

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 R10700

# Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Uitwerking van subtypologie METSELWERK2

Datum 3 juni 2020

Auteur(s) Dr.ir. (10)(2e), Prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen, Ir. (10)(2e)  
(10)(2e) Dr.ir. (10)(2e)

Exemplaarnummer  
Oplage  
Aantal pagina's 20 (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 uitwerking van de typologiegebaseerde beoordeling zoals omschreven in [TNO, 2020] voor de (sub)typologie METSELWERK2. Deze typologie bestaat uit seriematig gebouwde geschakelde woningen (rijtjeshuizen en twee-onder-een kap woningen), met een draagconstructie van metselwerk waarbij de horizontale stabiliteit wordt ontleend aan penanten dan wel uit doorgaande vloeren, en met grote openingen in de langsgevels (groter dan of gelijk aan 85% open in de maatgevende doorsnede).

Dit rapport beschrijft de totstandkoming van het sterktemodel voor deze typologie, in de vorm van de kwetsbaarheidskromme en de parameters die deze curve beschrijven. Daarnaast zijn de parameters van het gevolgmodel vastgesteld.

De kwetsbaarheidskromme en gevolgmodellering is toegepast in een berekening met de TNO modelketen, die resulteert in een vlekkenkaart waarin is aangegeven waar in Groningen deze typologie wel, dan wel niet voldoet aan de Meijdam norm.

Omschreven is welke maatregelen voor het versterken van deze typologie worden geadviseerd.

CONCEPT

## Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Omschrijving (sub)typologie.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Overzicht van beschikbare en gebruikte informatie.....</b>	<b>7</b>
3.1	Algemeen.....	7
3.2	Eigenschappen van de referentiegebouwen .....	7
3.3	Uitgevoerde berekeningen .....	8
3.4	Faalmechanismes van de referentiegebouwen.....	8
3.5	Langsgevels met meer dan 95% openingen .....	9
<b>4</b>	<b>Variatiestudies .....</b>	<b>10</b>
4.1	Studie naar gebouw-tot-gebouw variatie METSELWERK2 .....	10
4.2	Bepaling van de gebouw-tot-gebouw variatie .....	11
<b>5</b>	<b>Sterkteparameters in TNO modelketenberekening.....</b>	<b>14</b>
5.1	Kwetsbaarheidskromme .....	14
5.2	Gebouw-tot-gebouw variatie.....	14
5.3	Modelonzekerheid .....	14
5.4	Gevolgmodel.....	15
5.5	Samenvatting parameters .....	15
<b>6</b>	<b>Vlekkenkaart voor de (sub)typologie.....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Versterkingsmaatregelen.....</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>19</b>
<b>9</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>20</b>

# 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. Deze werkwijze is te arbeidsintensief 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 op individueel gebouwniveau wordt uitgevoerd.

In TNO Rapport 2020 R10628 is 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. Op basis van deze kenmerken kan snel voor een gehele typologie worden bepaald of en zo ja waar deze voldoet aan de norm. De norm die bij de veiligheidsbeoordeling wordt gehanteerd is de Meijdam norm (het Individueel Risico per jaar moet gelijk aan of kleiner zijn dan  $10^{-5}$ ). De beoordelingsprocedure is zodanig opgezet dat uiteindelijk alle gebouwen (indien nodig na het nemen van versterkingsmaatregelen) voldoen aan de Meijdam norm. TNO Rapport 2020 R10628 zal vanaf nu worden aangeduid als het hoofdrapport [TNO, 2020].

In dit rapport wordt deze aanpak ingevuld voor de subtypologie METSELWERK2. Voor de indeling in typologieën en subtypologieën inclusief de bijbehorende kenmerken wordt verwezen naar het hoofdrapport [TNO, 2020]. Uitgevoerde berekeningen zijn uitgevoerd en gerapporteerd in [Messali et al, 2020]. Het voorliggende rapport moet in samenhang met het hoofdrapport [TNO, 2020] en het genoemde berekeningsrapport [Messali et al, 2020] beschouwd worden.

## 2 Omschrijving (sub)typologie

De subtypologie METSELWERK2 maakt onderdeel uit van de typologie METSELWERK-A. Deze typologie omvat geschakelde woningen (rijtjeswoningen of 2 onder 1 kap) met een draagconstructie van ongewapend metselwerk (zoals van kalkzandsteen, baksteen, betonsteen). De woningscheidende wanden zorgen voor de stabiliteit in de ene richting, ook wel dwarsrichting genoemd (de sterke richting). De stabiliteit in de andere richting, de langsrichting, wordt verzorgd door metselwerk penanten in de langsgevel of binnenin de woning, met mogelijke bijdragen van de vloer-wand verbindingen, de (doorlopende) vloeren, het dakvlak en interne wanden.

De typologie METSELWERK-A is onderverdeeld in drie subtypologieën, die zich als volgt onderscheiden:

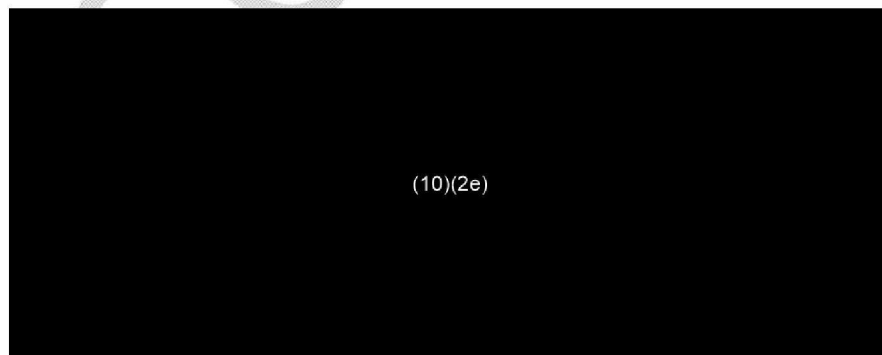
- METSELWERK1: Het percentage openingen in de maatgevende doorsnede van de langsgevel(s) is minder dan 85%, en de verdiepingsvloeren zijn van beton.
- METSELWERK2: Het percentage openingen in de maatgevende doorsnede van de langsgevel(s) is groter dan of gelijk aan 85%. Er wordt geen onderscheid gemaakt naar materiaal van de verdiepingsvloer.
- METSELWERK3: Het percentage openingen in de maatgevende doorsnede van de langsgevel(s) is minder dan 85%, en de verdiepingsvloeren zijn van hout.

Er is sprake van de subtypologie METSELWERK2 als de volgende eigenschappen worden vastgesteld op basis van een gerichte inspectie:

Kenmerk	Waarde	Opmerking
<b>Materiaal Draagconstructie</b> (maatgevende richting)	Metselwerk	Baksteen, Betonsteen Kalkzandsteen of anderszins
<b>Draagsysteem</b>	Metselwerk wanden in sterke richting; Metselwerk penanten in zwakke richting EN/OF doorlopende betonnen vloeren	
<b>Aantal bouwlagen</b> (zolder en kelder niet meetellen)	1 of 2	Goothoogte op eerste of tweede verdiepingsvloerniveau
<b>Vrijstaand of geschakeld</b>	Geschakeld, seriematig	Zowel rijtjeswoning als 2 onder 1 kap
<b>Materiaal verdiepingsvloer(en)</b>	Hout of beton	De eerste verdiepingsvloer is met name van belang
<b>Opbouw gevel</b>	Spouwmuur	
<b>Percentage openingen in langsgevel begane grond, maatgevende doorsnede</b>	≥ 85%	

Dit rapport behandelt uitsluitend subtypologie METSELWERK2. De andere subtypologieën binnen de typologie METSELWERK-A worden behandeld in afzonderlijke rapporten.

Voorbeelden van woningen die tot de subtypologie METSELWERK2 behoren zijn gegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Ter illustratie woningen die vallen in subtypologie METSELWERK2

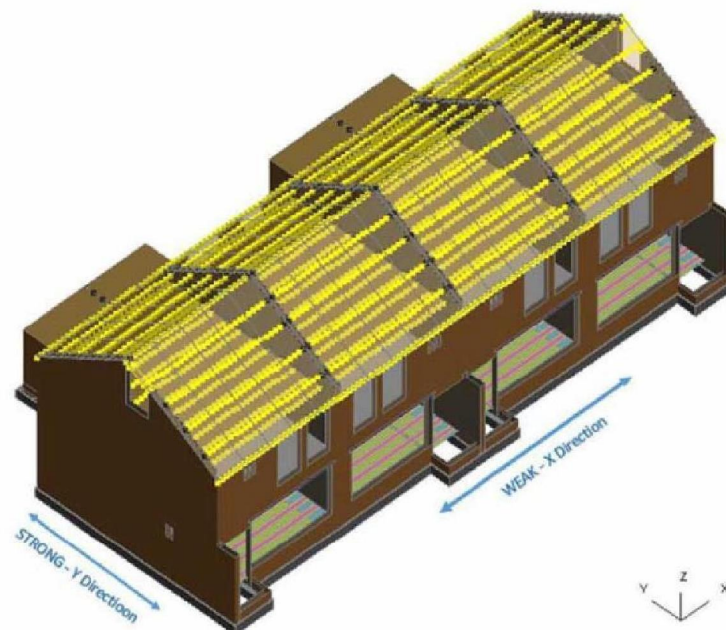
### 3 Overzicht van beschikbare en gebruikte informatie

#### 3.1 Algemeen

Voor de uitwerking van typologieën wordt gebruik gemaakt van gekalibreerde niet-lineaire tijddomein berekeningen (NLTH, Non Linear Time History analysis). Voor de typologie METSELWERK2 zijn berekeningsresultaten voor twee gebouwen beschikbaar die door Arup zijn doorgerekend [Arup, 2017; Arup, 2019a; Arup, 2019b]. Deze zijn door Arup aangeduid als Zijlvest 25 en E45 Delfzijl. De resultaten van deze referentiegebouwen zijn door Eucentre gebruikt voor het afleiden van zogenaamde *fragility functions*, ook wel kwetsbaarheidskrommen, genoemd. Zijlvest 25 is gebruikt als mediaan gebouw in [Crowley et al, 2017; Crowley et al, 2019], en was ten tijde van de door TNO en TU Delft uitgevoerde analyses als enige beschikbaar. Door de TU Delft [Messali et al, 2020] is een validatiestudie gedaan naar de juistheid en aanvaardbaarheid van bovengenoemde berekeningen, zie hoofdstuk 4; hieruit komt naar voren dat bovengenoemde berekeningen ingezet kunnen worden voor het afleiden van de kwetsbaarheidskromme. De resultaten van E45 Delfzijl zijn later beschikbaar gekomen. Deze resultaten van E45 Delfzijl zijn mede gebruikt om de toe te passen versterkingsmaatregelen te omschrijven.

#### 3.2 Eigenschappen van de referentiegebouwen

De beschrijving van referentiegebouw Zijlvest 25 is gegeven in [Arup, 2017]. Dit gebouw, dat inmiddels is gesloopt, dateert uit 1976 en was gesitueerd in Loppersum.



Figuur 2: LS Dyna model van Zijlvest 25, uit [Arup, 2017]

Het gebouw heeft twee verdiepingen en een zolderverdieping. De begane grondvloer en eerste verdiepingvloer zijn van beton, de zoldervloer van hout. De gevels zijn van twee maal 100 mm metselwerk met een spouw van 100 mm. Het openingspercentage van de begane grondvloer is gegeven in [Crowley et al, 2017] en bedraagt 95% ter plaats van de maatgevende doorsnede. De horizontale stabiliteit in langsrichting wordt verzorgd door metselwerk penanten.

### 3.3 Uitgevoerde berekeningen

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

De berekeningen van de TU Delft zijn uitgevoerd in Diana; ook hier heeft kalibratie aan tritafeltesten plaatsgevonden [Messali et al, 2020], dit voor zowel in-het-vlak als uit-het-vlak gedrag.

In de door Arup uitgevoerde berekeningen is gebruik gemaakt van in totaal 11 aardbevingssignalen die als representatief worden beschouwd voor de mogelijk optredende signalen.

Voor verdere omschrijving van de gebruikte materiaaleigenschappen en uitgevoerde berekeningen wordt verwezen naar [Arup, 2017] en [Arup, 2019b]. De berekeningen zijn uitgevoerd voor beide hoofdtraagrichtingen van de constructie. Per richting en per berekening is de maximale verplaatsing ter plaatse van de zolderverdieping en de maximaal optredende dwarskracht ter hoogte van de begane grond vloer tijdens de berekening (net voor falen) gerapporteerd. Per berekening is gerapporteerd wat de effecten zijn op het gebouw. Deze effecten verschillen per signaal van geen effect (het gebouw blijft intact) tot aan volledige instorting met per berekening bepaalde percentages volumeverlies.

### 3.4 Faalmechanismen van de referentiegebouwen

De waargenomen faalmechanismen zijn omschreven in [Crowley et al, 2017] en [Arup, 2019b]. Deze zijn hieronder samengevat, per zogeheten Collapse State (CS).

Gebouw	CS1	CS2	CS3
<b>Zijlvest 25</b>	Masonry columns collapse outwards and lintel collapse.	Masonry columns collapse both inwards and outwards.	Full Collapse (geen nadere beschrijving beschikbaar)
<b>E45 Delfzijl</b>	Failure of lintels of URM internal walls below the 1st floor slab.	Failure of lintels of URM internal walls below the 1st floor slab. Out-of-plane failure at outer leaf pier at 2nd floor.	1 - Onset of full collapse due to soft-storey mechanism formation at ground floor. 2 - Onset of full collapse due to loss of support of 1st floor slab from internal wall piers.



Belangrijkste observaties uit deze waarnemingen zijn:

- Er worden meerdere faalmechanismes waargenomen.
- Falen in het vlak (in-plane) is voor het optreden van CS3 (volledige instorting) het relevante faalmechanisme.
- Het uit-het-vlak falen (afgekort tot OOP in het overzicht) komt voor in de uitgevoerde berekeningen, leidend tot CS1 of CS2. Uit het vlak falen betreft dragende wanden, buitenspouwblad van kopgevels en ook niet-dragende wanden.

In de beschrijving van de kwetsbaarheidskrommen wordt gebruik gemaakt van de uitkomsten van de berekeningen die ten grondslag liggen aan het overzicht met faalmechanismen. Dit betekent dat alle genoemde faalmechanismes geacht worden te kunnen optreden in deze typologie.

Dit overzicht van waargenomen faalmechanismes wordt in hoofdstuk 7 gebruikt bij het vaststellen van de versterkingsmaatregelen.

### 3.5 Langsgevels met meer dan 95% openingen

De beschikbare NLTH berekeningen zijn uitgevoerd voor gebouwen waarbij er in de gevel nog enig metselwerk aanwezig is dat bijdraagt aan de stabiliteit (door onder meer penant- en flenswerking). Het openingspercentage ligt bij die gebouwen tussen 85 en 95 %. Er zijn ook rijtjeswoningen aanwezig in Groningen waarbij geen metselwerk in de gevel aanwezig is en de langsgevel wordt ingevuld door een gevelvullende pui waaraan geen seismische weerstand kan worden toegekend. Dit betreft de zogeheten vliesgevelwoningen.

Voor die woningen geldt dat de stabiliteit in langsrichting in de praktijk zal worden verzorgd door ofwel (1) constructief werkende binnenwanden, ofwel (2) door toepassing van doorlopende betonnen vloeren die over de bouwmuren doorlopen.

In het eerste geval kan het gebouw worden beschouwd als METSELWERK2.

In het tweede geval is het constructieve gedrag bij een aardbeving vergelijkbaar met seriematige woningen waarbij betonnen wanden zijn gebruikt met doorlopende betonnen vloeren. Voor die woningen wordt daarom verwezen naar de subtypologie BETON1. Omdat voor deze subtypologie een gunstiger gedrag wordt gevonden dan voor METSELWERK2, is een beoordeling volgens METSELWERK2 ook geoorloofd.

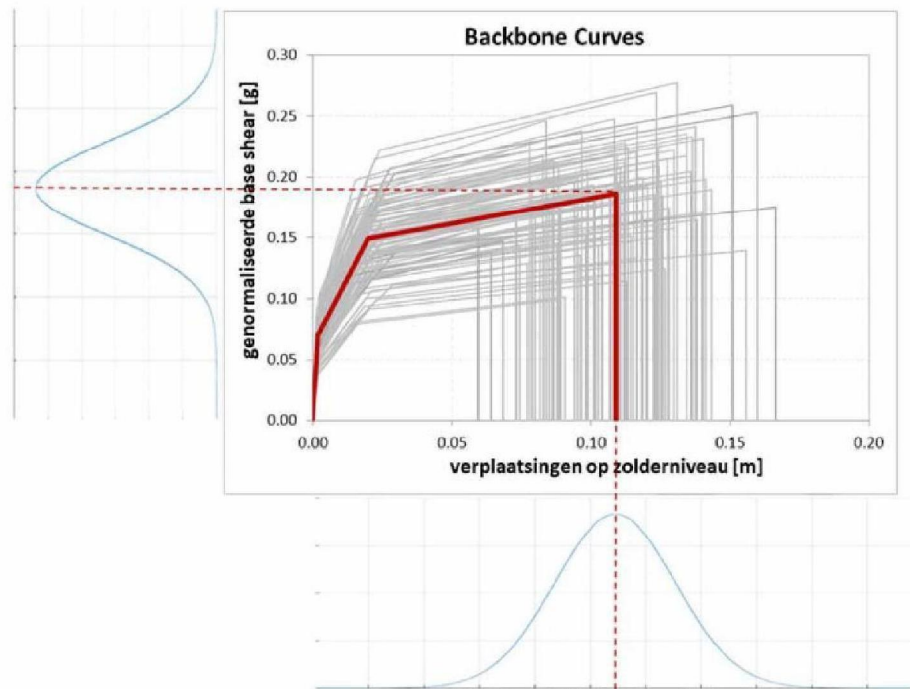
## 4 Variatiestudies

### 4.1 Studie naar gebouw-tot-gebouw variatie METSELWERK2

In het hoofdrapport [TNO, 2020] is de methode beschreven aan de hand waarvan de gebouw-tot-gebouw variatie wordt bepaald. Deze methode is gevolgd voor de typologie METSELWERK2 om tot een gevalideerd gemiddeld gebouw en een geverifieerde gebouw-tot-gebouw variatie te komen. Voor deze typologie is als basis het referentiegebouw Zijlvest 25 gebruikt, dat de basis is voor *vulnerability class* URM4L uit de betreffende Eucentre rapportage [Crowley et al, 2019]. Voor de toepassing als referentiegebouw voor (sub)typologie METSELWERK2 is nader onderzocht of dit gebouw als mediaan kan worden beschouwd en of er voldoende gebouw-tot-gebouw variatie en modelonzekerheid is toegepast. Indien deze onvoldoende blijken te zijn worden grotere marges toegepast. Uitgangspunt is in elk geval dat niet minder marge wordt toegepast dan in de studie van Eucentre is meegenomen.

Door de TU Delft zijn modelberekeningen gemaakt [Messali et al, 2020]. Deze modelberekeningen hebben aangetoond dat a) in-het-vlak falen het dominante mechanisme is voor deze typologie en dus NLPO's kunnen worden ingezet voor de bepaling van de gebouw-tot-gebouw variatie en b) dat de trilineaire backbone curve voor het gebouw Zijlvest 25 het gedrag voor het gemiddelde gebouw voor de typologie METSELWERK2 goed beschrijft. Verschillende variaties in gebouwen binnen deze typologie en het effect daarvan op het constructieve gedrag zijn in de studie van de TU Delft bestudeerd. Dit heeft geresulteerd in (continue) verdelingsfuncties voor bijvoorbeeld de effectieve massa en de backbone curve met een gemiddelde en spreiding. Op basis van deze verdelingsfuncties en afhankelijkheden (correlaties) tussen de verschillende parameters zijn een x-aantal random trekkingen gedaan voor een combinatie aan gebouw eigenschappen. Op deze manier kunnen op relatief snelle wijze meerdere gebouwvariaties beschouwd worden, omdat niet voor elk gebouw de backbone curve afgeleid hoeft te worden volgens modelberekeningen zoals in [Messali et al, 2020].

Voor elke variatie zijn de stappen II en III uit de methode zoals beschreven in bijlage D.4 van het hoofdrapport [TNO, 2020] uitgevoerd, wat heeft geresulteerd in verschillende variaties in gedrag van de gebouwen binnen de typologie METSELWERK2. De variaties komen tot uitdrukking in de gehanteerde variaties van de in Figuur 3 rood weergegeven backbone curve voor het gevalideerde gemiddelde gebouw. De verdelingsfuncties die zijn gebruikt voor de variaties zijn ook weergegeven in Figuur 3. In lichtgrijs zijn 100 random trekkingen weergegeven uit deze verdelingsfuncties. Omwille van de leesbaarheid van de figuur zijn de backbone curves met de kleinste kans, die nog verder van de gemiddelde backbone curve liggen, niet weergegeven.



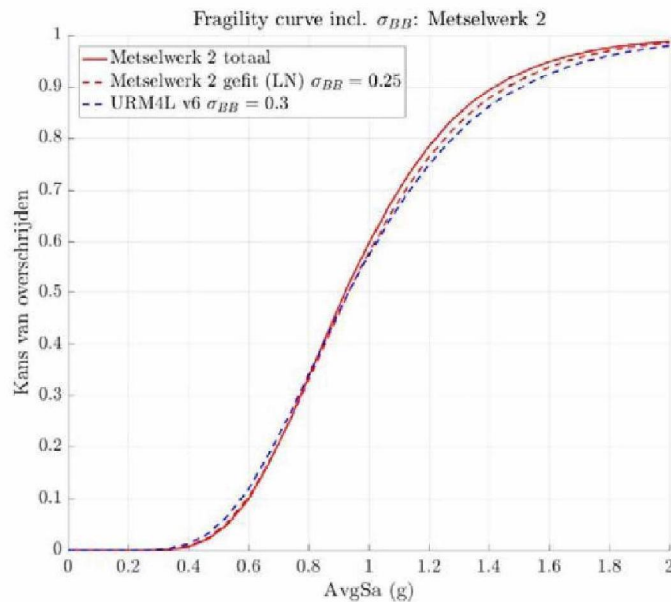
Figuur 3: Backbone curves uit variatie studie METSELWERK2 (genormaliseerde versnelling is gelijk aan base shear genormaliseerd met effectieve massa\*g), de aangehouden spreiding is conform [Messali et al, 2020]

#### 4.2 Bepaling van de gebouw-tot-gebouw variatie

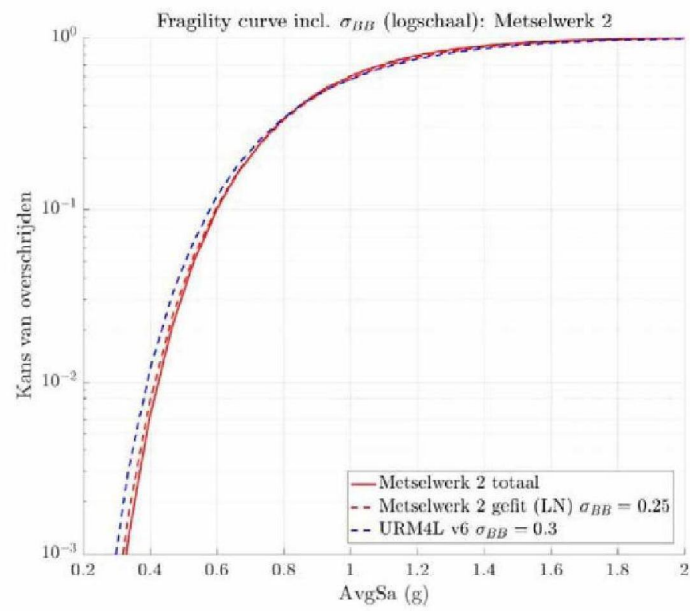
De gebouw-tot-gebouw variatie ( $\sigma_{BB}$ ) moet worden opgenomen in de kwetsbaarheidskromme voor METSELWERK2. De kwetsbaarheidskromme beschrijft de kans van falen van de constructie gegeven een bepaalde aardbevingsbelasting. Door de kwetsbaarheidskromme per beschouwde variatie in paragraaf 4.1 te combineren tot een enkele kwetsbaarheidskromme wordt deze gebouw-tot-gebouw variatie verdisconteerd. Het is ook mogelijk om de gebouw-tot-gebouw variatie in rekening te brengen door een zekere factor toe te voegen aan de kwetsbaarheidskromme voor het gemiddelde gebouw. In [Crowley et al, 2019] is een waarde van 0,30 toegepast voor de gebouw-tot-gebouw variatie ( $\sigma_{BB}$ ) van URM4L, het equivalent van METSELWERK2. Deze waarde beschrijft zowel de onzekerheid in gedrag als in capaciteit.

In Figuur 4 is de gecombineerde kwetsbaarheidskromme van alle gebouwvariaties (rode doorgetrokken lijn) weergegeven (waarvan in Figuur 3 de backbone curves zijn weergegeven). De risicoberekening met de TNO modelketen vraagt om een kwetsbaarheidskromme die lognormaal verdeeld is. Daarom is de gecombineerde curve voor METSELWERK2 (geen lognormale verdeling, rode doorgetrokken lijn in Figuur 4 en Figuur 5) gefit met een lognormale verdeling (de rode gestreepte lijn). Daarbij is nadruk gelegd op de linker staart van de kwetsbaarheidskromme, die het meest relevant is voor de risicoberekening. De rode gestreepte lijn heeft geresulteerd in een gebouw-tot-gebouw variatie van  $\sigma_{BB} = 0,25$ . Hierbij zijn zowel de onzekerheden in het gedrag als de capaciteit meegenomen (verplaatsingen en

maximale toegestane verplaatsing/near-collapse displacement). De resulterende gebouw-tot-gebouw variatie van 0,25 is iets lager dan de door NAM gehanteerde waarde van 0,3. De kwetsbaarheidskromme uit [Crowley et al, 2019] voor URM4L is ook weergegeven (blauwe gestreepte lijn). Beide kwetsbaarheidskrommes komen goed overeen. Dit is nog beter te zien in Figuur 5 waar voor de geplotte kwetsbaarheidskrommes is ingezoomd op de linker staart van de verdeling, die het meest relevant is voor de risicoberekening. Hieruit blijkt dat de linker staart van de kwetsbaarheidskromme voor URM4L net iets naar links ligt ten opzichte van de gecombineerde curve voor METSELWERK2 en daarom iets conservatiever is. Een tweede methode is ook toegepast om de kwetsbaarheidskromme voor METSELWERK2 af te leiden waarbij de gebouw-tot-gebouw variatie een directe uitkomst is (de gebouw-tot-gebouw variatie is een van de te fitten parameters). Hieruit volgt ook dat een variatie van  $\sigma_{BB} = 0,25$  de gebouw-tot-gebouw variatie goed representeert, zowel in gedrag als capaciteit.



Figuur 4: Kwetsbaarheidskromme METSELWERK2



Figuur 5: Kwetsbaarheidskromme METSELWERK2 logaritmische schaal (ingezoomd op de linkerstaart van de verdeling)

CONCRETE

## 5 Sterkteparameters in TNO modelketenberekening

In dit hoofdstuk wordt het overzicht gegeven van de in rekening te brengen parameters voor de sterkte in de berekening met de TNO modelketen. Dit spitst zich toe op drie waarden: de mediane sterkte, de spreiding als gevolg van gebouw-tot-gebouw variatie en het verrekenen van modelonzekerheden.

### 5.1 Kwetsbaarheidskromme

In Tabel 2 zijn de parameters van de kwetsbaarheidskromme gegeven zoals deze in de modelketenberekening zijn gebruikt. Deze zijn overgenomen uit Tabel 5.6 van [Crowley et al, 2019]. Voor de betekenis van deze parameters zie Bijlage D van het hoofdrapport. De waarden voor  $b_{0midde}$ ,  $b_1$  en de limietverplaatsingen bij de onderscheiden collapse states CS1, CS2 en CS3 in Tabel 2 volgen uit [Crowley et al, 2019]. Deze parameters zijn direct afkomstig uit de response van gekalibreerde numerieke modellen voor het referentiegebouw op 200 aardbevingssignalen afgestemd op de Groningse situatie. Deze bepalen de mediane ligging van de kwetsbaarheidskromme. In Hoofdstuk 4 is besproken dat uit de TU Delft studie volgt dat het referentiegebouw inderdaad een mediaan gedrag vertoont. Vervolgens zijn de record-to-record variatie, gebouw-tot-gebouw variatie en modelonzekerheid in rekening gebracht. Hieruit volgen de andere parameters in Tabel 4. Een nadere toelichting wordt gegeven in de volgende paragrafen.

### 5.2 Gebouw-tot-gebouw variatie

De basis voor het vaststellen van de waarde van de gebouw-tot-gebouw variatie ( $\sigma_{BB}$ ) voor METSELWERK2 vormt de variatiestudie zoals beschreven in paragraaf 4.2. Uit die studie volgt dat  $\sigma_{BB} = 0,25$ . Deze waarde is lager dan de waarde uit literatuur, die door [Crowley et al, 2019] is gebruikt. Deze referentiewaarde van 0,30 wordt door TNO overgenomen en toegepast in de uitwerking van de typologie. Met deze keuze wordt wat extra marge ingebouwd in de risicoberekening.

Tabel 1 Toegepaste waarde voor de gebouw-tot-gebouw variatie

(sub)typologie	METSELWERK2
Gebouw-tot-gebouw variatie ( $\sigma_{BB}$ )	0,30

De  $\sigma_{BB}$  wordt met de record-to-record variabiliteit gecombineerd zoals beschreven in het hoofdrapport, bijlage D. Hieruit volgt de totale spreiding,  $\sigma_s$  weergegeven in Tabel 4.

### 5.3 Modelonzekerheid

De modelonzekerheid  $\beta_m$  is gegeven 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. De bijdrage  $\beta_q$  is gerelateerd aan de kwaliteit en de mate van volledigheid van het gebruikte numerieke model.

In het hoofdrapport worden de achtergronden gegeven voor  $\beta_c$  en  $\beta_q$  per constructiemateriaal. De waarde voor  $\beta_c = 0,25$  die in het hoofdrapport wordt gegeven, wordt overgenomen voor deze typologie. Voor  $\beta_q$  wordt een waarde van 0,25 gekozen. Dit is hoger dan de waarde die door Eucentre [Crowley et al, 2017] is gekozen. De reden dat voor een hogere waarde wordt gekozen is dat naar het oordeel van TNO de gebruikte modellen niet als superieur kunnen worden beschouwd.

Toepassing van de waarden van 0,25 voor zowel  $\beta_c$  als  $\beta_q$  levert een waarde van 0,35 voor  $\beta_m$ . Deze waarde is door TNO geïmplementeerd in de versie van de TNO modelketen die is gebruikt voor de typologiegebaseerde beoordeling. Hierbij is gebruik gemaakt van een representatie van de modelonzekerheid door middel van een 'logic tree'; de nadere beschrijving hiervan en hoe dit is geïmplementeerd in de modelketenberekening is gegeven in het hoofdrapport, bijlage D. Hieruit worden de waarden voor  $b_{0upper}$  en  $b_{0lower}$  berekend, zoals deze zijn gegeven in Tabel 2.

#### 5.4 Gevolgmodel

Voor de gevolgmodellering worden het model en de waarden uit [Crowley et al, 2020] als basis genomen. In dat rapport wordt voor CS3 uitgegaan van een overlijdenskans gegeven falen van 0,42. Gegeven de wijze van instorten zoals waargenomen in de NLTH-berekeningen van de referentiegebouwen acht TNO dit een redelijke waarde.

De bijbehorende waarden voor DL\_CS, Pd\_inside en Pd\_outside die ingevoerd worden in de modelketen zijn in Tabel 2 gegeven.

#### 5.5 Samenvatting parameters

Tabel 2: Overzicht van invoerparameters in de TNO modelketenberekening

Parameters	METSELWERK2
$b_{0lower}$	-2,735
$b_{0middle}$	-2,130
$b_{0upper}$	-1,524
$b_1$	1,2524
$\sigma_s$	0,468
DL_CS1	0,039
DL_CS2	0,094
DL_CS3	0,109
Modelonzekerheid $\beta_m$	0,35
Pd_inside CS1	0,0084
Pd_inside CS2	0,021
Pd_inside CS3	0,42
Pd_outside CS1	0,01
Pd_outside CS2	0,025
Pd_outside CS3	0,5





## 7 Versterkingsmaatregelen

Versterkingsmaatregelen voor gebouwen zijn gericht op het mitigeren van de maatgevende faalmechanismes.

Voor METSELWERK2 zijn deze faalmechanismes gegeven in hoofdstuk 3. Dit zijn de faalmechanismes die in elk geval gemitigeerd dienen te worden. Daarnaast is inzage verkregen in berekeningen van ingenieursbureaus waarin versterkingsmaatregelen worden voorgesteld. De genoemde maatregelen uit die rapporten gaan verder dan alleen het mitigeren van de genoemde faalmechanismen. Onderstaand zijn de voorgestelde maatregelen in generieke zin op volgorde van prioriteit weergegeven. De verdere uitwerking en detaillering van deze maatregelen is maatwerk wat per gebouw kan verschillen.

De volgende maatregelen moeten hiervoor worden toegepast:

1: *Het zorgen voor voldoende sterkte in het vlak van de langsgevel.*

Hiermee wordt voorkomen dat deze faalt, waardoor een zogeheten soft story ontstaat. Dit kan worden gemitigeerd door het ontwerp en uitvoeren van een stalen portaalconstructie in de langsgevels. Dit portaal neemt de krachten als gevolg van een aardbeving over van de gevel. Bij dit ontwerp dient ook de fundering te worden beschouwd en mogelijk te worden aangepast. Dit betreft een zeer ingrijpende maatregel die moet worden afgewogen tegen het slopen van het gebouw en realiseren van (voldoende aardbevingsbestendige) nieuwbouw.

2: *Het constructief koppelen van dragende wanden en vloeren.*

De samenhang van het gebouw moet worden geborgd door ervoor te zorgen dat de wanden en vloeren constructief kunnen samenwerken. Hiervoor zijn diverse oplossingen beschikbaar op de markt, die onder andere te vinden zijn in de Groninger Maatregel Catalogus van NCG. Welke oplossing het best is hangt af van de specifieke opbouw van het beschouwde gebouw. Een gekozen oplossing dient altijd te worden nagerekend en uitgedetailleerd voor de specifieke toepassing.

3: *Vergroten van de weerstand tegen uit het vlak bezwijken van dragende wanden.*

Bij het uit het vlak bezwijken van dragende wanden kan een deel van de bovenliggende vloer of verdieping instorten. Om dit te voorkomen kan bijvoorbeeld een houtskeletbouw voorzetwand worden toegepast die constructief aan de wand wordt aangebracht. Daarnaast moeten de verbindingen tussen wanden en vloeren worden beschouwd en waar nodig versterkt.

De voorgaande versterkingsmaatregelen zijn gebaseerd op het mitigeren van de faalmechanismes die zijn gegeven in paragraaf 3.4. Aanvullende maatregelen die overwogen kunnen worden zijn afgeleid uit versterkingsadviezen die ter beschikking zijn gesteld door NCG. Deze zijn gebaseerd op berekeningen aan gebouwen van typologie METSELWERK2 met vereenvoudigde methoden volgens NPR 9998:2018.

4: *Versterken van de verdiepingsvloeren, waardoor deze meer stijfheid in het vlak hebben.*

Deze maatregel zorgt ervoor dat de krachten door een aardbeving beter verdeeld worden over de constructie.

5: *Versterken van het dakvlak en constructief verbinden van dakconstructie met dragende wanden en vloeren.*

Ook deze maatregel heeft het effect dat de krachten door een aardbeving zich beter kunnen verdelen over de constructie.

CONCEPT

## 8 Referenties

[Arup, 2016]

LS-DYNA validation booklet, juli 2016

[Arup, 2017]

Typology modelling for fragility development, 2017

[Arup, 2019a]

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

[Arup, 2019b]

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

[Arup, 2020]

LS-DYNA Masonry Model Recalibration, 4 Mei 2020

[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

[FEMA, 2012]

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

[Messali et al, 2020]

Messali, F., Longo, M. (2020). Definition of a consistent backbone curve for typology 'Metselwerk 2'. Delft University of Technology. Report number 01, Version 02, 15 April 2020

[Mosayk, 2019]

Parametric study on the influence of different URM building characteristics-impact of ground floor percentage on the response of a terraced house unit model, Mosayk, 2019

[TNO, 2020]

Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen1 - Achtergrond bij de methode, TNO R10628, 2020

## 9 Ondertekening

Delft, <datum>

TNO

<naam afdelingshoofd> Dr. ir. (10)(2e), Prof.dr.ir. R.D.J.M.  
Steenbergen, Ir. (10)(2e) (10)(2e)  
Afdelingshoofd Auteur

CONCEPT