vinden in de rapportages voor individuele typologieën.

### Kwetsbaarheidsmodel

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 D.2 uit [Coburn et al, 1992] geeft een indicatie van deze bezwijkvormen.



Figuur D.2: 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. De wiskundige beschrijving is:

$$P_{eDL_{CSi}} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(DL_{CSi}) - \ln(\eta_{Sd|\ln(AvgSa)})}{\sigma_s}\right) \quad D6.1$$

met:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{RR}^2 + \sigma_{BB}^2}, \quad D6.2$$

en

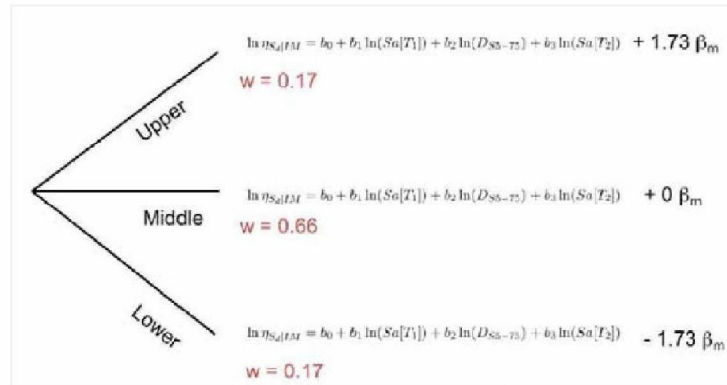
$$\ln(\eta_{Sd|\ln(AvgSa)}) = b_0 + b_1 \ln(AvgSa), \quad D6.3$$

$$\ln(AvgSa) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} Sa[T_i], \quad T_i = 0.01s, 0.1s, 0.2s, 0.3s, 0.4s, 0.5s, 0.6s, 0.7s, 0.85s, 1.0s \quad D6.4$$

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 niet een gemiddelde over bevingen, maar 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 verplaatsing het gebouw kan hebben 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  $\sigma_s$  is een maat voor de spreiding in het model en is opgebouwd uit een component  $\sigma_{RR}$ , de record-to-record variatie die de onzekerheid geeft voor de respons van een gebouw op verschillende bevingen (met gelijke intensiteit) en een component  $\sigma_{BB}$ , 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  $\beta_m$ , zie ook hoofdstuk D.4. Deze wordt in rekening gebracht via een zogenaamde logic tree met een 'Lower', 'Middle' en 'Upper' tak, zoals in onderstaande figuur D.3.



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

Gegeven de modelonzekerheid  $\beta_m$  wordt de intensiteitsmaat aangepast met  $\pm 1.73$  maal de modelonzekerheid en dat bepaalt de 'Upper' en 'Lower' takken van de logic tree. In figuur D.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. De gewichten  $w$  voor de 'Upper', 'Middle' en 'Lower' takken van de logic tree zijn 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 dezelfde set behalve een aangepaste parameter  $b_0$  zoals hierboven beschreven. Op deze wijze ontstaan voor ieder van de drie bezwijkvormen x drie takken van de logic tree, in totaal zijn dit 9 kwetsbaarheidskrommen per typologie met bijbehorende gewichten.

### Consequentiemodel

Met het consequentiemodel 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 consequentiemodel wordt de kans op overlijden voor ieder van deze drie 'Collapse States' gegeven, zowel in huis 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 de woning.

Deze 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:

$$P_{d_{inside}} = (P_{eDL_{CS1}} - P_{eDL_{CS2}})P_{d_{inside|CS1}} + (P_{eDL_{CS2}} - P_{eDL_{CS3}})P_{d_{inside|CS2}} + P_{eDL_{CS3}}P_{d_{inside|CS3}} \quad D6.5$$

$$P_{d_{outside}} = (P_{eDL_{CS1}} - P_{eDL_{CS2}})P_{d_{outside|CS1}} + (P_{eDL_{CS2}} - P_{eDL_{CS3}})P_{d_{outside|CS2}} + P_{eDL_{CS3}}P_{d_{outside|CS3}} + (1 - P_{eDL_{CS1}})P_{d_{outside|Chd}} \quad D6.6$$

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

$P_{d_{outside|Chd}}$  de kans op overlijden buitenshuis door bezwijken van de schoorsteen 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  $\overline{PGA}_{chd}$ ,  $\beta_{chd}$  invoerparameters.

Er wordt van uitgegaan dat een persoon zich voor 1% van de tijd buitenshuis binnen 5 m afstand van de woning 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 consequentiemodel 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.