

**TNO-rapport**

**TNO 2020 R10966A**

**Typologie-gebaseerde beoordeling van de  
veiligheid bij aardbevingen in Groningen -  
Uitwerking van typologiegroep  
METSELWERK-C (typologieën  
METSELWERK5+6+7)**

Stieltjesweg 1  
2628 CK Delft  
Postbus 155  
2600 AD Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 20 00

Datum 2 september 2021

Auteur(s) Dr.ir. C.P.W. Geurts, Prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen,  
Ir. J. Pruijsma, Dr.ir. M.R.A. van Vliet, Ir.ing. M. Steins, Ir. D. Moretti

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 198 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever Ministerie van EZK  
t.a.v. Mr. T.Smolders

Projectnaam Adviesvragen EZK bovengrond: Typologie aanpak

Projectnummer 060.39973/01.01

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2021 TNO

## Samenvatting

Dit rapport beschrijft de uitwerking van de typologie gebaseerde beoordeling zoals omschreven in het hoofdrapport [TNO, 2021a] voor de typologiegroep METSELWERK-C met typologieën METSELWERK5, METSELWERK6 en METSELWERK7. Deze typologiegroep bestaat uit vrijstaande gebouwen met 1 of 2 bouwlagen met een draagconstructie van metselwerk waarbij de gootlijn ter hoogte van de vloer van de tweede bouwlaag ligt (de eerste verdiepingsvloer).

Dit rapport beschrijft de totstandkoming van het sterkte- en gevolgmodel voor de typologie METSELWERK7, in de vorm van de kwetsbaarheidskromme, de parameters die deze kromme beschrijven en de parameters voor het gevolgmodel.

De kwetsbaarheidskromme, inclusief een door ACVG voorgeschreven marge, is toegepast in een berekening met de TNO modelketen. Deze berekening resulteert in een vlekkenkaart waarin is aangegeven waar de typologie METSELWERK7 wel, dan wel niet voldoet aan de Meijdam norm.

In dit rapport wordt aannemelijk gemaakt dat METSELWERK5 en METSELWERK6 een gunstiger seismische gedrag vertonen in vergelijking met METSELWERK7. De aanwezigheid van steens metselwerk in typologie METSELWERK5 maakt deze typologie minder kwetsbaar dan METSELWERK7, met spouwmuren en daarmee halfsteens dragend metselwerk. De aanwezigheid van een betonnen vloer van de tweede bouwlaag bij METSELWERK6 in plaats van de houten vloer voor METSELWERK7 zorgt ervoor dat METSELWERK6 minder kwetsbaar is. Dit betekent dat waar METSELWERK7 voldoet aan de norm, de typologieën METSELWERK5 en 6 ook zeker veilig zullen zijn, en daarmee de hele typologiegroep METSELWERK-C.

## Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting .....</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Omschrijving typologiegroep en bijbehorende typologieën .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Overzicht van gemodelleerde en geteste gebouwen.....</b>	<b>8</b>
3.1	Algemeen.....	8
3.2	Eigenschappen van de doorgerekende en geteste gebouwen.....	8
3.3	Relatie met gebouwvoorraad in Groningen.....	11
3.4	Uitgevoerde berekeningen en testresultaten.....	11
3.5	Faalmechanismes van de berekende referentiegebouwen .....	13
<b>4</b>	<b>Afleiding kwetsbaarheidsmodel en gevolgmodel voor METSELWERK7 .....</b>	<b>14</b>
4.1	Beschikbare informatie voor het kwetsbaarheidsmodel .....	14
4.2	Afleiding kwetsbaarheidsmodel voor het referentiegebouw voor METSELWERK7	15
4.3	Mediane seismische capaciteit voor de typologie .....	18
4.4	Gebouw-tot-gebouw variatie voor de typologie .....	19
4.5	Modelonzekerheid .....	20
4.6	Gevolgmodellering.....	21
4.7	Marge ACVG advies .....	22
<b>5</b>	<b>Sterkteparameters in de TNO modelketenberekening voor METSELWERK7 .</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>Typologieën METSELWERK5 en METSELWERK6.....</b>	<b>24</b>
6.1	Invloed van steens muren (METSELWERK5).....	24
6.2	Invloed van materiaal verdiepingsvloer (METSELWERK6) .....	24
6.3	Beoordeling van METSELWERK5 en METSELWERK6 .....	25
<b>7</b>	<b>Controles .....</b>	<b>26</b>
7.1	NLTH berekeningen.....	26
7.2	Gebouw tot gebouw variabiliteit.....	27
7.3	Uitgebreidere opname .....	27
7.4	Uit het vlak falen .....	27
<b>8</b>	<b>Vlekkenkaart voor METSELWERK7 .....</b>	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>33</b>

### Bijlage(n)

- A Vergelijking met berekeningen uitgevoerd in kader van ontwikkeling NPR 9998
- B Ligging referentiegebouwen in Groningse gebouwenpopulatie
- C Modellering gebouwen METSELWERK7
- D Effect van steens muren op het seismisch gedrag
- E Effect van materiaal verdiepingsvloer

- F Numeriek modelleren van uit het vlak falen van steens muren
- G Beschouwing op basis van controleberekeningen
- H NLTH berekeningen controlegebouwen

## 1 Inleiding

De gaswinning in Groningen leidt tot het ontstaan van ondiepe aardbevingen. Hoewel deze aardbevingen relatief licht zijn (in termen van Magnitudes op de Richterschaal), zijn de effecten aan het aardoppervlak door de relatief ondiepe locatie (3 km) van het hypocentrum aanzienlijk. Er is een grote opgave om het veiligheidsniveau voor de bewoners van Groningen te borgen.

In TNO Rapport 2020 R10628A [TNO, 2021a] 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  $10^{-5}$ ). TNO Rapport 2020 R10628A zal vanaf nu worden aangeduid als het hoofdrapport [TNO, 2021a].

In dit rapport wordt deze aanpak ingevuld voor de typologiegroep METSELWERK-C, onderverdeeld in de typologieën METSELWERK5, METSELWERK6 en METSELWERK7. Voor de indeling in typologieën inclusief de bijbehorende kenmerken wordt verwezen naar het hoofdrapport en typologietoedelingsrapport [TNO, 2021a, 2021b]. Het voorliggende rapport moet in samenhang met deze rapporten beschouwd worden.

Dit rapport is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk 2 geeft kort een omschrijving van de typologie. In hoofdstuk 3 wordt de informatie die gebruikt is om het sterktemodel voor de typologie af te leiden, beschreven. Hoofdstuk 4 gaat nader in op uitgevoerde variatiestudies door de TU Delft, waarvan de resultaten in bijlagen zijn gegeven. Hoofdstuk 5 geeft het overzicht van de parameters die afgeleid zijn ten behoeve van het berekenen van het risico met de TNO Modelketen. Hoofdstuk 6 beschrijft de door ACVG gevraagde controles voor deze typologie. In hoofdstuk 7 is de vlekkenkaart die van toepassing is voor de typologie METSELWERK7 gegeven.

## 2 Omschrijving typologiegroep en bijbehorende typologieën

De typologiegroep METSELWERK-C omvat de vrijstaande gebouwen met maximaal 2 bouwlagen (begane grond, eerste verdieping, met eventueel een zolder of vliering), met gevels opgebouwd uit een (ongewapend) metselwerk draagconstructie. De gootlijn bevindt zich ter hoogte van de vloer van de tweede bouwlaag (eerste verdiepingsvloer). De stabiliteit van de gebouwen wordt verzorgd door de metselwerk gevels en dragende binnenwanden.

De typologiegroep METSELWERK-C is onderverdeeld in drie typologieën, die zich als volgt onderscheiden:

- METSELWERK5: De metselwerk gevels zijn opgebouwd uit steens metselwerk, zonder spouw.
- METSELWERK6: De metselwerk gevels zijn opgebouwd als spouwmuur. De vloer van de tweede bouwlaag is van beton.
- METSELWERK7: De metselwerk gevels zijn opgebouwd als spouwmuur. De vloer van de tweede bouwlaag is van hout.

Er is sprake van de typologie METSELWERK5, 6 of 7 als de kenmerken die zijn gegeven in Tabel 1 zijn vastgesteld op basis van een bouwkundige opname zoals omschreven in [TNO, 2021b].

Tabel 1: Overzicht van kenmerken die tezamen typologiegroep METSELWERK-C beschrijven

Kenmerk	Waarde	Opmerking
<b>Materiaal Draagconstructie</b> (maatgevende richting)	Metselwerk	Voorbeelden: Baksteen, Betonsteen, Kalkzandsteen
<b>Constructiesysteem in X richting</b>	Metselwerk wanden, schijfwerking	
<b>Constructiesysteem in Y richting</b>	Metselwerk wanden schijfwerking	
<b>Aantal bouwlagen</b> (kelder niet meetellen, zolder afzonderlijk benoemen)	1 of 2	Goothoogte op hoogte van de vloer van de tweede bouwlaag
<b>Vrijstaand of geschakeld</b>	Vrijstaand	
<b>Materiaal verdiepingsvloer</b>	Hout Beton	METSELWERK5 en METSELWERK7 METSELWERK6
<b>Opbouw gevel</b>	Spouwmuur Steenmuur	METSELWERK6 en METSELWERK7 METSELWERK5

Voor een verdere toelichting op deze kenmerken wordt verwezen naar het rapport over typologietoedeling [TNO, 2021b]. In dat rapport staan ook uitsluitingsgronden beschreven die gecontroleerd moeten zijn voordat definitief tot typologietoedeling wordt overgegaan.

Voorbeelden van gebouwen in deze typologie zijn vrijstaande gebouwen met de voordeur in de kopgevel of in de zijgevel, de zogenaamde rentenierswoningen, krimpjes en arbeiderswoningen. In *Figuur 1* zijn voorbeelden gegeven van gebouwen die aan deze typologie zijn toegedeeld.



*Figuur 1: Voorbeelden van gebouwen uit typologie METSELWERK-C*

### 3 Overzicht van gemodelleerde en geteste gebouwen

#### 3.1 Algemeen

Voor de uitwerking van typologieën wordt gebruik gemaakt van beschikbare gekalibreerde niet-lineaire tijddomein berekeningen (NLTH, *Non Linear Time History*). Voor de typologiegroep METSELWERK-C zijn bruikbare berekeningsresultaten voor twee gebouwen beschikbaar. Deze gebouwen zijn in opdracht van NAM door Arup doorgerekend. De gebouwen zijn door Arup aangeduid als Kwelder en Badweg. Daarnaast zijn voor deze typologiegroep resultaten beschikbaar uit triltafeltesten die bij de internationale onderzoekscentra Eucentre en LNEC zijn uitgevoerd. Deze gebouwen zijn aangeduid als EUC-Build-2 en LNEC-Build-3.

De berekenings- en experimentele resultaten van deze gebouwen zijn door Eucentre gebruikt voor het afleiden van zogenaamde *fragility functions*, ook wel kwetsbaarheidskrommen genoemd, in achtereenvolgende versies van het *fragility and consequence model* [Crowley et al, 2017; Crowley et al, 2019; Crowley et al, 2020]. De informatie uit deze berekeningsresultaten is in dit rapport als basis gebruikt voor de bepaling van de parameters voor typologie METSELWERK7. Door TNO zijn deze beschikbare resultaten geanalyseerd en er zijn eigen keuzes gemaakt voor de te hanteren parameterwaarden ten behoeve van de definitieve berekeningen van de typologieën.

Daarnaast is door de TU Delft een variatiestudie uitgevoerd van gebouwen die binnen het bereik van METSELWERK7 vallen. Deze studie is in bijlage C beschreven. De TU Delft heeft tevens gevoelighedsstudies uitgevoerd voor de opbouw van de gevel (bijlage D) en voor het materiaal van de vloer van de tweede bouwlaag (bijlage E). Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 6.

Na het gereed komen van de sterktemodellering van de typologie is een aanvullende controleberekening uitgevoerd van twee gekozen specifieke gebouwen in Groningen (adressen Wirdumerweg 4 en Damsterweg 37) naar aanleiding van door ACVG gestelde vragen. Deze vragen zijn in hoofdstuk 7 opgesomd en beantwoord. De gebouwbeschrijving en de uitgevoerde berekeningen aan deze gebouwen zijn in bijlagen G en H opgenomen.

#### 3.2 Eigenschappen van de doorgerekende en geteste gebouwen

De door TNO gebruikte beschikbare resultaten van de doorgerekende gebouwen en resultaten van triltafeltesten zijn gedocumenteerd in de referenties per beschikbaar gebouw zoals weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Overzicht van geraadpleegde rapporten van beschikbare berekeningen en testen

Gebouwnaam	Referenties	Opmerkingen
<b>Kwelder</b>	[Arup, 2017a] [Arup, 2019a]	
<b>Badweg</b>	[Arup, 2017a]	
<b>EUC-Build-2</b>	[Eucentre, 2016]	Triltafeltest
<b>LNEC-Build-3</b>	[LNEC, 2018]	Triltafeltest

De gebouwen die zijn gebruikt in de berekeningen aan vrijstaande gebouwen door Arup zijn weergegeven in *Figuur 2*. Tevens zijn de kenmerken die onderscheidend zijn voor de indeling in METSELWERK6 of METSELWERK7 in *Figuur 2* weergegeven.

Kwelder	Badweg
Vrijstaand gebouw met spouwmuur en betonnen vloer van de tweede bouwlaag	Vrijstaand gebouw met spouwmuur en houten vloeren
METSELWERK6	METSELWERK7

*Figuur 2:* Overzicht van de LS-Dyna modellen van de referentiegebouwen en per gebouw aanduiding van TNO typologie waartoe deze behoort

Het gebouw Kwelder (gebouwd in 1996) is een vrijstaande woning met twee bouwlagen en een zolder. De goot is op het niveau van de vloer van de tweede bouwlaag (eerste verdiepingsvloer). Deze vloer is van prefab voorgespannen betonelementen (kanaalplaatvloer). De gevels zijn opgebouwd als spouwmuur met kalkzandsteen binnenblad en bakstenen buitenblad. De horizontale stabiliteit in beide richtingen wordt verzorgd door schijfwerking in het metselwerk.

Het gebouw Badweg (gebouwd rond 1940) is een vrijstaande woning met twee bouwlagen. De goot is op het niveau van de vloer van de tweede bouwlaag (eerste verdiepingsvloer). Deze vloer is hout. De gevels zijn opgebouwd als spouwmuur uit bakstenen metselwerk. De horizontale stabiliteit in beide richtingen wordt verzorgd door schijfwerking in het metselwerk.

De testgebouwen die tijdens de triltafeltesten zijn gebruikt zijn weergegeven in Figuur 3. Beide gebouwen EUC-Build-2 en LNEC-Build-3 zijn representaties van een vrijstaande woning met twee bouwlagen. De goot is op het niveau van de vloer van de tweede bouwlaag (eerste verdiepingsvloer). De verdiepingsvloer is van hout. De gevels zijn opgebouwd als steens muren. De horizontale stabiliteit in beide richtingen wordt verzorgd door schijfwerking in het metselwerk.

	
EUC-Build-2	LNEC-Build-3
Vrijstaand gebouw met steensmuur en houten vloeren	Vrijstaand gebouw met steensmuur en houten vloeren
METSELWERK5	METSELWERK5

Figuur 3: Overzicht van testgebouwen waarvoor triltafeltesten zijn uitgevoerd en aanduiding van TNO typologie waartoe deze testgebouwen behoren

Voor de TU Delft berekeningen wordt verwezen naar Bijlage C. Op basis van een aan triltafeltesten gekalibreerd model zijn zestien 3D variaties doorgerekend van gebouwen die binnen het bereik van METSELWERK7 vallen. Deze variatiestudie maakt als basis gebruik van de gebouwen EUC-Build-2 en LNEC-Build-3, waarbij de steens muren zijn vervangen door gemodelleerde spouwmuren.

De gebouwen die zijn gebruikt voor de controleberekeningen naar aanleiding van vragen van ACVG zijn in Figuur 4 weergegeven (zie ook Bijlage H).

	
Wirdumerweg 4	Damsterweg 37
Vrijstaand gebouw met spouwmuren en houten vloeren	Vrijstaand gebouw met spouwmuren en houten vloeren
METSELWERK7	METSELWERK7

Figuur 4: Overzicht van gebouwen waarvoor controleberekeningen zijn uitgevoerd en aanduiding van TNO typologie waartoe deze gebouwen behoren

Het gebouw Wirdumerweg 4 (gebouwd in 1909) is een vrijstaande woning met twee bouwlagen. De goot is op het niveau van de vloer van de tweede bouwlaag (eerste verdiepingvloer). Deze vloer is hout. De gevels zijn opgebouwd als spouwmuur uit bakstenen metselwerk. De horizontale stabiliteit in beide richtingen wordt verzorgd door schijfwerking in het metselwerk.

Het gebouw Damsterweg (gebouwd in 1936) is een vrijstaande woning met twee bouwlagen. De goot is op het niveau van de vloer van de tweede bouwlaag (eerste verdiepingvloer). Deze vloer is hout. De gevels zijn opgebouwd als spouwmuur uit bakstenen metselwerk, en deels halfsteens metselwerk. De horizontale stabiliteit in beide richtingen wordt verzorgd door schijfwerking in het metselwerk.

### 3.3 Relatie met gebouwvoorraad in Groningen

Het gebouw Badweg uit Tabel 1 wordt in hoofdstuk 4 gebruikt voor het afleiden van de seismische capaciteit voor de typologie METSELWERK7.

Hiervoor is het van belang te weten in hoeverre op geometrisch én op constructief niveau dit gebouw representatief is voor de Groningse gebouwvoorraad binnen de typologie METSELWERK7. In Bijlage B wordt aannemelijk gemaakt dat met betrekking tot de geometrische eigenschappen dit referentiegebouw representatief is voor de aanwezige gebouwvoorraad voor de typologie METSELWERK7. Echter de goothoogte van het gebouw Badweg is aan de lage kant met betrekking tot het gemiddelde. In hoofdstuk 4 en hoofdstuk 6 wordt nader ingegaan op de ligging van de seismische weerstand van dit gebouw ten opzichte van andere gebouwen in de typologie.

### 3.4 Uitgevoerde berekeningen en testresultaten

#### 3.4.1 Uitgevoerde berekeningen Arup

Berekeningen (NLTH) zijn uitgevoerd door Arup in LS-Dyna. Voor de modellering van het metselwerk heeft Arup een nieuw materiaalmodel ontwikkeld; de beschrijving en validatie daarvan is gerapporteerd in het ‘LS-DYNA Validation Booklet’ [Arup, 2016a]. Voor zowel in-het-vlak als uit-het-vlak gedrag van metselwerk wanden laat [Arup, 2016a] zien dat de modelmatig verkregen resultaten goed overeenstemmen met experimenteel verkregen resultaten. Om die reden wordt het gebruikte model door TNO als state-of-the-art gezien.

In de berekeningen van Arup is gebruik gemaakt van ten minste 8 aardbevings-signalen die als representatief worden beschouwd voor de mogelijk optredende aardbevingsbelasting. Voor verdere omschrijving van de gebruikte materiaaleigenschappen en uitgevoerde berekeningen wordt verwezen naar [Arup, 2017a] en [Arup, 2019a].

De berekeningen zijn uitgevoerd voor beide hoofddraagrichtingen van de constructie. Per hoofddraagrichting zijn voor de doorgerekende aardbevingssignalen de maximale verplaatsing ter plaatse van de zolderverdieping en de maximaal optredende dwarskracht ter hoogte van de begane grond vloer (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.

#### 3.4.2 Resultaten van de triltafeltesten Eucentre

Twee triltafeltesten zijn uitgevoerd aan een vrijstaand gebouw met steensmuur en met houten vloeren (typologie METSELWERK5), zie ook Figuur 3.

De resultaten van deze proeven worden gebruikt als validatie van de door de TU Delft uitgevoerde berekeningen, en later ook bij de beschrijving van METSELWERK5.

De eerste triltafeltest is uitgevoerd bij Eucentre [Eucentre, 2016]. Deze test leverde scheurvorming op van het testhuis, maar bij de maximale belasting die mogelijk is op de triltafel werd nog geen instorting geconstateerd. Om die reden is een aanvullend onderzoek uitgevoerd op de triltafel van LNEC [LNEC, 2018], waar tot bezwijken kon worden getest. De resultaten van deze laatste proeven zijn door Eucentre gebruikt voor het vaststellen van de kwetsbaarheidsfuncties voor vrijstaande metselwerk gebouwen met steens muren. Dit betreft de *vulnerability class URM6L* in [Crowley et al, 2019].

#### 3.4.3 NLTH berekeningen TU Delft

De NLTH berekeningen van de TU Delft ten behoeve van de variatiestudie zijn uitgevoerd in Diana; ook hier heeft kalibratie aan triltafeltesten plaatsgevonden. Voor de omschrijving van de uitgevoerde berekeningen wordt verwezen naar bijlage C, dit heeft betrekking op zowel in-het-vlak als uit-het-vlak gedrag.

Om te zorgen dat de gebruikte modellen als voldoende betrouwbaar en unbiased kunnen worden beschouwd voor alle relevante faalmechanismen (met name het in-het-vlak en uit-het-vlak gedrag van metselwerk wanden), heeft de TU Delft eerst de rekenmodellen gekalibreerd aan de hand van de resultaten van de triltafeltesten aan EUC-BUILD-2 en LNEC-BUILD-3 (zie Figuur 3). Deze testen zijn uitgevoerd aan gebouwen met steensmuren. Bij de kalibratie van de triltafelresultaten is door TU Delft ook rekening gehouden met de gebruikte afmetingen van de testgebouwen. In de triltafeltesten is de schaal van de werkelijke huizen aangepast omdat het triltafeloppervlak beperkt is. De TU Delft kiest ervoor om in haar rekenmodellen de schaal te hanteren zoals die op de triltafel is gebruikt. Het effect van het verschalen is door de TU Delft bestudeerd en gerapporteerd in bijlage F. Er is door de TU Delft geconcludeerd dat gebruik van de triltafeltesten en dus ook van het numerieke model een conservatieve benadering is voor de uit-het-vlak capaciteit van metselwerk wanden. Het is daarom gerechtvaardigd deze verschaling te gebruiken.

Na validatie van het rekenmodel zijn de steensmuren door de TU Delft vervangen door gemodelleerde spouwmuren. Hierbij is alleen het binnenblad gemodelleerd en is het buitenblad als massa toegevoegd, zie bijlage D. Dit is een conservatieve benadering voor het uit-het-vlak gedrag van het binnenspouwblad. De TU Delft heeft voor haar NLTH berekeningen als extra criterium gehanteerd om het gebouw als bezwiken te beschouwen zodra een wand uit-het-vlak een grenswaarde voor de verplaatsing overschrijdt. De gehanteerde grenswaarde is een gekalibreerde waarde gebaseerd op triltafeltesten op elementniveau, zie Bijlage C.

Op basis van de hier beschreven kalibraties is vastgesteld dat gebruik van de TU Delft studie leidt tot voldoende betrouwbare resultaten voor het afleiden van de kwetsbaarheidskromme.

Naar aanleiding van door ACVG gevraagde controles is door TU Delft een aanvullende NLTH studie uitgevoerd in Diana voor twee gebouwen: Damsterweg en Wirdumerweg 4, zie bijlage H.

Deze gebouwen zijn doorgerekend met 11 aardbevingssignalen met oplopende intensiteit. Per signaal is vastgelegd of sprake is van falen, waar dit plaatsvindt en welk faalmechanisme daar bij hoort.

### 3.5 Faalmechanismes van de berekende referentiegebouwen

De faalmechanismes die volgen uit de berekeningen van Arup zijn per *collapse state* (CS) samengevat in Tabel 3.

Deze *collapse states* zijn gedefinieerd in het hoofdrapport [TNO, 2021a].

Tabel 3: Gerapporteerde faalmechanismes per Collapse State (CS) voor de gebruikte gebouwen

Gebouw	CS1	CS2	CS3
<b>Kwelder</b>	OOP failure of part of gable wall	Internal partition wall failure at ground floor	Failure of top floor gable walls
<b>Badweg</b>	OOP failure of external gable wall leaf	OOP failure of external gable walls outer leaf, and part of longitudinal wall.	Global collapse: Full collapse of roof, chimneys and majority of outer leaf URM walls (OOP)

De belangrijkste observatie uit deze waarnemingen is dat uit het vlak falen (OOP) van metselwerk wanden (zowel gevels als binnenwanden) het dominante faalmechanisme is voor alle drie de *collapse states*.

De volgende waarnemingen zijn gerapporteerd over het falen van de constructie in de triltafeltesten:

*"The building specimen did not suffer any visible damage up to test SC2-150% (PGA = 0.21 g), began showing minor cracks for shaking under SC2-200% (PGA = 0.29 g), and was considered at near-collapse state after test SC2-400% (PGA = 0.68 g) when the West chimney collapsed, and the rest of the structure underwent substantial degradation. During test SC2-500% (PGA = 1.0 g), debris from the West chimney fell in the interior of the building and portions of the East and North façades displaced as rigid bodies by sliding."*

In het testrapport [LNEC, 2018] worden de waarnemingen gerelateerd aan zogeheten Damage Limit States (DL). DL-4 komt overeen met *collapse state* CS3. De *collapse states* CS1 en CS2 vallen onder DL-3.

	DL-3	DL-4
Failure mechanisms during the tests	Diagonal cracks and sliding in the North wall due to interaction with the East façade; permanent openings reached 5-7 mm. Fracture at the base of the South chimney stack. Cracks on the interior wall had residual widths of 1.5-2 mm.	Collapse of the West chimney above the roofline. Out-of-plane rigid-body mechanism of the West façade and sliding with residuals up to 35 mm. Permanent openings on the interior wall reached 8 mm.

## 4 Afleiding kwetsbaarheidsmodel en gevolgmodel voor METSELWERK7

Dit hoofdstuk geeft de achtergronden bij het gebruikte kwetsbaarheids- en gevolgmodel voor METSELWERK7. In het hoofdrapport [TNO, 2021a] is omschreven welke stappen worden doorlopen om deze modellen af te leiden.

Voor de bepaling van het kwetsbaarheidsmodel met een gebouw-tot-gebouw variatie binnen de typologie METSELWERK7 is het van belang te weten hoe de precieze opbouw van een gebouw binnen de grenzen van de definitie van METSELWERK7 kan variëren. Dit betreft de opbouw van de stabiliteitswanden, de gevels, verbindingen, materiaaleigenschappen, etcetera. De variatie in deze opbouw wordt in dit hoofdstuk vertaald naar de parameters voor de kwetsbaarheidscurve.

In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 4.1 eerst beschreven welke informatie beschikbaar is met betrekking tot het kwetsbaarheidsmodel, vervolgens wordt de voor de typologie te gebruiken mediaan in de kwetsbaarheidskromme afgeleid, in paragraaf 4.4 wordt de gebouw tot gebouw spreiding vastgesteld, in paragraaf 4.5 wordt ingegaan op de modelonzekerheid en in paragraaf 4.6 wordt het gevolgmodel besproken. In paragraaf 4.7 wordt kort aandacht besteed aan de extra marge die ACVG heeft geadviseerd voor de implementatie van de typologieaanpak voor de typologiegroep METSELWERK-C.

### 4.1 Beschikbare informatie voor het kwetsbaarheidsmodel

De volgende informatiebronnen zijn gebruikt in de afleiding van de kwetsbaarheidskrommen:

#### 1) Arup/Eucentre studie

Voor de typologie METSELWERK7 zijn berekeningsresultaten van Arup voor één referentiegebouw beschikbaar. Dit gebouw is in opdracht van NAM door Arup doorgerekend. Dit gebouw is door Arup aangeduid als Badweg 12, *vulnerability class URM8-L*, zie *Figuur 2*. De berekeningsresultaten van dit gebouw zijn door Eucentre gebruikt voor het afleiden van de zogenaamde *fragility curve*, ook wel kwetsbaarheidskromme genoemd, in achtereenvolgende versies van het *fragility and consequence model* [Crowley et al, 2017; Crowley et al, 2019].

#### 2) TU Delft studie

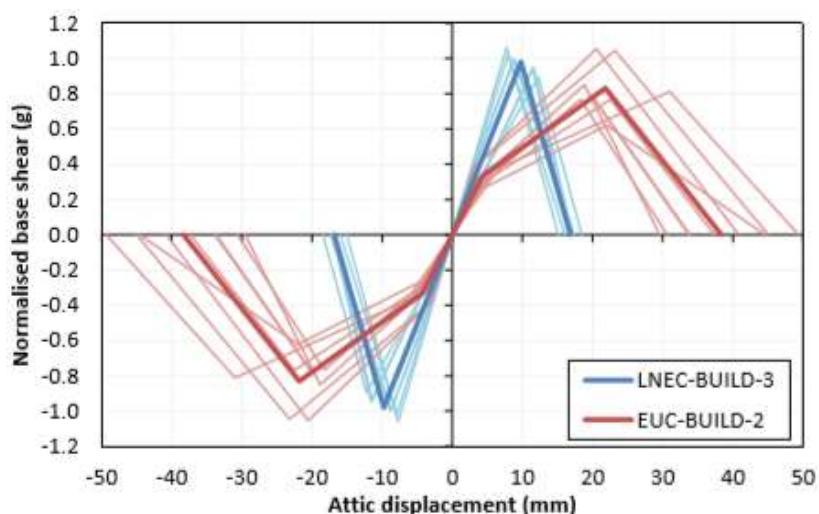
Door de TU Delft is een omvangrijke NLTH studie uitgevoerd aan 16 variaties van typische vrijstaande gebouwen. Deze is weergegeven in Bijlage C. De belangrijkste aspecten en conclusies uit deze studie zijn hieronder nader toegelicht. Op basis van deze gegevens worden conclusies getrokken met betrekking tot de aan te houden parameters in de kwetsbaarheidskrommen.

#### 4.2 Afleiding kwetsbaarheidsmodel voor het referentiegebouw voor METSELWERK7

In deze paragraaf wordt het kwetsbaarheidsmodel voor het referentiegebouw van METSELWERK7 afgeleid.

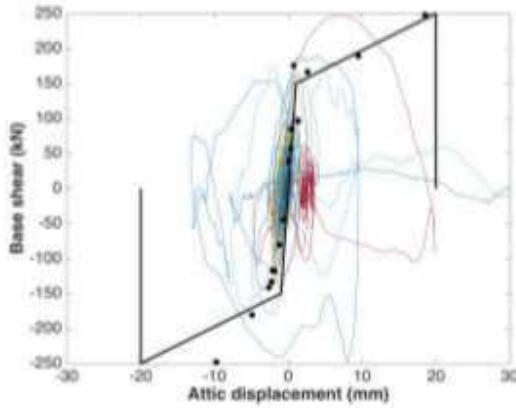
De door de TU Delft doorgerekende gebouwen betreffen 9 variaties op het EU-BUILD-2 gebouw en 7 variaties op het LNEC-BUILD-3 gebouw. De resultaten van de studie van de TU Delft hebben betrekking op *collapse state* CS3. Er zijn geen tussenresultaten gegenereerd voor de *collapse states* CS1 en CS2. In de uitgevoerde NLTH berekeningen is gebruik gemaakt van in totaal 7 aardbevingssignalen die als representatief worden beschouwd voor de mogelijk optredende aardbevingsbelasting. In overeenstemming met wat gevonden is in de Arup berekeningen [Arup, 2017a] vindt de TU Delft dat het maatgevende faalmechanisme voor alle referentiegebouwen het uit-het-vlak falen van wanden is.

Per hoofddraagrichting zijn (per gebouwvariatie) voor de doorgerekende aardbevingssignalen de maximale verplaatsing ter plaatse van de zolderverdieping en de maximaal optredende dwarskracht (base shear) ter hoogte van de begane grond vloer (net voor falen) gerapporteerd. In Figuur 5, overgenomen uit Bijlage C, zijn de resulterende *backbone curves* samengevat. Deze resultaten geven een grote spreiding in *base shear* (tussen 0,6 en 1,1 g) en *collapse displacement* (tussen 15 mm en 50 mm).



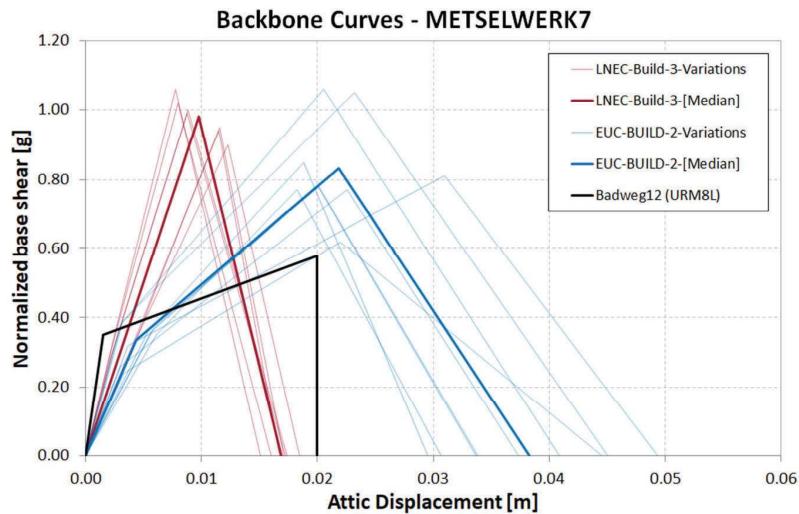
Figuur 5: *Backbone curves* uit de TU Delft variatiestudie uit Bijlage C, in lichtrood de 9 variaties op het EU-BUILD-2 gebouw, in lichtblauw de 7 variaties op het LNEC-BUILD-3 gebouw

In Figuur 6 is de afgeleide backbone curve weergegeven uit de in paragraaf 4.1 genoemde studie van Arup en Eucentre.



Figuur 6: Backbone curve van referentiegebouw Badweg 12, uit [Crowley et al, 2019]

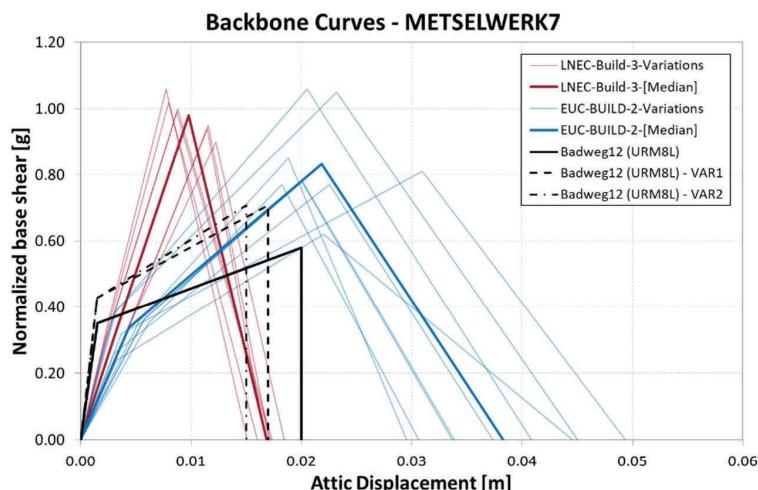
De studie van de TU Delft bevat vanwege de gebruikte variaties meerdere referentiegebouwen (9 variaties op het EU-BUILD-2 gebouw en 7 variaties op het LNEC-BUILD-3 gebouw). De bijbehorende backbone curves zijn in *Figuur 7* weergegeven, tezamen met de backbone curve van Eucentre voor Badweg 12 (afgeleid uit *Figuur 6*).



Figuur 7: Backbone curves uit de variatie studie van TU Delft (rode en blauwe lijnen), vergeleken met backbone curve van Eucentre voor Badweg 12 (zwarte lijn)

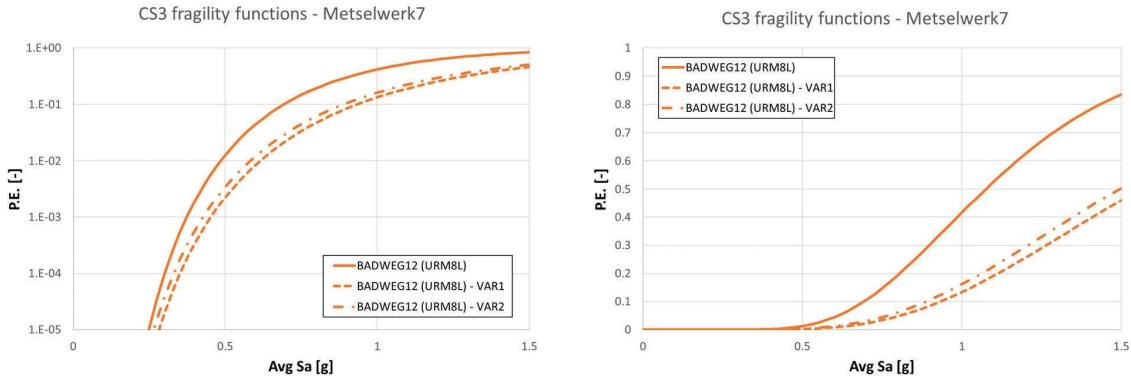
Uit *Figuur 7* volgt dat – ten opzichte van Badweg 12 – de TU Delft referentiegebouwen alle een hogere base-shear hebben. De variaties gebaseerd op EUC-BUILD-2 hebben een aanzienlijk grotere verplaatsingscapaciteit (gemiddeld 2 keer zo groot) en de variaties gebaseerd op LNEC-BUILD-3 een kleinere verplaatsingscapaciteit (circa 25% kleiner).

Ten opzichte van alle variaties doorgerekend door TU Delft, zou het Arup referentiegebouw (Badweg 12) een ondergrens kunnen zijn als de hogere base shear, die in de variatiestudie van de TU Delft is gevonden, voor de variaties op basis van LNEC-BUILD-3 opweegt tegen de iets lagere verplaatsingscapaciteit. Om het effect te onderzoeken van een voor Badweg 12 verlaagde ultimate (attic) displacement in combinatie met een kleine verhoging van de *base shear* wordt de backbone curve uit [Crowley, 2019] aangepast, zie de gestippelde lijnen in Figuur 8. De aanpassing is zo gedaan dat de verplaatsingscapaciteit (*ultimate attic displacement*) gelijk gekozen worden aan de mediane waarde dan wel de kleinste waarde van de LNEC-BUILD-3 variaties uit Figuur 7. Dit resulteert in twee backbone curves: VAR1 en VAR2. VAR1 betreft de backbone curve waarbij voor de verplaatsingscapaciteit de mediane waarde van de LNEC-BUILD-3 variaties is genomen, bij VAR2 wordt de kleinste waarde genomen. Voor VAR1 en VAR2 is ten behoeve van de gevoeligheidsstudie een licht verhoogde *base shear* waarde gekozen ten opzichte van Badweg12, zoals weergegeven in Figuur 7.



Figuur 8: Vergelijking variaties in backbone curves voor METSELWERK7

Beide gestippelde backbone curves VAR1 en VAR2 zijn gebruikt voor het fitten van een SDOF systeem. Beide SDOF systemen zijn vervolgens onderworpen aan de grondversnellingen voor het afleiden van de kwetsbaarheidskromme (voor de gehanteerde procedure wordt verwezen naar het hoofdrapport [TNO, 2021a]). Het resultaat is weergegeven in *Figuur 9*.



Figuur 9: Kwetsbaarheidskrommen voor de bestudeerde variaties en vergelijking met de kwetsbaarheidskromme voor Badweg 12. Linker figuur in logaritmische schaal t.b.v. vergelijking in linker staart van de verdeling.

De kwetsbaarheidskrommen met de hogere base shear en de lagere verplaatsings capaciteit (VAR1 en VAR2) liggen in *Figuur 9* meer naar rechts dan de door Eucentre afgeleide kwetsbaarheidskromme van Badweg 12 (getrokken lijn), en zijn daarmee gunstiger. Hieruit blijkt dat de afname van de verplaatsingscapaciteit (in VAR1 is de verplaatsingscapaciteit gelijk aan 0,015m en in VAR2 gelijk aan 0,017m) ruim gecompenseerd wordt door de toename van de *base shear* ten opzichte van de Eucentre kwetsbaarheidskromme voor Badweg 12. De variaties VAR1 en VAR2 zijn daardoor minder kwetsbaar dan Badweg 12.

Op basis van bovenstaande analyses wordt geconcludeerd dat:

- De studie van de TU Delft met 16 variaties van METSELWERK7 gebouwen weergeeft dat er sprake is van een grote spreiding in de seismische capaciteit binnen de typologie METSELWERK7.
- Het referentiegebouw zoals toegepast in [Crowley et al, 2019] een ongunstigere seismische capaciteit heeft dan elk van de door de TUD doorgerekende gebouwvariaties.

De kwetsbaarheidskromme voor het referentiegebouw Badweg 12 in [Crowley et al, 2019] wordt hierna gebruikt als basis voor de afleiding van de kwetsbaarheidskromme voor de typologie METSELWERK7. Dit wordt op basis van de uitgevoerde analyses als een veilige benadering beschouwd, omdat de backbone curve van Badweg 12 ongunstiger is dan de door de TU Delft doorgerekende 9 variaties op het EU-BUILD-2 gebouw en 7 variaties op het LNEC-BUILD-3 gebouw. In paragraaf 4.3 wordt ingegaan op de aanpassing van de mediane seismische capaciteit van deze kwetsbaarheidskromme en in paragrafen 4.4 en 4.5 wordt de kwetsbaarheidskromme (afgeleid op basis van Badweg 12) nog aangevuld met gebouw-tot-gebouw onzekerheid en modelonzekerheid.

#### 4.3 Mediane seismische capaciteit voor de typologie

Zoals vermeld in de vorige paragraaf wordt het referentiegebouw Badweg 12 gebruikt als basis voor de afleiding van de kwetsbaarheidskromme voor de typologie METSELWERK7.

Dit gebouw is binnen de typologie een zwak exemplaar, zie paragraaf 4.2. De werkelijke mediaan ligt op basis van de studies uit paragraaf 4.4 bij een hogere seismische capaciteit. Toch wordt gekozen voor het aanhouden van Badweg 12 als basis voor de mediane seismische capaciteit voor de hele typologie METSELWERK7.

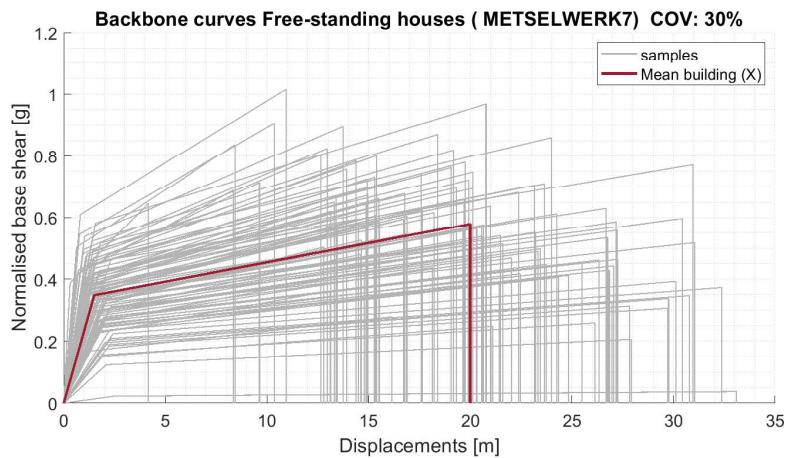
In het hoofdrapport [TNO, 2021a] is in bijlage C.4 op basis van MDOF variatie-studies een beschouwing gehouden over de mediane seismische capaciteit. Gebruik is gemaakt van beschikbare studies [Arup 2019d, e]. In deze studies zijn kwetsbaarheidskrommen afgeleid op basis van een volledige MDOF (NLTH) benadering waarbij voor de variaties een koppeling is gemaakt naar de Groningen Exposure Database. De beschouwingen in de genoemde bijlage C.4 leveren een aanpassing van de in de vorige paragraaf beschreven kwetsbaarheidskromme in de vorm van een verlaging van de mediane seismische capaciteit van 15%. De MDOF variatie studie betrof niet de typologie METSELWERK7, echter gegeven de waargenomen overeenkomst in faalmodes wordt de mediaanshift ook toegepast op de op Badweg 12 gebaseerde kwetsbaarheidskromme.

#### 4.4 Gebouw-tot-gebouw variatie voor de typologie

In het hoofdrapport [TNO, 2021a] is in bijlage C.4 op basis van MDOF variatie-studies een beschouwing gehouden over de gebouw-tot-gebouw variatie van metselwerk gebouwen. De in deze bijlage beschouwde gebouwen betreffen niet METSELWERK 7 gebouwen, echter er is sprake van overeenkomst in waargenomen faalmodes zoals uit-het-vlak falen.

Om deze reden wordt ook voor METSELWERK 7 een gebouw-tot-gebouw variatie van  $\sigma_{BB}=0,30$  voorgesteld. In combinatie met de conservatieve keuze voor de mediaan (zie paragraaf 4.3) dekt dit in voldoende mate de spreiding binnen de typologie.

In Figuur 10 is voor een spreiding van 30% rondom de backbone curve van Badweg 12 weergegeven welke spreiding in backbone curves verwacht mag worden binnen de typologie. Opgemerkt wordt dat een spreiding van 30% rondom de backbone curves niet hetzelfde is als het gebruik van  $\sigma_{BB} =0,30$  in de kwetsbaarheidskromme (zie ook Bijlage C2 in het hoofdrapport). Onderstaande figuur dient daarom slechts voor het verwerven van inzicht.



Figuur 10: Spreiding van 30% rondom backbone curve van Badweg 12.

#### 4.5 Modelonzekerheid

De in Figuur 8 weergegeven backbone curve voor Badweg 12 (deze bevat gecombineerd in-het-vlak en uit-het-vlak falen van wanden) is gebruikt voor het bepalen van de invloed van de signaal-tot-signaal variatie van het referentiegebouw aan de hand van een één massa-veer-systeem berekening. Dit is een zekere mate van versimpeling, echter het draaien van vele duizenden NLTH's voor dit doel zou te veel tijd vergen.

Het effect van deze versimpeling is opgenomen in de modelonzekerheid. De waarde voor de modelonzekerheid  $\beta_m$  volgt uit de waarden voor  $\beta_c$  en  $\beta_q$  zoals in het hoofdrapport toegelicht en wordt geïmplementeerd via een 'logic tree' zoals toegelicht in het hoofdrapport [TNO, 2021a].

Er is gekozen om voor  $\beta_q$  (voor definitie zie het hoofdrapport [TNO, 2021a], bijlage D), voor METSELWERK7, een waarde  $\beta_q=0,25$  te gebruiken, omdat het SDOF model niet als 'superior' conform de FEMA terminologie [FEMA, 2012] kan worden gezien. Voor  $\beta_c$  wordt de waarde 0,25 aangehouden, conform bijlage D van het hoofdrapport [TNO, 2021a].

De modelonzekerheid wordt verwerkt in een 'logic tree' met 3 takken: 'lower', 'middle' en 'upper'. Dit leidt tot de waarden van  $b_{0lower}$  en  $b_{0upper}$  in onderstaande tabel. Voor achtergronden hierbij en de betekenis van deze parameters zie bijlage C.3 van het hoofdrapport [TNO, 2021a].

Tabel 4: Parameters voor de modelonzekerheid van METSELWERK7

Parameters	METSELWERK7
$b_{0lower}$	-4,35521
$b_{0middle}$	-3,74971
$b_{0upper}$	-3,14421
Modelonzekerheid $\beta_m$	0,35

De waarden voor  $b_{0\text{lower}}$  en  $b_{0\text{upper}}$  zijn verkregen door toepassing van de modelonzekerheid op de in paragraaf 4.2 tot en met 4.4 afgeleide kwetsbaarheids-kromme met de parameter  $b_{0\text{middle}}$ .

#### 4.6 Gevolgmodellering

Voor de gevolgmodellering wordt het model gebruikt zoals beschreven in bijlage D van het hoofdrapport [TNO, 2020a]. Voor de parameterwaarden worden de waarden gebruikt zoals weergegeven in [Crowley et al, 2019] voor URM8L (met als referentiegebouw Badweg 12), omdat dit de basis is voor de kwetsbaarheidscurve voor METSELWERK7.

Zowel in de TU Delft studie, als in de triltafeltesten, als in de NLTH berekeningen van de referentiegebouwen treedt er geen CS1 of CS2 schade op voordat het gebouw compleet instort (CS3). Daar waar in Tabel 3 sprake is van CS1 of CS2 schade betreft dit het naar buiten instorten van buitenspouwbladen, welke geacht worden een verwaarloosbare invloed te hebben op het individueel risico voor personen binnen. Daarom wordt voor de risicoberekening voor binnen slechts gewerkt met de bijdrage van CS3 aan het totale overlijdensrisico.

In [Crowley et al, 2019] 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.

In Tabel 5 zijn de door TNO gebruikte parameters van het gevolgmodel gegeven. zoals toegepast als meest waarschijnlijke schatting voor alle *collapse states*, dit leidt tot de waarden van de overlijdenskansen zoals deze op de 'middle' branch van het gevolgmodel zijn gebruikt. Voor de 'lower' en 'upper' branch wordt verwezen naar het hoofdrapport [TNO, 2021a].

Tabel 5: Parameters voor het gevolgmodel van METSELWERK7

Parameters	METSELWERK7
Pd_inside CS1	0,0
Pd_inside CS2	0,0
Pd_inside CS3	0,42
Pd_outside CS1	0,06
Pd_outside CS2	0,1
Pd_outside CS3	0,25

#### 4.7 Marge ACVG advies

ACVG heeft in de brief aan de ministers van EZK en BZK zijn beoordeling gegeven van de door TNO uitgevoerde berekeningen voor de typologieën [ACVG, 2021]. Naar aanleiding van deze beoordeling stelt ACVG voor om bij de implementatie van de typologieaanpak een extra marge toe te passen door de kwetsbaarheidskromme te verschuiven ten opzichte van de door TNO afgeleide krommes. Tevens is voor METSELWERK7 aangegeven dat een hogere waarde voor de gebouw-tot-gebouwvariatie moet worden gehanteerd. Hiermee wordt eveneens een extra veiligheidsmarge ingebouwd. Het resultaat van deze marges is een aanpassing van de waarden voor de parameters  $b_0$  en  $\sigma_s$  in de beschrijving van de kwetsbaarheidskromme. De resulterende waarden zijn in het volgende hoofdstuk in tabel 6 gepresenteerd.

## 5 Sterkteparameters in de TNO modelketenberekening voor METSELWERK7

In dit hoofdstuk wordt op basis van de overwegingen gemaakt in hoofdstuk 4 het overzicht gegeven van de voor METSELWERK7 in rekening te brengen parameters voor het kwetsbaarheids- en gevolgmodel in de berekening met de TNO modelketen.

Tabel 6 toont de parameters voor het kwetsbaarheidsmodel en gevolgmodel zoals gebruikt voor het genereren van de vlekkenkaarten voor METSELWERK7. Hoe deze parameters toegepast worden is beschreven in het hoofdrapport [TNO, 2021a].

In de laatste kolom van Tabel 6 is weergegeven welke de parameterwaarden zijn nadat de voorgestelde marge van ACVG zoals beschreven in paragraaf 4.7 is toegepast. De door het ACVG voorgestelde shift leidt tot een aanpassing van de waarden voor de parameters  $b_0$  en  $\sigma_s$  zoals weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Overzicht van invoerparameters in de TNO modelketenberekening voor METSELWERK7

Parameters	METSELWERK7	METSELWERK7 (met ACVG marge)
$b_{0\text{lower}}$	-4,35521	-4,0856
$b_{0\text{middle}}$	-3,74971	-3,4801
$b_{0\text{upper}}$	-3,14421	-2,8746
$b_1$	2,0366	2,0366
$\sigma_s$	0,688	0,7376
DL_CS1	0,002 m	0,002 m
DL_CS2	0,002 m	0,002 m
DL_CS3	0,020 m	0,020 m
Modelonzekerheid $\beta_m$	0,35	0,35
Pd_inside CS1	0,0	0,0
Pd_inside CS2	0,0	0,0
Pd_inside CS3	0,42	0,42
Pd_outside CS1	0,06	0,06
Pd_outside CS2	0,1	0,1
Pd_outside CS3	0,25	0,25

## 6 Typologieën METSELWERK5 en METSELWERK6

Voor de uitwerking van de vlekkenkaarten behorende bij de typologieën wordt gebruik gemaakt van beschikbare, gekalibreerde, niet-lineaire tijddomein berekeningen (NLTH, *non linear time history*) waarin alle relevante mechanismen zijn beschreven. Dit geldt ook voor vrijstaande gebouwen van typologie METSELWERK5 en METSELWERK6, omdat voor deze gebouwen het uit-het-vlak gedrag van metselwerk wanden als relevant wordt beschouwd voor het beschrijven van het instorten. In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde studies samengevat en wordt geadviseerd over de wijze van beoordeling van deze twee typologieën.

### 6.1 Invloed van steens muren (METSELWERK5)

De invloed van steensmuren in plaats van spouwmuren is bestudeerd ter vergelijking van METSELWERK5 met METSELWERK7.

Door de TU Delft is het LNEC-BUILD-3 gebouw (zie figuur 3) met steensmuren in een NLTH berekening belast door de serie aardbevingssignalen. Deze studie is gerapporteerd in bijlage D. Conclusie van deze studie is dat voor het geval van steensmuren de uit-het-vlak verplaatsingen van de metselwerk wanden zeer klein zijn en ver afliegen van het criterium voor bezwijken. Ook andere bezwijkmechanismen treden niet op als gevolg van de opgelegde aardbevings-signalen.

Conclusie uit bijlage D is dat onder geen van de gebruikte aardbevingssignalen het gebouw bezwijkt. Dit is vooral te danken aan het feit dat steens muren een significant grotere seismische capaciteit hebben dan de slanke spouwmuren. In [Crowley et al, 2019] is op basis van de LNEC triltafeltest [LNEC, 2018] een *fragility curve* afgeleid voor vrijstaande gebouwen met steens muren en houten vloeren (URM6L). Deze blijkt aanzienlijk gunstiger te zijn dan die van vrijstaande gebouwen met spouwmuren (URM7L en URM8L).

Op basis van zowel de TU Delft studie als de studie van [Crowley et al, 2019] wordt geconcludeerd dat METSELWERK5 een veel gunstigere seismische weerstand heeft dan METSELWERK7.

### 6.2 Invloed van materiaal verdiepingsvloer (METSELWERK6)

De invloed van een betonnen vloer van de tweede bouwlaag in plaats van een houten vloer is bestudeerd ter vergelijking van METSELWERK6 met METSELWERK7.

Door de TU Delft is voor één bestudeerd gebouw uit de typologie METSELWERK7 de houten vloer van de tweede bouwlaag vervangen door een betonnen vloer waarna de NLTH berekeningen zijn herhaald. Deze studie is gerapporteerd in bijlage E. Conclusie van deze studie is dat voor het model met een betonnen vloer de uit-het-vlak verplaatsingen van de metselwerk wanden voor alle opgelegde tijdsignalen kleiner zijn dan voor het model met een houten vloer. Hieruit volgt dat het gebruik van betonnen vloeren voor deze casus een gunstiger seismisch gedrag oplevert.

Dit komt doordat het maatgevende mechanisme het uit-het-vlak bezwijken van metselwerk wanden is en bij een betonnen vloer de uit-het-vlak verplaatsingen kleiner blijken te zijn.

TNO acht het op basis van de hierboven genoemde berekening redelijk te veronderstellen dat deze conclusie algemeen toepasbaar is voor de typologie METSELWERK6 ten opzichte van METSELWERK7. De typologie METSELWERK6 heeft een hogere seismische weerstand dan METSELWERK7.

In [Crowley et al, 2019] is op basis van het doorgerekende referentiegebouw Kwelder 8 (zie *Figuur 2*) een kwetsbaarheidskromme afgeleid. Door het toepassen van de gebouw-tot-gebouw variatie is een kwetsbaarheidskromme voor vrijstaande gebouwen met spouwmuren en betonnen vloeren opgesteld (kwetsbaarheidsklasse URM7L). Deze kwetsbaarheidskromme blijkt gunstiger te zijn dan die voor de vrijstaande gebouwen met houten vloeren (URM8L). Dit verschil komt (in elk geval in kwalitatieve zin) overeen met de bevindingen van de TU Delft zoals hierboven beschreven.

Op basis van zowel de uitgevoerde analyses door TU Delft als de resultaten die door [Crowley et al, 2019] zijn gegeven wordt geconcludeerd dat METSELWERK6 een gunstiger seismische weerstand heeft dan METSELWERK7.

### 6.3 Beoordeling van METSELWERK5 en METSELWERK6

Naar aanleiding van de conclusies uit paragrafen 6.1 en 6.2 wordt geconcludeerd dat de typologieën METSELWERK5 en METSELWERK6 beiden een gunstiger seismisch gedrag hebben dan METSELWERK7. Voorgesteld wordt om de hele typologiegroep METSELWERK-C te beoordelen aan de hand van de vlekkenkaart van METSELWERK7. Op basis hiervan kunnen alle gebouwen dit aan deze typologiegroep zijn toegedeeld en die buiten de vlek vallen als veilig worden aangemerkt. Voor de gebouwen binnen de vlek moet worden nagegaan of en in hoeverre versterkingsmaatregelen nodig zijn.

## 7 Controles

De resultaten van de door TNO en TU Delft uitgevoerde analyses van beschikbare en aanvullende berekeningen leveren het sterktemodel op dat in de vorm van kwetsbaarheidskrommen en keuzes voor de modelonzekerheid in de TNO modellenketen is geïmplementeerd.

ACVG heeft in haar advies van november 2020 gevraagd een aantal controles uit te voeren [ACVG, 2020]. Dit betreft de volgende punten:

- Toon aan dat de aannames en interpretaties bij NLTH-berekeningen voldoende onderbouwd zijn.
- Toon aan dat de modellering van de gebouw-tot-gebouwvariabiliteit past bij de Groningse realiteit.
- Toon aan dat een uitgebreidere opname geen wezenlijke invloed heeft op het beoordelingsresultaat.
- Toon aan dat uit-het-vlak bezwijken correct is meegenomen in versimpelde (SDOF) modellen.

Voor een nadere toelichting op deze vier punten wordt naar het ACVG advies van november 2020 verwezen. Hieronder wordt kort beschreven welke controles voor METSELWERK7 zijn uitgevoerd. Deze controles zijn in bijlage G bij dit rapport uitgewerkt.

### 7.1 NLTH berekeningen

Met betrekking tot de NLTH berekeningen is langs twee wegen invulling gegeven aan de gevraagde onderbouwing.

Als eerste is in het hoofdrapport in Bijlage B.2 een uitgebreide beschrijving gegeven van de aannames en interpretaties bij de NLTH berekeningen. Daarbij zijn deze tevens vergeleken en afgestemd met de aanpak zoals deze gevuld is binnen NEN NPR 9998 module 3.

Als tweede zijn de resultaten van de typologie aanpak (onder de marge van ACVG) vergeleken met de uitkomsten van twee typen NLTH berekeningen (uitgevoerd met DIANA en LS Dyna) aan één individueel gebouw uit de typologie METSELWERK7 zoals deze in het kader van NEN Module 3 [NEN, 2020] zijn geanalyseerd. Het voordeel van het gebruik van deze analyses is dat er binnen de NEN Module 3 afstemming heeft plaatsgevonden tussen de betrokken ingenieursbureaus over de te volgen werkwijze. De uitkomsten bevatten daarom redelijkkerwijs de state-of-the-art kennis op dit gebied.

De analyse van de resultaten laat zien dat voor de doorgerekende gebouwen de typologie aanpak voor METSELWERK7 strenger is dan de maatgevende uitkomst van verschillende NLTH analyses uitgevoerd door verschillende ingenieursbureaus met verschillende EEM pakketten conform de NPR 9998:2020.

Het strenger zijn van de typologie-aanpak ligt in de lijn der verwachting omdat de typologie-aanpak veilig moet zijn voor alle gebouwen binnen een typologie.

## 7.2 Gebouw tot gebouw variabiliteit

Voor de keuzes met betrekking tot mediaan en spreiding in de kwetsbaarheidskromme wordt gerefereerd aan hoofdstuk 4 en bijlage C.4 van het hoofdrapport [TNO, 2021a]. Op basis van de beschikbare informatie acht TNO het aannemelijk dat de resulterende kwetsbaarheidskromme een adequate beschrijving is van de seismische capaciteit van de Groningse gebouwenvoorraad binnen de typologie METSELWERK7.

## 7.3 Uitgebreidere opname

Om aan te tonen dat een uitgebreidere opname geen wezenlijke invloed heeft op het beoordelingsresultaat is een check uitgevoerd met de vier referentiegebouwen van METSELWERK1, die met elkaar de spreiding binnen deze typologie afdekken. Dit is beschreven in [TNO, 2021c] Geconcludeerd is dat de kans beperkt is dat een METSELWERK1-pand dat *voldoende veilig* wordt verklaard op grond van de typologiebenadering, *onvoldoende veilig* zou worden verklaard als er meer gegevens over het betreffende pand zouden worden ingewonnen en meegenomen in de risicoberekening. Omdat gewerkt wordt met een vergelijkbare aanpak in de ontwikkeling voor METSELWERK7 lijkt het niet onredelijk om deze conclusie ook voor METSELWERK7 te trekken.

## 7.4 Uit het vlak falen

Het uit-het-vlak bezwijken van metselwerk wanden in gebouwen kan in NLTH-berekeningen worden nagegaan aan de hand van twee verschillende toetswijzen (zie NPR 9998, Annex F):

- Directe toets (ook wel genoemd: expliciete methode). Bij deze toets bepaalt het aan experimenten gekalibreerde FEM rekenprogramma of de desbetreffende wand op basis van uit-het-vlak bezweken is.
- Indirecte toets. Bij deze toets wordt het bezwijken van een wand bepaald door het overschrijden van bepaald criterium voor de grootste verplaatsing van de wand uit-het-vlak.

TNO acht het noodzakelijk dat voor het berekenen van het overlijdensrisico de voortschrijdende instorting moet kunnen zijn gemodelleerd, omdat deze vertaald moet worden naar 3 *collapse states* (CS1, CS2 en CS3). Hiervoor is het nodig dat na lokaal uit het vlak bezwijken de FEM analyse voorgezet wordt zonder de gefaalde onderdelen met een aangepast krachtsverdeling, dit totdat globaal instorten wordt waargenomen. Dit is in de state of the art softwareberekeningen zoals vandaag de dag beschikbaar slechts mogelijk bij het expliciet modelleren van uit-het-vlak falen. Dit expliciet faalgedrag is gekalibreerd aan dynamische (tritafel) experimenten en door TNO voorzien van een modelonzekerheid voor het FEM model en een modelonzekerheid voor de imperfecties, scheefstanden en andere afwijkingen.

Bij het overschrijden van een indirecte toets kan moeilijk worden vastgesteld welke *collapse state* optreedt en kan voortgaande instorting niet worden beschouwd. Daarom kan een indirecte toets niet direct gebruikt worden voor de bepaling van het overlijdensrisico. De indirecte toets is daarom vooral geschikt om inzicht te verkrijgen in de expliciete toets.

TU Delft gebruikt voor de controleberekeningen een indirecte toets met een criterium van 100 % van de wanddikte (in de regel 100 mm), dit op basis van validatie aan van beschikbare experimenten.

Naar aanleiding hiervan heeft ACVG aan TNO aanvullend de vraag gesteld wat de invloed is van een kleinere waarde van het criterium bij de indirecte toets, 60% van wanddikte.

In dat kader zijn voor METSELWERK7 twee aanvullende NLTH analyses uitgevoerd. Deze berekening is beschreven in bijlage G en betreft de gebouwen Wirdumerweg 4 en Damsterweg 37 (zie ook Figuur 4). In bijlage G wordt aangetoond:

- Gebruik van het referentiegebouw Badweg 12 voor METSELWERK7 is ook ten opzichte van de Wirdumerweg 4 en Damsterweg 37 gebouwen een conservatieve keuze wat betreft de mediane seismische capaciteit. Op basis van de additionele NLTH's kan worden bevestigd dat de werkelijke mediane capaciteit hoger zal zijn dan die bepaald op basis van Badweg 12.
- De invloed van de getalswaarde van de indirecte toets voor uit-het-vlak falen heeft een relatief beperkte invloed. Bij het meest conservatief gekozen criterium (60mm) is de resulterende seismische capaciteit nog steeds groter dan die zoals aangehouden in hoofdstuk 4 voor Badweg 12.

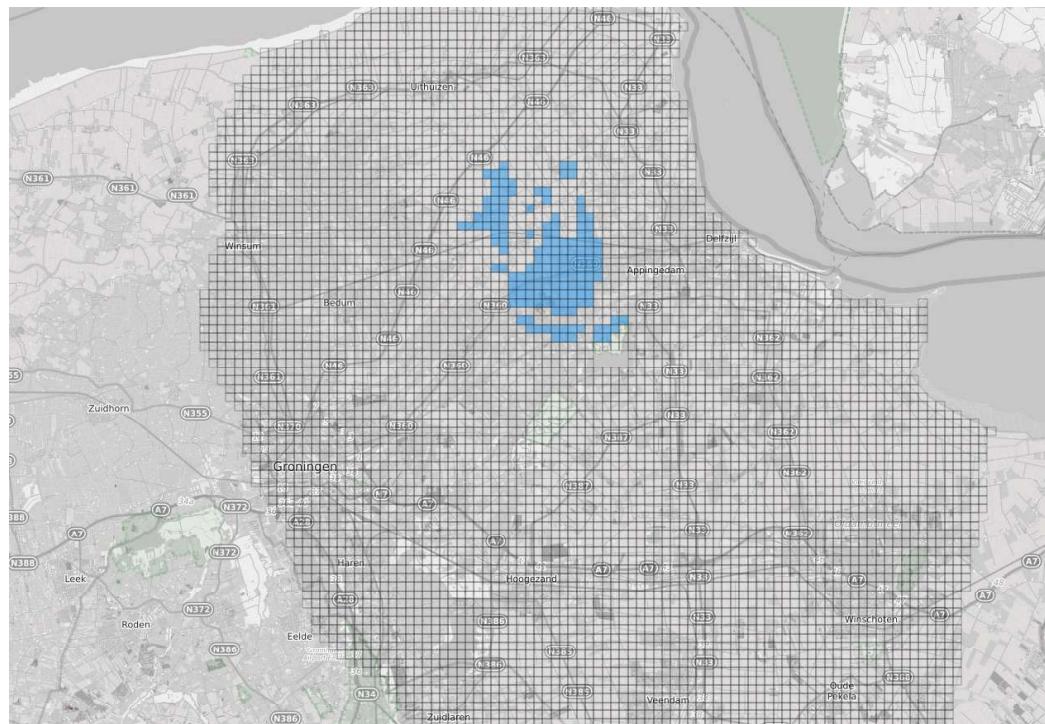
Er kan daarom gesteld worden dat het gebruik van Badweg 12 nog steeds conservatief is ook bij gebruik van een conservatieve waarde voor de uit-het-vlak verplaatsingscapaciteit.

Samenvattend is het gebruik van referentiegebouw Badweg 12 conservatief zowel ten opzichte van de 16 door de TU Delft doorgerekende gebouwvariaties op basis van triltafeltesten (zie Bijlage C) als ten opzichte van 2 doorgerekende Groningse gebouwen (zie Bijlage G). Daarmee zal de werkelijke mediaan in de kwetsbaarheidskromme naar verwachting hoger liggen dan berekend op basis van Badweg 12.

## 8 Vlekkenkaart voor METSELWERK7

Met de in Tabel 6 gegeven waarden voor de parameters voor de sterkte is met de TNO modelketen, op basis van de in [TNO, 2021a] gegeven instellingen, de vlekkenkaart voor de typologie METSELWERK7 bepaald.

De resulterende kaart is hieronder weergegeven. Voor meer achtergrond bij de totstandkoming van de vlekkenkaarten wordt verwezen naar het hoofdrapport [TNO, 2021a].



Figuur 11: Vlekkenkaart voor subtypologie METSELWERK7 voor kalenderjaar 2020

Met blauw zijn de gridcellen ingekleurd waar gebouwen van typologie METSELWERK7 niet voldoen aan de Meiijdam norm. Voor deze gebouwen moet worden nagegaan of en in hoeverre versterkingsmaatregelen nodig zijn.

Toepassing van bovenstaande vlekkenkaart voor METSELWERK5 en METSELWERK6 is een veilige keuze. De gebouwen uit deze typologieën buiten de blauwe vlek zijn voldoende veilig, en voor de gebouwen binnen de vlek geldt dat nagegaan moet worden of en in hoeverre versterkingsmaatregelen noodzakelijk zijn.

## 9 Referenties

- [ACVG, 2020]  
Advies Typologieaanpak, 17 november 2020, ACVG kenmerk 202011-01
- [ACVG, 2021]  
Beoordeling aanvullingen TNO op typologieaanpak, 27 mei 2021, ACVG kenmerk 202105-01
- [Arup, 2016a]  
Validation Booklet, 2016
- [Arup 2016b]  
Arup, "Exposure Database V3".
- [Arup, 2017a]  
Typology Modelling: Analysis Results in Support of Fragility Functions – 2017 Batch Results, November 2017
- [Arup, 2017b]  
Arup, "Exposure Database: V3 Post-analysis report", January 2017.
- [Arup, 2017c]  
Arup, "Groningen Earthquakes Structural Upgrading: Data Documentation Exposure Database Version 5", November 2017.
- [Arup, 2019a]  
Typology Modelling: Analysis Results in Support of Fragility Functions – 2018-2019 Batch Results, June 2019
- [Arup, 2019b]  
Exposure Database V7 Data Documentation, June 2019
- [Arup, 2019c]  
Arup, "Exposure Database V7: Data Documentation, Technical Report and Exposure Model", December 2019
- [Arup, 2019d]  
Typology Modelling - Typology Modelling Explicit MDOF Validation of Fragility Functions - URM3L - URM4L, 2019
- [Arup, 2019e]  
Typology Modelling: Explicit MDOF Validation of Fragility Functions – Update, December 2019
- [Arup, 2020]  
NPR9998: 2018 Module 1: Micro NLTH analysis input for Tier 2 method, Draft 18 september 2020,

[Brzev et al, 2013]

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

[Crowley et al, 2015]

Helen Crowley, Rui Pinho, Barbara Polidoro and Peter Stafford, "Development of v2 Partial Collapse Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. November 2015.

[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

[Eucentre, 2016]

Graziotti, F., Tomassetti, U., Rossi, A., Marchesi, B., Kallioras, S., Mandriola, M., Fragomeli, A., Mellia, E., Peloso, S., Cuppari, F., Guerrini, G., Penna, A., Magenes, G., "Shaking table tests on a full-scale clay-brick masonry house representative of the Groningen building stock and related characterization tests", *Technical Report EUC128/2016U*, EUCENTRE, Pavia, Italy, 2016  
Available at [www.eucentre.it/namproject](http://www.eucentre.it/namproject).

[LNEC, 2018]

Kallioras S, Correia AA, Marques AI, Bernardo V, Candeias PX, Graziotti F., *LNEC-BUILD-3: An incremental shake-table test on a Dutch URM detached house with chimneys*, EUCENTRE Technical Report EUC203/2018U, Eucentre, Pavia, Italy, 2018, Available at [www.eucentre.it/nam-project](http://www.eucentre.it/nam-project).

[Meijdam, 2015]

Eindadvies Handelingsperspectief voor Groningen, Commissie Meijdam, December 2015

[NEN Module 3, 2020]

NEN Module 3 end conclusions. Concept version v02, Arup, BORG, TU Delft (8 - 12-2020).

[TNO, 2021a]

Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Achtergrond bij de methode, TNO Rapport 2020 R10628A, 2021

[TNO, 2021b]

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

[TNO, 2021c]

Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen  
– Uitwerking van typologie METSELWERK1, TNO Rapport 2021 R10699A: TNO,  
2021

## 10 Ondertekening

Delft, 3 september 2021

TNO



Ir.ing. M. Steins  
Project Manager



Dr. P.C. Rasker  
Research Manager Structural Reliability

## A Vergelijking met berekeningen uitgevoerd in kader van ontwikkeling NPR 9998

In deze bijlage worden de resultaten van de typologie aanpak vergeleken met berekeningsresultaten zoals deze verkregen zijn binnen de NEN Werkgroep bij de ontwikkeling van NPR 9998:2020. Dit betreft de uitkomsten van de berekeningen van vier gebouwen zoals deze in het kader van NEN Module 3 [NEN Module 3, 2020] zijn geanalyseerd en berekeningen die gebruikt zijn voor de kalibratie van Annex H bij de NPR 9998:2020 [Arup, 2020]. Binnen de NEN Module 3 heeft afstemming plaatsgevonden tussen de betrokken ingenieursbureaus over de te volgen werkwijze. De uitkomsten bevatten daarom de state-of-the-art kennis op dit gebied.

Bijlage A.1 beschouwt NLTH berekeningen voor een gebouw met oplopende niveaus van de bodemversnelling, voor het verkrijgen van inzicht in lokaal uit-het-vlak bezwijken en globaal bezwijken. Deze berekeningen zijn voor NEN NPR Module 3 uitgevoerd door de verschillende ingenieursbureaus.

### A.1 Controle met NLTH berekeningen volgens NPR 9998:2020

Binnen NEN Module 3 zijn door ingenieursbureaus gedetailleerde NLTH berekeningen gemaakt voor een gebouwtype Detached A gebouw (naamgeving conform [NEN Module 3, 2020]). Dit gebouw valt in de typologie METSELWERK7. In totaal zijn twee berekeningen beschikbaar, deze zijn hieronder weergegeven:

Gebouw	LS-DYNA indirect	DIANA indirect
Detached A	x	x

De analyses nemen zowel in-het-vlak falen als uit-het-vlak falen van wanden mee. De analyses zijn uitgevoerd gebruik makend van 2 verschillende software pakketten beide gebruikmakend van de indirecte check (in-het-vlak én uit-het-vlak) middels grenzen aan de vervormingen. In NEN Module 3 zijn de tijdsignalen op de twee modellen toegepast met een schaalfactor; zo is bepaald vanaf welke PGA de gebouwen niet meer voldoen. Onderstaande tabel toont deze PGA waarden voor de twee beschouwde NLTH analyses.

Gebouw	Max. PGA [g]	
	LS-DYNA indirect	DIANA indirect
Detached A	0.355	0.350

De berekeningen in [NEN Module 3, 2020] zijn gemaakt op basis van het NPR Webtool 2018 spectrum. Als de capaciteit uitgedrukt in PGA wordt vergeleken met de PGA conform de Webtool, periode t1, dan kan in een kaart zichtbaar gemaakt worden waar de capaciteit van het gebouw groter is dan de belasting volgens de Webtool, ofwel waar het gebouw wel of niet veilig genoeg is. Deze kaart kan dan vergeleken worden met de typologie METSELWERK7 vlekkenkaart.

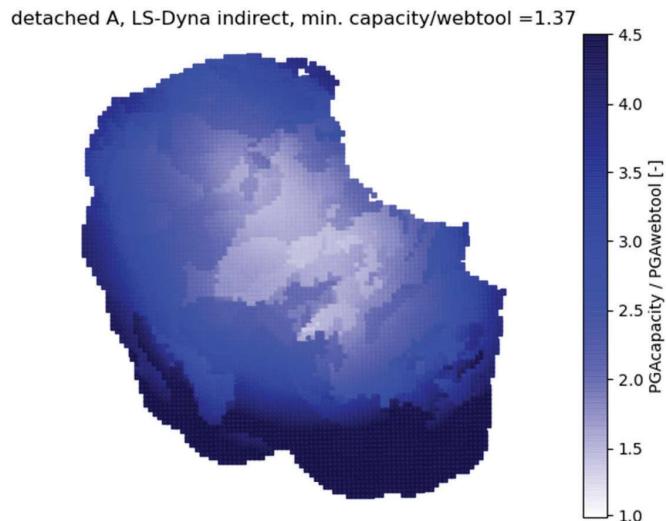
Tabel A.1.1 laat de verhouding zien tussen de capaciteit van het gebouw uitgedrukt in PGA en de belasting in PGA uit de NEN Webtool voor de twee NLTH berekeningen, voor het geval dat dit gebouw op alle mogelijke locaties in Groningen worden bekeken. Als deze verhouding groter is dan 1, dan voldoet het gebouw. Het gebouw met een capaciteit zoals hierboven besproken wordt als het ware getoetst voor alle gridpunten in de NPR Webtool. De kleinste verhouding in het veld is weergegeven in onderstaande tabel samen met de kleinste, gemiddelde en grootste verhouding tussen capaciteit en belasting binnen de typologie vlek.

Tabel A.1.1 laat zien dat het gebouwtype detached A in beide berekeningen op alle locaties in Groningen volgens de NPR veilig is.

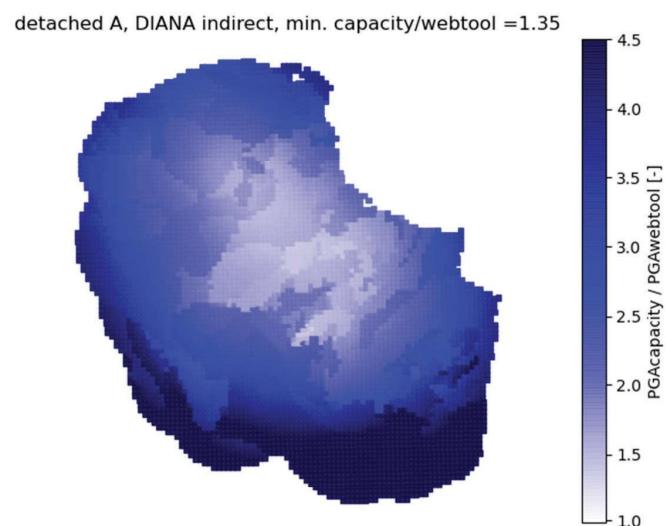
*Tabel A.1.1. Resultaten voor de twee simulaties van gebouwtype Detached A uit [NEN Module 3, 2020] in relatie tot de typologie vlekkenkaarten van juni 2020. De resultaten zijn uitgedrukt in termen van verhouding tussen de capaciteit PGA uit de simulaties en de PGA voor t1 uit de NPR Webtool. Is de verhouding hoger dan 1 dan is het beschouwde gebouw veilig. Is de verhouding kleiner dan 1, dan is versterking nodig. De laagste verhouding in het hele veld is weergegeven in de eerste kolom. De daarop volgende kolommen geven de laagste, gemiddelde en hoogste verhouding van de gridpunten weer die corresponderen met de typologie vlekkenkaarten. Dit geeft een beeld van de marges binnen de typologievlek voor die specifieke NLTH berekening. De getallen in Tabel A.1.1 kunnen gezien worden als capacity/demand (C/D) waarden.*

Gebouw simulatie	Minimum verhouding PGA capaciteit/PGA webtool	Minimum verhouding in typologie vlek	Gemiddelde verhouding in typologie vlek	Maximum verhouding in typologie vlek
A detached LS-DYNA indirect	1.37	1.39	1.42	1.48
A detached DIANA indirect	1.35	1.37	1.40	1.45

In de hierna volgende figuren is de verhouding tussen de capaciteit uitgedrukt in PGA en de belasting in PGA voor periode t1 uit de NPR Webtool 2018, weergegeven voor de twee simulaties. Dit betreft de verhoudingen zoals in Tabel A.1.1 maar dan weergegeven voor heel Groningen. Hoe hoger de verhouding, hoe meer marge en hoe dieper het blauw.



*Figuur A.1.1. Kaart voor gebouwtype detached A, NLTH berekening LS-Dyna indirect. In blauw de verhouding tussen PGA capaciteit en PGA in de NPR Webtool voor t1, alle cellen voldoen aan de NPR, de minimum verhouding PGA capaciteit/PGA webtool is 1.37.*

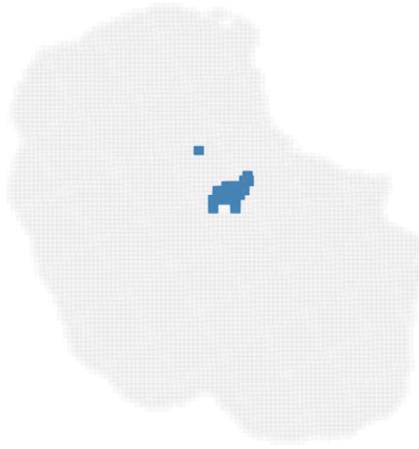


*Figuur A.1.2. Kaart voor gebouwtype detached A, NLTH berekening DIANA indirect. In blauw de verhouding tussen PGA capaciteit en PGA in de NPR Webtool voor t1, alle cellen voldoen aan de NPR, de minimum verhouding PGA capaciteit/PGA webtool is 1.35.*

In de hiervoor getoonde kaartjes is te zien dat het gebouw detached A overal voldoet aan de NPR9998:2018 voor beide berekeningen. De veilige marge zal bij gebruik van de NPR Webtool 2020, periode t5 vanwege de latere dreiging ten opzichte van periode t1 uit de NPR webtool 2018 groter zijn zodat deze gebouwen overal zeer ruim zullen voldoen (voor alle mechanisms, inclusief uit-het-vlak falen van wanden).

De kaarten (Figuur A.1.1-A1.2) kunnen worden vergeleken met de typologie-vlekkenkaart voor METSELWERK7. Hier wordt opgemerkt dat de hiervoor beschreven NLTH [NEN Module 3, 2020] resultaten gebaseerd zijn op periode t1 van de NPR webtool (het spectrum van de 2018 webtool versie). Dit correspondeert niet met de vlekkenkaart in hoofdstuk 8 van dit rapport die voor periode t5 afgeleid is. Om de vergelijking te kunnen maken is daarom een vergelijkbare kaart geconstrueerd op basis van de parameters van de kwetsbaarheids-kromme voor METSELWERK7 beschreven in dit rapport zonder Marge van ACVG, gecombineerd met een seismische dreiging volgens dezelfde uitgangspunten als periode t1 in de 2018 NPR webtool (gasproductie, seismologisch model, bodembewegingsmodel). Figuur A.1.3 toont deze typologie vlekkenkaart voor de corresponderende typologie METSELWERK7. In deze vlekkenkaart voldoen de gebouwen van de betreffende typologie binnen de vlek niet aan de Meijdamnorm en buiten de vlek wel.

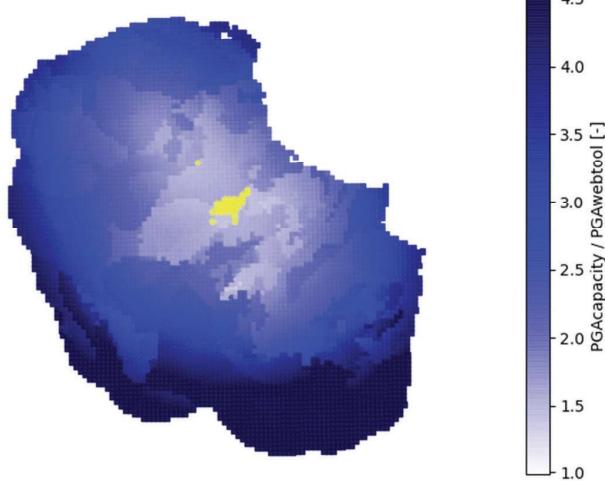
METSELWERK7,t1, max LPR=1.38e-05, no.cells>1e-5=31



Figuur A.1.3. Vlekkenkaart voor typologie METSELWERK7, periode t1, met in blauw cellen die boven de Meijdam-norm uitkomen.

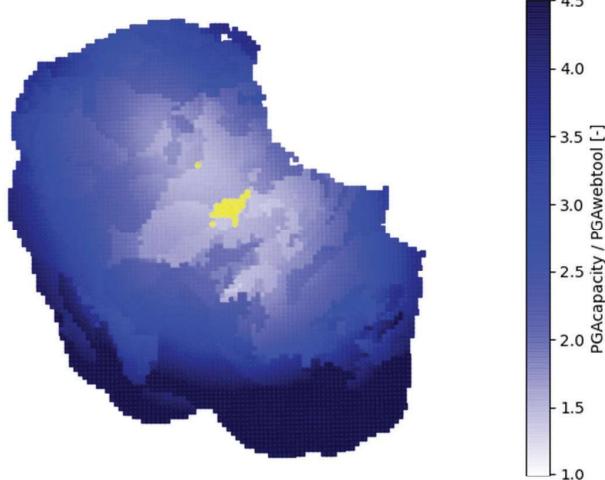
In onderstaande figuren is de typologie METSELWERK7 vlekkenkaart voor periode t1 in lichtgeel weergegeven op de kaarten voor de twee NLTHA simulaties als voorheen.

detached A, LS-Dyna indirect



Figuur A.1.4. Kaart voor gebouwtype detached A, NLTH berekening LS-Dyna indirect. In blauw de verhouding tussen PGA capaciteit en PGA in de NPR webtool voor t1, alle cellen voldoen aan de NPR, de minimum verhouding PGA capaciteit/PGA webtool is 1.37. In geel de vlekkenkaart voor typologie METSELWERK7.

detached A, DIANA indirect



Figuur A.1.5. Kaart voor gebouwtype detached A, NLTH berekening DIANA indirect. In blauw de verhouding tussen PGA capaciteit en PGA in de NPR webtool voor t1, alle cellen voldoen aan de NPR, de minimum verhouding PGA capaciteit/PGA webtool is 1.35. In geel de vlekkenkaart voor typologie METSELWERK7.

Uit de hiervoor getoonde combinatieplots volgt dat de typologie aanpak voor METSELWERK7 nog resulteert in een vlek met mogelijk te versterken gebouwen, terwijl de NEN Module 3 berekeningen van gebouw A (behorend tot die typologie) leiden tot in ruime mate voldoen. De mate van voldoen hangt iets af van het gebruikte softwarepakket, er lijkt echter niet veel spreiding tussen de pakketten te zijn.

## B Ligging referentiegebouwen in Groningse gebouwenpopulatie

### B.1 Inleiding

In deze bijlage wordt toegelicht welke overwegingen ten grondslag hebben gelegen aan de keuze van de referentiegebouwen, zodanig dat deze zo goed mogelijk aansluiten bij de gebouwen die voorkomen in de Groningse gebouwenvoorraad. Het vervolg van deze bijlage is in het Engels.

### B.2 General methodology

For every typology, the risk calculation by the TNO model chain combines the hazard resulting from seismic activity with a fragility and consequence model, which describe, respectively, the vulnerability of the building stock to given hazard, and the exposure of the people to risk. In the risk calculation different limit state conditions are used to calculate the individual risk of dying for a person who is continuously present within or near a building and who is unprotected. The fragility functions describe the probability of exceeding a given limit state condition of a certain building for the intensity measure of the ground motion. This fragility function includes the mean response for a certain ground motion intensity as well as the record-to-record variability for different signals of the same intensity. Additional to the record-to-record variability, the building-to-building variability and model uncertainty (both due to lack of accurate information and limited accuracy of the models) are accounted for separately.

The fragility functions adopted in the typology approach and the sensitivity study follow from the approach outlined in the main TNO report [TNO, 2021a].

The structural behaviour is simulated using accurate non-linear time-history analyses (NLTH) on a multi-degree-of-freedom (MDOF) model of the structure (which represents the median building of the typology) subjected to 11 ground motion records.

The choices that led to the definition of the index buildings were based on a study of the building stock performed by Arup, which developed and updated an exposure database (EDB) in [Arup 2016b, Arup 2017a, 2019b and 2019c]. The EDB contains the location, structural characteristics and exposed population (inside and outside) of over 250,000 buildings inside and within 5km of the Groningen gas field. The EDB study makes use of numerous building data sources, including physical and desktop inspection data, open and licensed data related to the geometry, function and building construction attributes per building, and additional processed building data.

In particular, the EDB employs the available data to assign to each building so-called GEM taxonomy strings summarizing the main features. Backgrounds on these GEM taxonomy strings can be found in [Brzev et al, 2013]. The attributes that are included in the GEM string are outlined in Table B.1

The information available from the exposure database allows to:

- Cluster the Groningen building stock into typologies.
- For each typology, extract the distribution and median values of the building properties, as a basis to define a median building within each typology.

*Table B.1 Attributes included in the GEM taxonomy string for the Exposure database [Arup 2019c]*

Parameter	Description
Structural layout	Classification of Buildings according to their main geometric features (characteristic width and length of the maximum enclosed rectangle within a Building ID's footprint and the average height of a Building IDs).
Structural materials and Lateral load-resisting system	The structural system and material that provides lateral resistance against horizontal loads. This is specified for the primary and secondary direction of the building.
Presence of external walls	Presence of cavity walls
Floor material	Material that constitutes the majority of the floors in the building
Number of storeys	Range of number of storeys above ground
Presence of irregularities	Presence of vertical structural irregularity (e.g. large opening at ground floor level, presence of a garage at the ground floor or a soft storey)

Using the available data, Arup clustered the building stock into typologies characterized for the rest of the buildings. A structural system inference was applied to determine the likelihood of each building belonging to one of the defined structural systems.

#### **Representativeness of the selected index (median) buildings**

The index (or median) building of a given typology is a building for which the structural and geometrical properties and strength can be considered the median of the considered typology.

The selection of index buildings for fragility development builds on a series of reports on the fragility and consequence models, starting from [Crowley et al, 2015]. In par. 3.8 of this document, also referred to as V2 fragility and consequence model: “*index buildings are assumed to represent the median capacity of a given building typology. The validity of this assumption for the URM buildings in particular should be studied during the development of the v3 fragility functions, and structural drawings for a number of index buildings of each typology are currently being collected for this purpose.*”

The representativeness of the index buildings in [Crowley et al, 2015] for the respective typologies was investigated by Arup in [Arup 2017b]. For this purpose building properties related to geometry and year of construction were selected (see Table B.2). In the study, Arup selected some of the macro-typologies of interest and extracted for those the distribution of the selected building characteristics using 300 samples from EDB V3 [Arup 2016b]. The macro-typologies concern buildings with the same category use as described in [Crowley et al, 2015] but characterized by different structural systems. Finally, the distributions of the characteristics are compared to those obtained from the index buildings for the corresponding typologies.

*Table B.2 Properties investigated in the representativeness study of [Arup 2017b].*

Parameter	Description
Building year	The building year provided by BAG
Building Height	Height of the highest point of a building's geometry from the ground level (excl. chimneys)
Volume	The enclosed volume within the building envelope
Façade Area	Sum of areas of all vertical surfaces of the building envelope. In terraced buildings and older apartments, this can refer includes also the interfaces between adjacent units.
Gutter Height	The distance of the lengthiest linear horizontal roof-wall connection to the ground level.
Footprint area	Area of the building's outline polygon (e.g. as provided by BAG).
Presence of Gable Walls	Presence/Absence of gable walls
Shape in Plan	Shape type of a building's footprint (Rectangular, L-shaped, S-T-U shaped and complex).
Presence of Extensions	Presence/Absence of extensions extension(i.e. a flat roof extension of the main building geometry, possibly built at a later stage than the building's initial construction).

The index buildings investigated in the Arup study are presented in Table B.3.

*Table B.3 Index buildings and corresponding typologies in the Typology approach investigated in [Arup 2016c].*

Index building	Typology
Nieuwstraat 8	Not used in [Crowley et al. 2020]
Kwelder 1	METSELWERK6
Type C	Not used in [Crowley et al. 2020]
Zijlvest 25	METSELWERK2
Julianalaan 52	METSELWERK1
Schuitenzand flat	METSELWERK8
Koeriersterweg 18	METSELWERK9
De Haver	METSELWERK9

The study concludes that the index buildings are reasonably fitting with the distribution of the typologies. However METSELWERK7 with Badweg 12 is not investigated in the study from Table B.3. It should be noted that the main structural (and dynamic) properties are already considered in the GEM taxonomy string, which includes the lateral load resisting system and the floor material. Since the exposure database doesn't provide information on more structural details (such as connection type) for the entire building stock, those cannot be investigated for representativeness.

Another study on the representativeness of the index buildings (with now also Badweg 12) is presented in Appendix B of [Crowley et al. 2017], where the distributions of construction year, footprint area, gutter height for each of the typologies identified in [Crowley et al. 2017] were computed from the EDB V5 [Arup2017c]. This distribution can be compared to the properties of the corresponding index buildings provided in [Crowley et al. 2017] and reported in Figure B.1. The characteristic ranges for the aforementioned properties are also provided in Figure B.2.

Index Building Name	Year of Construction	Structural Layout	Gutter Height (m)	Footprint area ( $m^2$ )
Precast RC post and beam	N/A	WBW	6.5	1880
Precast RC wall-slab-wall	N/A	UBH	5.52	44 per unit
Cast-in-place RC post and beam	N/A	WBW	6.5	1880
Cast-in-place RC wall-slab-wall	N/A	UBH	5.56	44 per unit
De Haver	1900's	WBH	2.9 (house) 3.7 (barn)	194 (house), 1530 (barn)
Solwerderstraat 55	<1945	UBA	6.1	113
Julianalaan 52	1950's	UBH	5.4	45 per unit
Type C	1970's	UBH	2.8	70 per unit
Zijlvest 25	1976	UBH	5.5	53 per unit
Koeriersterweg 20-21	TBD	UBH	8.59	50 per unit
Nieuwstraat 8	1940s	UH	3.0	70
Kwelder 1	TBD	UH	2.75	98
Schuitenzandflat 2-56	TBD	BTN	13.8	720
Badweg 12	1940's	UH	2.8	67
Kwelder 8	TBD	UH	2.75	76
Steenweg 19	2005	WBW	6.5	432
Glulam portal frame	N/A	WBW	4.0	460
Beneluxweg 15	2001	WBW	3.8	300

*Figure B.1 Characteristics of the index buildings selected in [Crowley et al. 2017].*

Structural System	Year of Construction	Structural Layout	Gutter Height (m)	Footprint Area (m <sup>2</sup> )
CR+PC/LPB/CR+PC/LPB/EWN/FN/HBET:1,2	1980-1999	WBW	3.1-4	>300
CR+PC/LWAL/CR+PC/LN/EWN/FC/HBET:1,2	1980-1999	UBH	5.1-6	51-100
CR+CIP/LPB/CR+CIP/LPB/EWN/FN/HBET:1,2	1960-1979	WBW	3.1-4	>300
CR+CIP/LWAL/CR+CIP/LN/EWN/FC/HBET:1,2	1960-1979	UBH	5.1-6	51-100
MUR/LH/MUR/LH/EWN/FW/HBET:1,2	<1900	WBH	3.1-4	>300
MUR/LWAL/MUR/LN/EWN/FW/HBET:1,2	1920-1939	UBH	4.1-5	51-100
MUR/LWAL/MUR/LN/EW/FC/HBET:1,2	1960-1979	UBH	5.1-6	51-100
MUR/LWAL/MUR/LN/EW/FC/HBET:1,2	1960-1979	UBH	5.1-6	51-100
MUR/LWAL/MUR/LN/EW/FC/HBET:1,2/IRIR+IRVP:CHV	1960-1979	UBH	5.1-6	51-100
MUR/LWAL/MUR/LN/EW/FC/HBET:3,20	1960-1979	UBH	8.1-9	51-100
MUR/LWAL/MUR/LN/EW/FW/HBET:1,2	1920-1939	UH	3.1-4	51-100
MUR/LWAL/MUR/LWAL/EW/FC/HBET:1,2	1980-1999	UH	4.1-5	101-150
MUR/LWAL/MUR/LWAL/EW/FC/HBET:3,20	1960-1979	BTN	>11	151-200
MUR/LWAL/MUR/LWAL/EW/FW/HBET:1,2	1920-1939	UH	3.1-4	101-150
W/LWAL/W/LWAL/EW/FW/HBET:1,2	1980-1999	UH	4.1-5	101-150
S/LFM/S/LFM/EWN/FC/HBET:1,2	1980-1999	UH	3.1-4	101-150
S/LFBR/W/LPB/EWN/FN/HBET:1,2	1980-1999	WBW	3.1-4	>300
S/LFBR/S/LPB/EWN/FN/HBET:1,2	1960-1979	WBW	3.1-4	>300

Figure B.2 Ranges of buildings characteristics of the typologies selected in [Crowley et al. 2015].

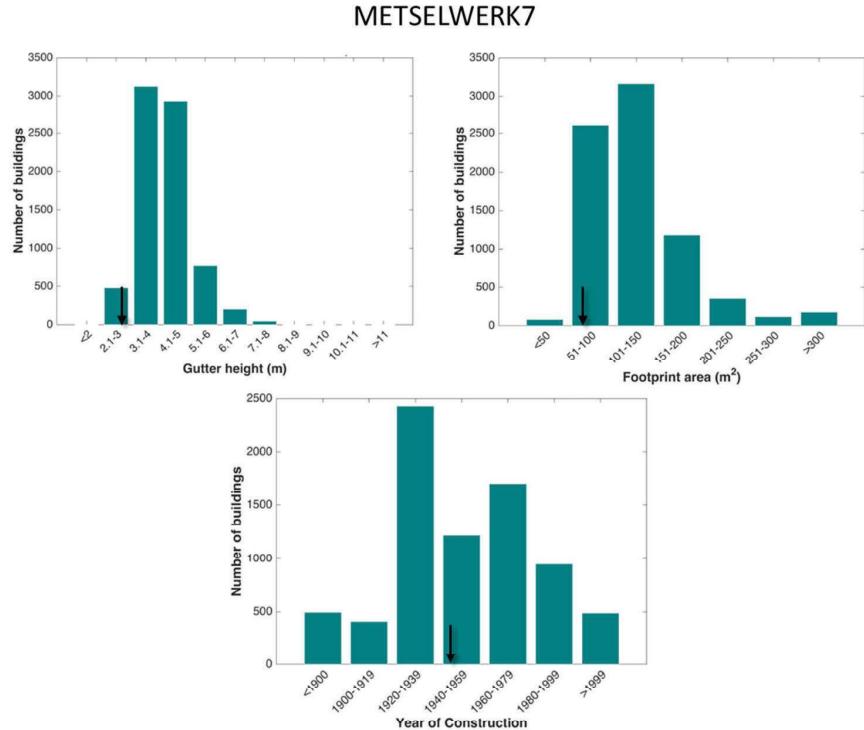
An updated version of Figure B.1 can be found in [Crowley et al. 2020], which expands on the previous number of index buildings. This is provided in Figure B.3.

Index Building Name	Vulnerability Class	Year of Construction	Geometric Layout	Gutter Height (m)	Footprint area (m <sup>2</sup> )
Cast-in-place RC post and beam	RC2	N/A	W	6.5	1880
Precast RC post and beam	PC2	N/A	W	6.5	1880
CIP RC wall-slab-wall	RC3L	N/A	U	5.56	44 per unit
Welhaak	PC3L	1979	U	5.4	66 per unit
Adamistraat	PC3L	1979	U	2.85	90 per unit
De Haver barn	W1	1900's	W	3.7	1530
Kwelder 8	W3	1996	U	2.75	76
Steenweg 19	SIL	2005	W	6.5	432
Beneluxweg 15	S3	2001	W	3.8	300
De Haver barn	URM1F_B	1900's	WC	3.7	1530
De Haver house	URM1F_HC			2.9	194
Molenweg 25 barn	URM1F_B	1877	WC	2.49	140
Molenweg 25 house	URM1F_HC			3.16	243
Molenweg 29 barn	URM1F_B	1958	WA	2.85	443
Molenweg 29 house	URM1F_HA			2.65	95
Eestumerweg 51 barn	URM1F_B	1960	WA	2.1	220
Eestumerweg 51 house	URM1F_HA			2.75	69
Solwerderstraat 55	URM2L	<1945	U	6.1	113
Julianalaan 52	URM3L	1950's	U	5.4	45 per unit
E45 Schildwolde	URM3L	1971	U	6.17	59 per unit
Wilgenbroos	URM3L	1963	U	5.35	47 per unit
Oostergoweg	URM3L	1961	U	5.25	59 per unit
Koeriersterweg	URM3M_U	1941	U	8.59	50 per unit
Drive in	URM3M_D	1972	U	8.1	47 per unit
Schuitenzandflat 2-56	URM3M_B	1964	B	13.8	720
Zijlvest 25	URM4L	1976	U	5.5	53 per unit
E45 Delfzijl	URM4L	1966	U	5.35	61 per unit
Patrimoniumstraat	URM5L	1940's	U	2.85	39 per unit
Kwelder 1	URM/L	1996	U	2.75	98
Badweg 12	URM8L	1940's	U	2.8	67
Dijkstraat (building A)	URM9L	<1945	U	7.5	170

Figure B.3 Characteristics of the index buildings selected in [Crowley et al. 2020].

### B.3 Choice of index building for METSELWERK7

Figure B.4 presents the distribution of the properties of METSELWERK7 as defined in [Crowley et al. 2015] and obtained from the V5 exposure database [Arup 2017c]. In the figures, the properties of the index building (from Figure B.3) are indicated by arrows.



*Figure B.4 Distribution of gutter height, footprint area and construction year of the buildings within METSELWERK7 adapted from [Crowley et al. 2015] and obtained from the EDB V5, [Arup 2017c]. The black arrows represent the index buildings provided in [Crowley et al. 2020] within the typology.*

### B.4 Conclusions

To establish fragility functions and compute a risk using a typology based approach, the building stock is divided into typologies and, for each typology, median buildings are selected as representative examples. The clustering process of the buildings is documented in the so-called exposure database (EDB) [Arup 2017c, 2019b and 2019c] which also provides the distribution of the relevant properties of the buildings in each typology.

The representativeness of the selected median buildings was investigated for a different version of the fragility and consequence model developed by Eucentre, by comparing geometric properties and construction years of the index buildings to the distribution of the typology they represent (obtained from the EDB). The properties of the index buildings are reasonably representative of the respective typologies. Moreover, most of the relevant structural properties are already accounted for in the typology classification.

## C Modellering gebouwen METSELWERK7

Messali, F., Longo, M., Singla, A., (2021). A numerical investigation of building typology 'Metselwerk 7'. Delft University of Technology. Report number 03, Version 02 (final), 04 June 2021

Project	Typology – B2B variability
Report number	03
Internal Reference	B2B-R03
Date	June 4, 2021
Version	02
Status	Final

## A NUMERICAL INVESTIGATION OF BUILDING TYPOLOGY ‘METSELWERK 7’

*A quick, safe and validated typology based seismic assessment of buildings*

Client: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)

Authors  
Francesco Messali  
[F.Messali@tudelft.nl](mailto:F.Messali@tudelft.nl)  
Michele Longo  
[M.Longo@tudelft.nl](mailto:M.Longo@tudelft.nl)  
Anmol Singla  
[A.Singla@tudelft.nl](mailto:A.Singla@tudelft.nl)

Address  
Delft University of Technology  
Faculty of Civil Engineering and Geosciences  
Stevinweg 1, 2628 CN, Delft

		<b>Report</b>	
 Faculty of Civil Engineering and Geosciences Stevinweg 1 2628 CN Delft PO 5048 2600 GA Delft <a href="http://www.citg.tudelft.nl">www.citg.tudelft.nl</a>		<i>Title:</i> A numerical investigation of building typology 'Metselwerk 7'	
<i>Author(s):</i> Francesco Messali Michele Longo Anmol Singla		<i>Date:</i> 04/06/2021	
<i>Client(s):</i> Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)		<i>Version:</i> 02	<i>Status:</i> Final
<i>Project number:</i> TC19/20	<i>Project name:</i> A quick, safe and validated typology based seismic assessment of buildings		<i>File reference:</i> B2B-R03
<i>Cite as:</i> Messali, F., Longo, M., Singla, A., (2020). A numerical investigation of building typology 'Metselwerk 7'. Delft University of Technology. Report number 03, Version 02 (final), 04 June 2021.			

**Copyright statement**

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of TU Delft.

**Liability statement**

TU Delft and those who have contributed to this publication did exercise the greatest care in putting together this publication. However, the possibility should not be excluded that it contains errors and imperfections. Any use of this publication and data from it is entirely on the own responsibility of the user. For everybody who has contributed to this publication, TU Delft disclaims any liability for damage that could result from the use of this publication and data from it, unless the damage results from malice or gross negligence on the part of TU Delft and/or those who have contributed to this publication.

## Table of Contents

1	Introduction .....	4
2	Reference buildings and variations .....	5
2.1	Reference buildings .....	5
2.2	Variations and ground motions .....	7
3	Methodology .....	10
4	Results .....	13
4.1	EUC-BUILD-2 .....	13
4.2	LNEC-BUILD-3.....	17
4.3	All variations .....	20
5	Conclusions.....	23
	References.....	24
	Appendix A – Ground motions.....	25
	Appendix B – Material properties .....	27
	Appendix C – hysteretic and backbone curves for NLTHA of EUC-BUILD-2 .....	28
	Appendix D – Hysteretic curves for NLTHA of LNEC-BUILD-3 .....	34
	Appendix E – Comparison NLTHA of EUC-BUILD-2 of model with and without point interfaces .....	39
	Appendix F – Comparison NLTHA of LNEC-BUILD-3 of model with and without point interfaces.....	43

## 1 Introduction

The work described in the current document is part of the task B.4 performed for the project "A quick, safe and validated typology based seismic assessment of buildings", as defined in the Plan of Approach [1]. This task aims at the definition of validated force-displacement curves for buildings belonging to specific typologies. When the cyclic dynamic behaviour of the building is analysed, the backbone curve of the force-displacement relation is considered.

The work presented in this document focuses on the typology 'Metselwerk 7', that corresponds to one- and two-storey detached houses, with cavity unreinforced masonry (URM) walls, timber floor and roof structure. This description corresponds to a large extent to that of the typology URM8L as defined in the v7 report of the Hazard and Risk study produced by EUCENTRE for NAM [2].

Since this typology is characterized by large variations of the buildings in terms of geometry, several variants of two different reference buildings are considered in this study. The buildings considered as reference are EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3, which were tested in dynamic conditions on shake tables at the laboratory of EUCENTRE (Pavia, Italy) and LNEC (Lisbon, Portugal), respectively. A short description of the reference buildings is provided in Section 2 and more details can be found in the testing reports [3][4]. With respect to the two reference buildings, cavity walls made by solid clay bricks are considered in place of double-wythe solid clay brick URM walls. Sensitivity studies are carried out by changing consistently a number of relevant parameters:

1. Floor shape (rectangular vs L-shape);
2. Number and length of the piers on a façade of the building;
3. Masonry material properties (walls);
4. Timber material properties (floor and roof).

Variations 1 and 2 affect also the torsional behaviour of the structure, since they modify the distance between the centre of masses and centre of stiffness of the structure. Number and characteristics of the variations are described in detail in Section 2.2.

Since the seismic behaviour of the building is governed by the out-of-plane failure of the walls, nonlinear time history (NLTH) analyses are carried out, following the methodology described in Section 3.

The results of the numerical simulations are presented in Section 4 and the conclusions in Section 5.

## 2 Reference buildings and variations

### 2.1 Reference buildings

As introduced in Section 1, the study presented in this report refers to two different reference buildings, considered as starting models, and variations in terms of geometry and material properties are then introduced in order to capture the high variability between detached houses. A description of the two original case studies is presented in the next sub-sections.

#### 2.1.1 EUC-BUILD-2

The first case study refers to a specimen tested on a shake table at the laboratory of EUCENTRE (Pavia, Italy) and named EUC-BUILD-2. The specimen was designed to resemble a typical one-storey detached house with a pitched roof (Figure 1). The house is composed of a first-floor timber diaphragm and of a pitched timber roof finished with clay tiles. The timber floor and roof framing members are supported by double-wythe solid clay URM walls. A gable is present on the front (north) and back (south) façade, as shown in Figure 2. More details about the considered specimen are provided in the testing report [3].



Figure 1: Buildings with construction details similar to those adopted for the shake-table test specimen (from [3]), and actual specimen tested at the laboratory of EUCENTRE (from [5]).

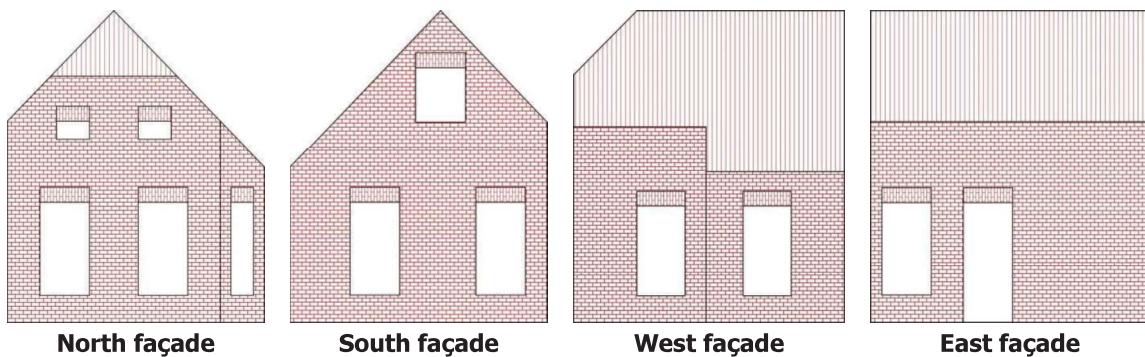


Figure 2: Layout of the façades of reference building EUC-BUILD-2, as studied in the current work.

### 2.1.2 LNEC-BUILD-3

Similarly to the first reference case, the second case study considers a specimen, named LNEC-BUILD3, which was tested on a shake table at the laboratory facilities of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, Lisbon, Portugal). Also this specimen was built to resemble a typical pre-1940 Dutch detached house in the Groningen area (Figure 3). As shown in Figure 4, the specimen is composed of a high symmetrical gambrel roof finished with clay tiles; a vertical chimney is found on the west façade. The east and the west walls extend above the timber floor in gables, weakly connected to the floor and the roof framing. The load-bearing structural system consists of 208 mm thick double-wythe solid clay URM walls in three out of the four perimeter walls. A 100 mm thick interior wall runs parallel to the shaking direction, longwise the centreline of the building plan. The east façade consists of single wythe wall with 10 cm thickness.

More details about the considered specimen are provided in the testing report [4].



Figure 3: Building views, a) North-East view, b) South-East view (from [4]).

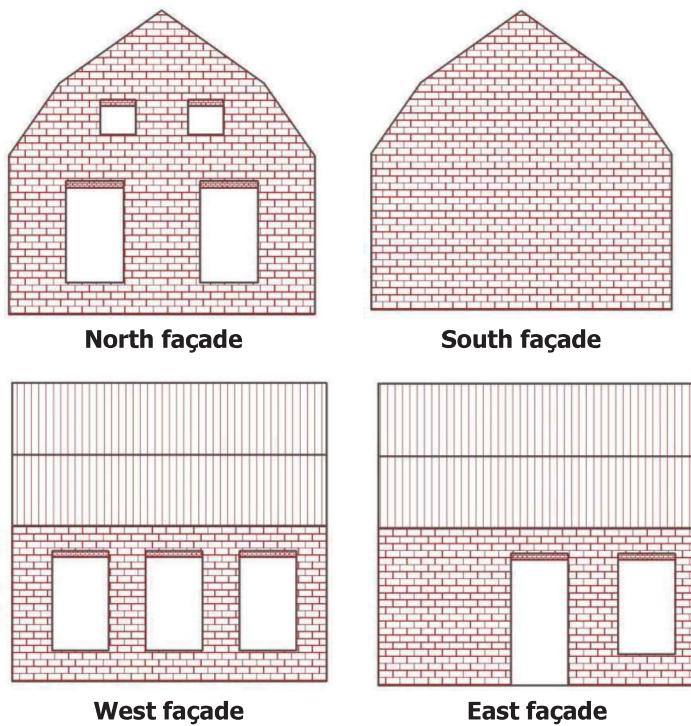


Figure 4: Layout of the façades of reference building LNEC-BUILD-3, as studied in the current work

## 2.2 Variations and ground motions

For all the variations, cavity walls made of solid clay bricks (for both the inner loadbearing leaves and the external veneers) are considered in place of the original double-wythe URM walls.

The following variations of the two reference buildings are considered in this study:

- **Building plan regularity (only for EUC-BUILD-2).** EUC-BUILD-2 has a L-shaped plan, with a re-entrant corner. The length of this portion of the building is doubled (increasing the torsional effects), or zeroed resulting in a regular shape (and hence decreasing the torsional effects). LNEC-BUILD-3 is characterised by a rectangular plan and no variations are considered. The three plan variations are shown in Table 1.
- **Layout of a façade.** Three different layouts of a façade are considered for each building, the east and the west façade for EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3, respectively. The considered combinations are shown in Table 1.
- **Masonry material properties.** Two different sets of material properties for the URM are considered: clay brick brickwork pre-1945 (CL1) and post-1945 (CL2). The material properties are defined according to Table F.2 of NPR 9998 [6].
- **Timber material properties.** Two different sets of material properties for the timber structures are considered. The set T1 is defined after experimental tests [7] and past numerical studies performed by TU Delft to predict the experimental behaviour of shake table tests [8]. The same values are adopted for both the buildings. The set T2 is characterised by halved values of the material properties.

A summary of all the variations is listed in Table 2.

For each model, seven different ground motions are applied at the base of the structure. The ground motions are part of those used for the Hazard and Risk study [2], and especially for the NLTHA performed by ARUP [9]. Only the stronger motions (M05 to M11) have been considered to have more information of the behaviour of the building at collapse. Each ground motion consists of three orthogonal components, one parallel to the façades, one to the transversal walls and one vertical component.

Since for seven variations the considered signals were unable to cause the collapse of the building (as defined in section 3), for those cases the last two motions (M10 and M11) are scaled by a factor two and the analyses repeated. The scaled motions are named M10\* and M11\*, respectively.

A summary of the ground motions is included in Table 3 (extract from Table 2 of [9]). Additional information about the ground motions can be found in Appendix A.

In total, 126 NLTH analyses have been performed.

Table 1. Summary of the geometrical variations of the reference buildings

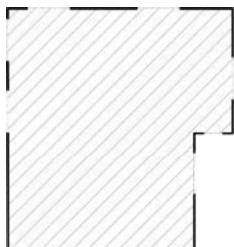
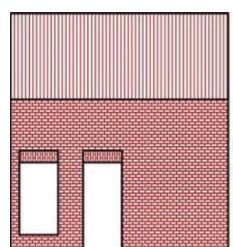
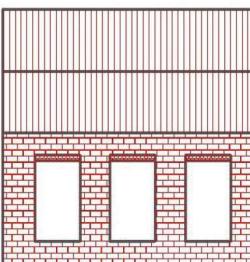
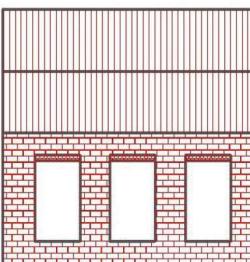
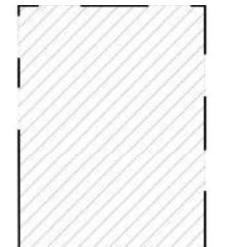
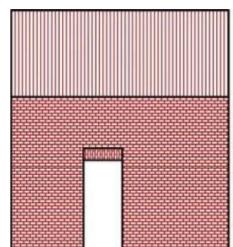
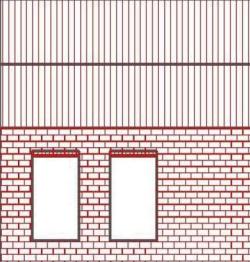
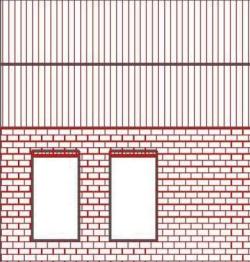
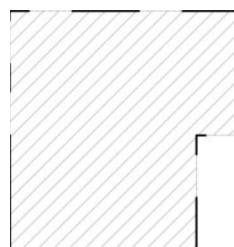
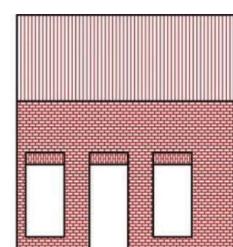
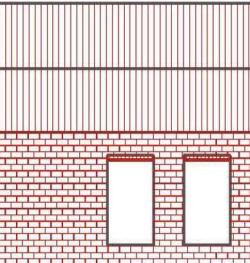
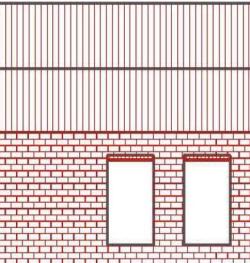
	<b>EUC-BUILD-2</b>		<b>LNEC-BUILD-3</b>	
	<b>Plan (P) variations</b>	<b>Façade (F) variations</b>	<b>Plan (P) variations</b>	<b>Façade (F) variations</b>
<b>1</b>				
<b>2</b>				
<b>3</b>				

Table 2. List of the 16 variations considered.

No.	Ref. building	Timber properties	Masonry properties	Floor shape	Façade layout
#1	EUC-BUILD-2	T1	CL1	P1	F1
#2	EUC-BUILD-2	T2	CL1	P1	F1
#3	EUC-BUILD-2	T1	CL2	P1	F1
#4	EUC-BUILD-2	T1	CL1	P1	F2
#5	EUC-BUILD-2	T1	CL1	P1	F3
#6	EUC-BUILD-2	T1	CL2	P1	F3
#7	EUC-BUILD-2	T1	CL1	P2	F1
#8	EUC-BUILD-2	T1	CL1	P3	F1
#9	EUC-BUILD-2	T1	CL2	P3	F1
#10	LNEC-BUILD-3	T1	CL1	-	F1
#11	LNEC-BUILD-3	T1	CL2	-	F1
#12	LNEC-BUILD-3	T2	CL2	-	F1
#13	LNEC-BUILD-3	T1	CL1	-	F2
#14	LNEC-BUILD-3	T1	CL2	-	F2
#15	LNEC-BUILD-3	T1	CL1	-	F3
#16	LNEC-BUILD-3	T1	CL2	-	F3

Table 3. Summary of the ground motions applied for the NLTHA (from [9]).

Ground motion	Label of first component	AvgSa (g)	Arias intensity (m/s)	PGA (g)	Sa(0.1s) (g)
M05	N_00147T	0.27	0.51	0.25	0.67
M06	N_00250L	0.34	1.53	0.88	0.87
M07	E_17167_EW	0.40	1.20	0.53	0.72
M08	N_00415L	0.46	1.74	0.70	1.02
M09	N_00569T	0.46	2.25	0.52	0.68
M10	N_00407L	0.57	3.54	0.82	1.26
M11	N_00451T	0.74	3.85	1.25	1.49

### 3 Methodology

The models used in this study for the numerical simulations are based on those created by TU Delft for the blind-prediction of the experimental tests performed on specimens EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3 in 2016 and 2018, respectively. The models have been updated to include the most recent expertise of TU Delft regarding material properties and constitutive models.

Quadratic 8-noded curved shell elements (CQ40S and CT30S) are used to model walls, floors and roof. The irregular and complex roof and floor framings, made by timber beams, are modelled with linear Class-III beam element (CL18B). A non-linear constitutive behaviour is considered for the masonry walls, while the rest of the elements are linear elastic. The Engineering Masonry Model is selected as material model for the two different clay masonry types (before and after 1945). The material properties of masonry are taken from Table F.2 of NPR 9998:2018 [6]. An orthotropic behaviour, whose properties are calibrated according to the laboratory experiment [7] and on the basis of previous simulations [8], is assigned to timber planks of the floor and the roof. The outer leaves are not explicitly modelled and they do not contribute to the global stability of the walls, but their mass is included in the numerical model by increasing the density of the material, with a conservative approach. Similarly, also the chimney is not modelled but its mass is accounted for. Non-linear point interfaces are used to model the pocket connections between the beams of the timber floor and the masonry walls, and between the purlins and the masonry gables. A Coulomb-friction model is employed for the interfaces. More details on the constitutive models and the material properties used for the simulations are provided in Appendix B. The model is restrained at the bottom from translations and rotations. The elements are meshed with an average size of 200x200 mm (an example of the mesh, is depicted in Figure 5).

Before performing the NLTH analyses, an eigenvalue analysis is run to define the two modes with the highest mass participation. The two corresponding eigenvalues are used to calculate the Rayleigh damping coefficients, whose value is updated with the global stiffness matrix at each step. A damping ratio equal to 2% is assumed, compliant with the recommendations of NPR 9998 [6]. The gravity load is initially applied in ten equal steps. Then each component of the triaxial ground motion is applied simultaneously as prescribed acceleration at the nodes at the base of the building with a time step of 2.5 ms. The Newmark-Beta method is used for the time integration ( $\beta = 0.25$ ,  $\gamma = 0.5$ ). The Secant BFGS (Quasi-Newton) method is adopted as iterative method. Energy norm with a tolerance of 0.01% is employed. The Parallel Direct Sparse method is employed to solve the system of equations. The second order effects are considered via the Total Lagrange geometrical nonlinearity.

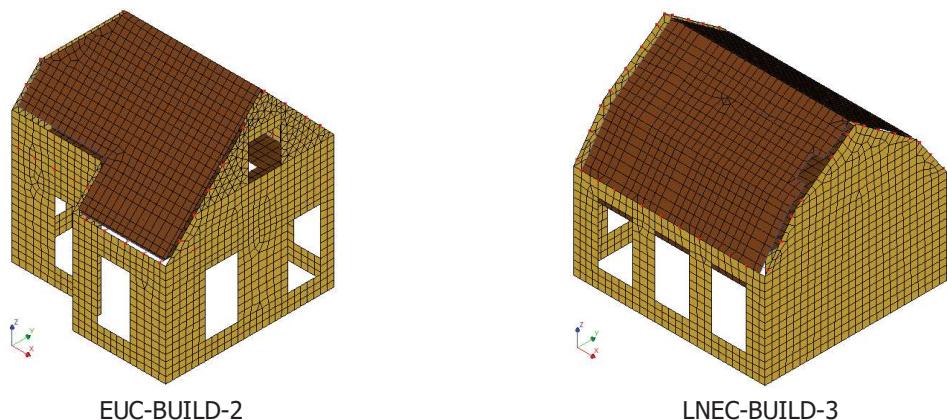


Figure 5. Diana models adopted for the analyses in the current study.

The outputs of the NLTH analyses are shown and discussed mainly in terms of normalised base shear (i.e. the measured base shear normalised by the effective mass of the building) vs the displacement at attic level. The attic displacement is computed as the average of the displacements measured for eight points at the attic level: the four corner points and the four points in the middle of the walls (as shown for both buildings in Figure 6). It should be noted that the out-of-plane displacement weights then 25% on the average attic displacement to account for the mass mobilized at collapse by the out-of-plane failure mode, and to define an average displacement representative for a Single Degree of Freedom (SDOF) system equivalent to the original building.

Since all the analysed buildings are one-storey high, the effective mass is computed by excluding the mass of the lower half portion of the ground floor, which is assumed to be transferred directly to foundations.

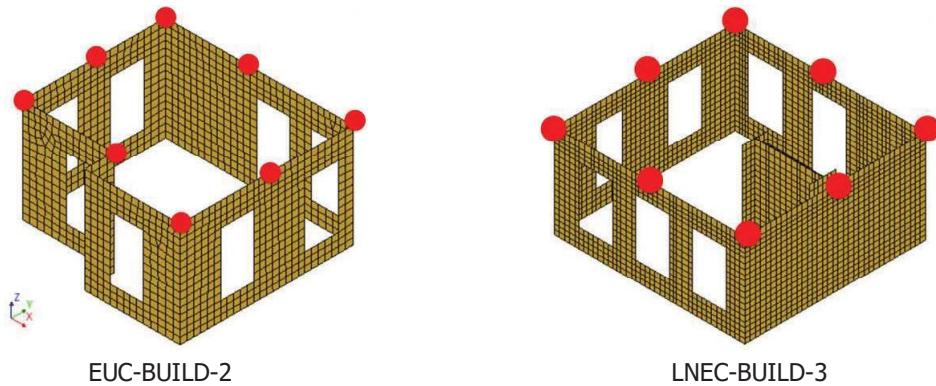


Figure 6. Points considered to define the attic displacement.

The ultimate displacement capacity of the building (i.e. the displacement at collapse of the building) is computed corresponding to the out-of-plane (OOP) collapse of one wall. This approach relates the global collapse of the structure to the local OOP collapse of a wall because no global failure mechanism is observed. Such conservative method is used since the analyses are unable to describe explicitly the OOP collapse of the walls and, therefore, the consequence of such collapse on the following behaviour of the whole building. In order to identify the point of collapse of a wall, a maximum OOP displacement is taken equal to the thickness of the internal loadbearing leaf (i.e. 100 mm). This threshold value was selected based on the outcomes of shake table tests on one-way spanning cavity walls performed at EUCENTRE [10], where the maximum mid-height displacement of the inner load-bearing walls was recorded at failure between 91.7 mm and 112.9 mm. The average attic displacement at collapse is then computed as the average between the eight points when a wall exceeds for the first time in the analysis the maximum OOP displacement. A variation study is also performed and reported, by considering a limit of 60 mm, in line with recommendations of Annex F of NPR9998.

Only the collapse state CS3 is considered in this study. This collapse state corresponds to the global collapse of the structure. A definition of the points corresponding to collapse states CS1 and CS2 is not provided because the outer leaf of cavity walls is not explicitly modelled, and no non-loadbearing partition walls are present in the reference buildings.

A backbone curve is defined for each of the sixteen variations, based on the outcomes of at least seven ground motions. This curve is defined by three points in the normalised base shear vs attic displacement space: (i) the cracking point, (ii) the peak, and (iii) the collapse displacement corresponding to zero residual strength. These three points are obtained according to the following procedure:

- For each ground motion, the points defined by the maximum base shear and the maximum average attic displacement (the ultimate displacement capacity as defined above) are determined, for both

positive and negative loading directions. These are the black dots in Figure 7. This step takes into account the lag between maximum force and displacement observed during a NLTH analysis, as described in [11];

- b. The cracking point and the corresponding initial stiffness are defined by the dots of the ground motions for which the structure exhibits a limited nonlinear behaviour. These correspond to ground motions M5 and M6 for most of the analyses;
- c. The peak is obtained by considering the maximum normalised base shear reached for any ground motion (before that the ultimate displacement is reached) and the maximum displacement reached for a ground motion for which the structure does not exceed the OOP displacement capacity of the walls;
- d. The ultimate displacement capacity corresponds to the maximum displacement at collapse of the building computed as described above;
- e. The backbone curve is symmetric and it considers the maximum between the positive and the negative loading direction.

An example of backbone curve, defined for variation #01 of EUC-BUILD-2, is shown in Figure 7.

The average backbone curve for each of the two reference buildings is defined by averaging the values of the three points (cracking, peak, collapse) defined for each single backbone curve.

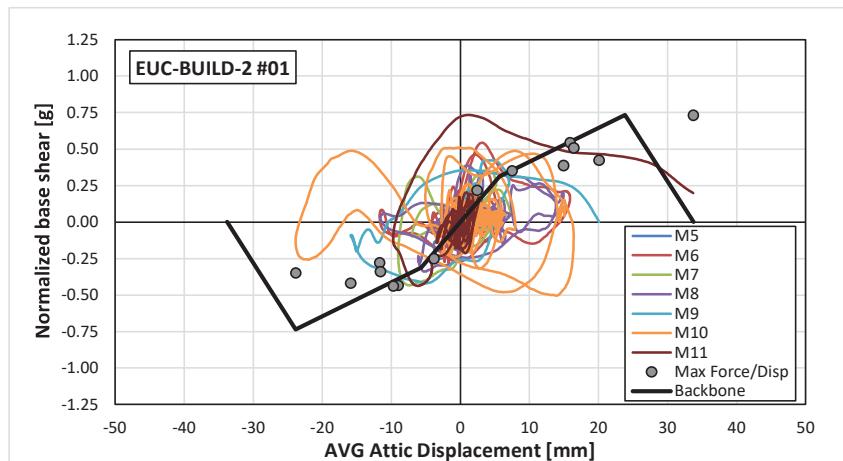


Figure 7. Example of a backbone curve defined for the model EUC-BUILD-2 - variation #01.

A comparison between the backbone curves obtained for the simulations modelled with or without non-linear interfaces is presented in Appendix E and F. Such comparison is provided to show clearly the changes from the previous version of this report, where the buildings were modelling without the use of nonlinear interfaces between timber beams and masonry.

## 4 Results

This section presents the backbone curves derived from the analyses performed on the variations of buildings EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3. The results are first presented separately for the two buildings, and then considered together and compared to the backbone curve defined in [11] for the corresponding index building of typology URM8L (Badweg 12).

### 4.1 EUC-BUILD-2

Sixty-nine NLTH analyses were performed on nine variations of EUC-BUILD-2. These analyses are all characterized by large OOP displacements of the North and South building façades (Figure 8), whereas the in-plane deformation of the East and West façades is small, with extensive flexural and shear cracking of the piers (Figure 9), sufficient to reach the peak capacity of the structure but not to bring it to a global collapse. The largest deformations are observed just below the attic level and are obtained for ground motions M10 and M11. The displacements larger than the thickness of the inner loadbearing leaf are shown in orange-red in Figure 8.

Table 4 reports the main outputs of the backbone curves defined for each variation in terms of total and effective mass ( $M$  and  $M_{\text{eff}}$ , respectively), effective height ( $h_{\text{eff}}$ ), initial stiffness ( $K$ ), and average attic displacement ( $d$ ) and normalised base shear ( $v_a$ ) at the points of cracking, peak and collapse as defined in section 3. The results are expressed by considering a stop criteria of 100 mm as OOP displacement collapse. The initial elastic behaviour is characterized by a variability, as shown by the coefficient of variation (CV) of the initial stiffness, of approximately 22%, with average value of 14.2 kN/mm. The average backbone curve is characterised by high values of the normalised base shear (0.73 g, with variations from 0.51 g up to 0.85 g) and a decent ductility, with the displacements at peak and at collapse equal to 26.9 mm and 40.0 mm (ranges: [21.3 mm; 41.3 mm] and [30.0 mm; 62.8 mm]), respectively.

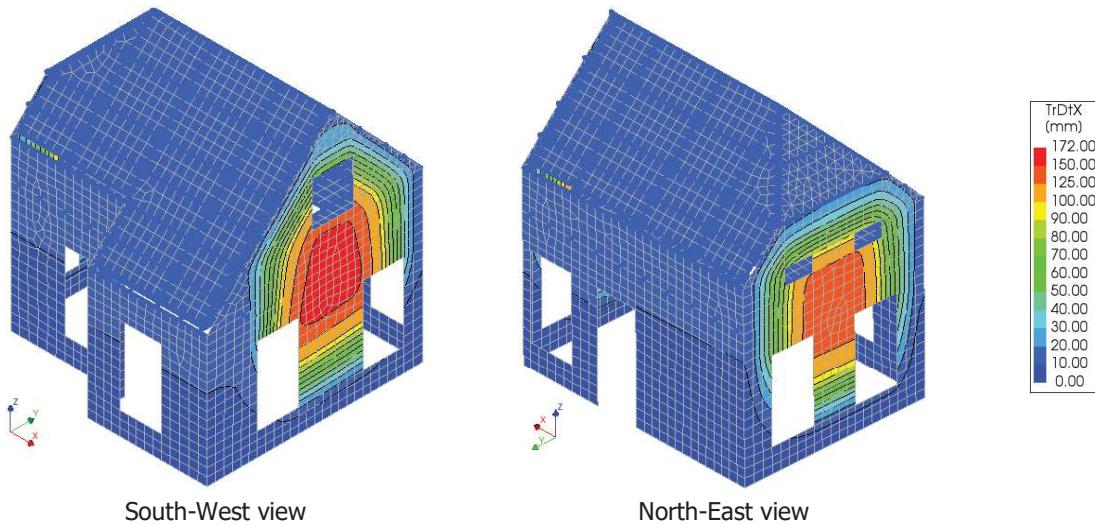


Figure 8. Deformations in the North-South direction of EUC-BUILD-2 #01 for motion M11 after the collapse of the South and North walls.

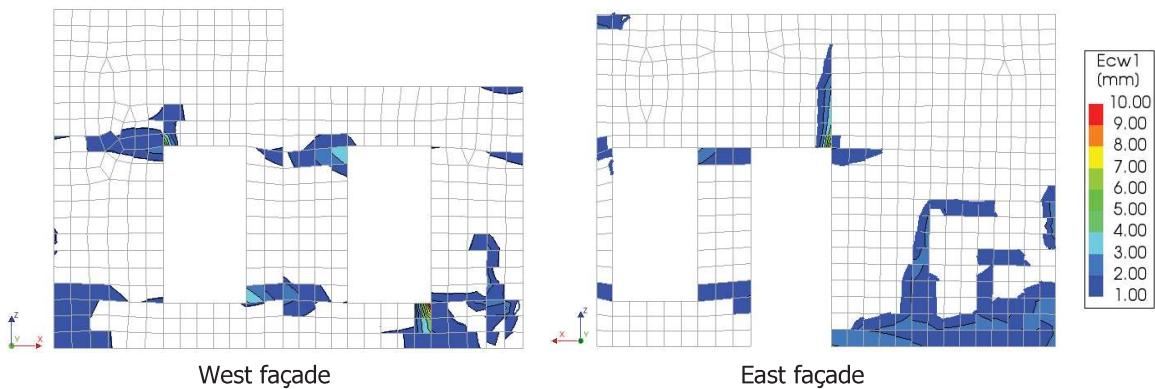


Figure 9. Principal crack width in the West and East façade of EUC-BUILD-2 #01 for motion M11 after the collapse of the South and North walls

In general, even if the failure mechanism is the same for all the buildings, the effect of the variations on the structural response of the building is evident. Specifically:

- The change of material properties of the timber floor has a limited effect on the outcomes of the analyses;
- Stronger masonry (clay brickworks post 1945) allows the structure to reach higher normalised base shear and displacement at collapse;
- The presence of additional openings, which reduce the length of the piers, determines lower normalised base shear at peak but it contributes to attain larger displacements at collapse (conversely, when an opening is removed, the structure is stronger but less ductile);
- Plan irregularities have small effects on the normalised base shear and peak/collapse displacement.

The backbone curves defined for each variation and the average backbone curve for EUC-BUILD-2 are shown in Figure 10.

Table 4. Main outputs of the backbone curves for each variation of EUC-BUILD-2. OOP stop criteria equal to 100 mm.

<b>Variation</b>	<b>M</b>	<b>M<sub>eff</sub></b>	<b>h<sub>eff</sub></b>	<b>K</b>	<b>Cracking</b>		<b>Peak</b>		<b>Collapse</b>	
	[t]	[t]	[m]	[kN/mm]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#01	32.3	22.6	3.11	12.20	5.69	0.31	23.85	0.73	33.75	0.0
#02	32.3	22.6	3.11	11.99	5.80	0.31	23.85	0.74	33.34	0.0
#03	32.3	22.6	3.11	17.37	4.10	0.32	27.55	0.85	43.25	0.0
#04	33.1	22.9	3.11	12.43	5.57	0.31	22.95	0.79	30.06	0.0
#05	31.6	22.2	3.11	14.97	3.56	0.24	27.93	0.51	44.70	0.0
#06	31.6	22.2	3.11	12.04	5.49	0.30	41.27	0.66	62.76	0.0
#07	31.6	22.7	3.11	10.29	6.32	0.29	21.32	0.71	31.01	0.0
#08	33.9	23.4	3.11	17.88	3.25	0.25	23.86	0.72	36.10	0.0
#09	33.9	23.4	3.11	18.5	4.21	0.34	29.92	0.84	45.44	0.0
<b>AVG.</b>	<b>32.5</b>	<b>22.7</b>	<b>3.11</b>	<b>14.19</b>	<b>4.89</b>	<b>0.30</b>	<b>26.94</b>	<b>0.73</b>	<b>40.05</b>	<b>0.0</b>
<b>CV</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	-	<b>22%</b>	<b>23%</b>	<b>10%</b>	<b>22%</b>	<b>14%</b>	<b>26%</b>	-

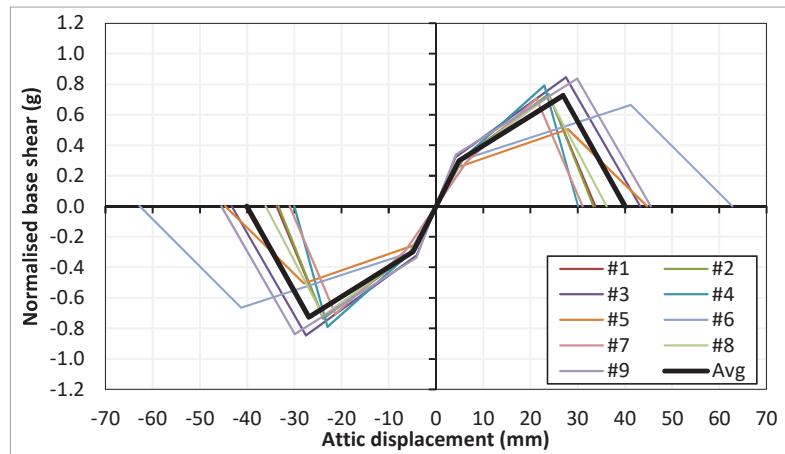


Figure 10. Backbone curves defined for the 9 variations of building EUC-BUILD-2, and the average backbone curve. OOP stop criteria of equal to 100 mm.

The overview of the results which accounts for an OOP stop criteria of 60 mm (instead of 100 mm) is reported in Table 5. Besides the initial stiffness of the curves, which remains unchanged, the new data shows a reduction of the values of both peak and ultimate displacement of approximately 36%. The average value of the peak displacement drops from 26.9 mm to 17.3 mm and the collapse displacement from 40.0 mm to 25.4 mm. The peak force remains substantially unchanged, with a reduction of about 1.4%.

The backbone curves defined for each variation when considering an OOP stop criteria of 60 mm and the average backbone curve for EUC-BUILD-2 are shown in Figure 11. The comparison of the average curves between the results cut when the displacement at North/South façade reaches 100 or 60 mm is depicted in Figure 12. The plot of each hysteretic curve for all the NLTH analyses performed for the variations of EUC-BUILD-2 is reported in Appendix C.

Table 5. Main outputs of the backbone curves for each variation of EUC-BUILD-2. OOP stop criteria equal to 60 mm.

<b>Variation</b>	<b>M</b>	<b>M<sub>eff</sub></b>	<b>h<sub>eff</sub></b>	<b>K</b>	<b>Cracking</b>		<b>Peak</b>		<b>Collapse</b>	
	[t]	[t]	[m]	[kN/mm]	[mm]	[g]	[mm]	[g]	[mm]	[g]
#01	32.3	22.6	3.11	12.20	5.69	0.31	15.77	0.73	24.29	0.0
#02	32.3	22.6	3.11	11.99	5.80	0.31	15.81	0.74	25.28	0.0
#03	32.3	22.6	3.11	17.37	4.10	0.32	19.08	0.85	23.17	0.0
#04	33.1	22.9	3.11	12.43	5.57	0.31	14.59	0.79	20.16	0.0
#05	31.6	22.2	3.11	14.97	3.56	0.24	21.47	0.51	32.52	0.0
#06	31.6	22.2	3.11	12.04	5.49	0.30	17.23	0.66	29.84	0.0
#07	31.6	22.7	3.11	10.29	6.32	0.29	15.32	0.71	21.26	0.0
#08	33.9	23.4	3.11	17.88	3.25	0.25	16.18	0.72	25.94	0.0
#09	33.9	23.4	3.11	18.5	4.21	0.34	19.93	0.81	25.75	0.0
<b>AVG.</b>	<b>32.5</b>	<b>22.7</b>	<b>3.11</b>	<b>14.19</b>	<b>4.89</b>	<b>0.30</b>	<b>17.26</b>	<b>0.72</b>	<b>25.36</b>	<b>0.0</b>
<b>CV</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	-	<b>22%</b>	<b>23%</b>	<b>10%</b>	<b>14%</b>	<b>14%</b>	<b>15%</b>	-

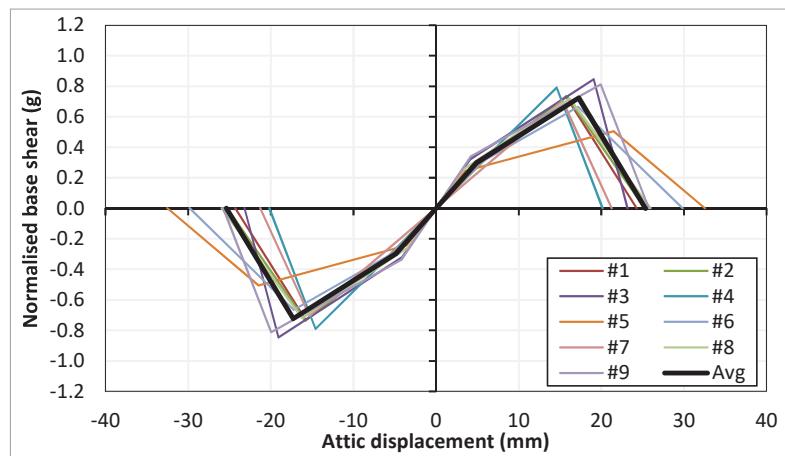


Figure 11. Backbone curves defined for the 9 variations of building EUC-BUILD-2, and the average backbone curve. OOP stop criteria of equal to 60 mm.

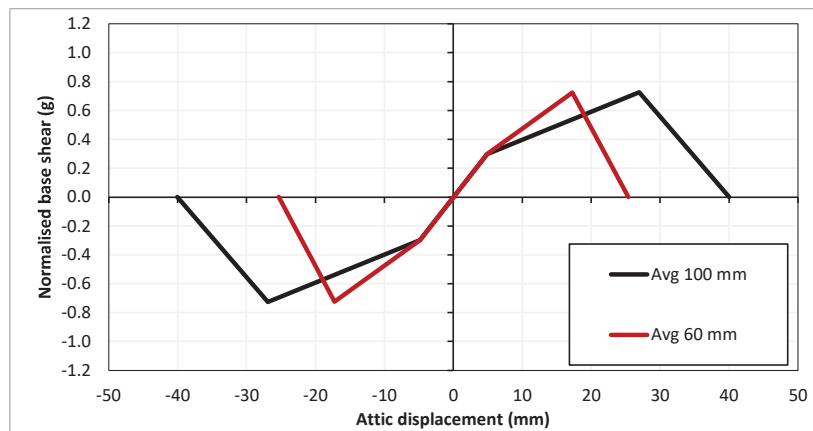


Figure 12. Comparison average backbone curves defined for the 9 variations of building EUC-BUILD-2 for OOP stop criteria of 100 mm and 60 mm.

Finally, the relative displacements of the point interface which simulate the timber-masonry pocket connections never exceed the value 10 mm. From the comparison between models with interfaces and model without interfaces, can be concluded that the explicit model of the pocket connections reduces the initial stiffness of about 12.5% (at the cracking point, the displacement are approximately 12.3% higher than the models without interfaces, while the normalized force is 3.2% lower). Both peak and collapse displacement increase, 23.5% and 4.3%, respectively, when the interface is modelled. The peak force reduces of approximately 12%. Similar changes are observed when the OOP stop criteria is reduced to 60 mm, although the displacement at peak becomes smaller (approximately 7%) than that obtained for models where no interfaces were modelled.

The summary tables and the plots of each backbone curve for all the analyses performed for the variations of EUC-BUILD-2 with the comparison between the models with and without interface elements are reported in Appendix F.

## 4.2 LNEC-BUILD-3

Fifty-seven NLTH analyses for seven variations of LNEC-BUILD-3 were performed. These analyses are all characterized by large OOP displacements of the South building façades (Figure 13), a large wall with no openings, whereas the OOP deformations of the North façade, with four openings, are limited. The in-plane deformations of the East and West façades are small, with limited flexural and shear cracking of the piers (Figure 14): the West wall is characterized by rocking of the short piers, while a diagonal shear crack is observed in the long wall of the East façade. The irregularity of the openings determines also torsion of the building, with displacements of the West façade at the attic level almost double than those of the East façade. The largest deformations are obtained for ground motions M10 and M11. The displacements larger than the thickness of the inner loadbearing leaf, in the middle of the South façade at the attic level, are shown in orange/red in Figure 13.

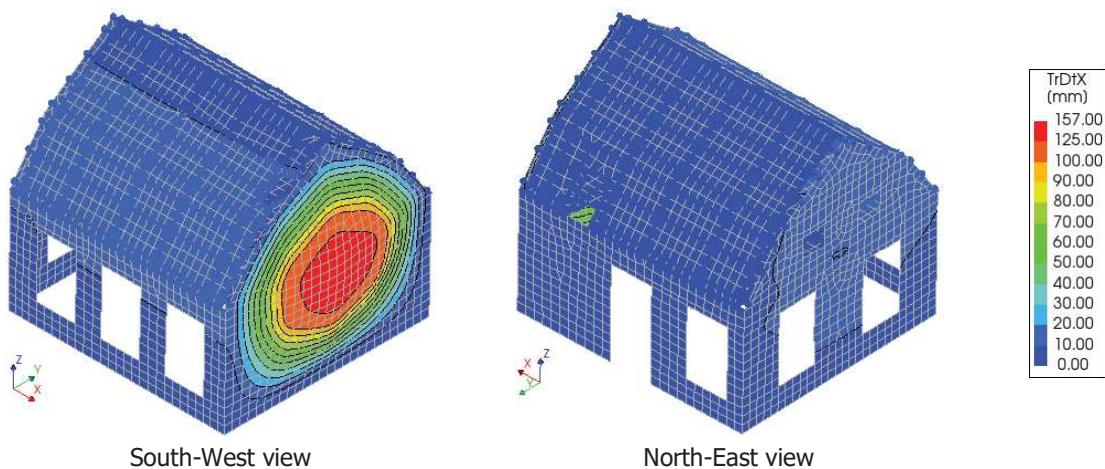


Figure 13. Deformations in the North-South direction of LNEC-BUILD-3 #11 for motion M11 after the collapse of the South wall.

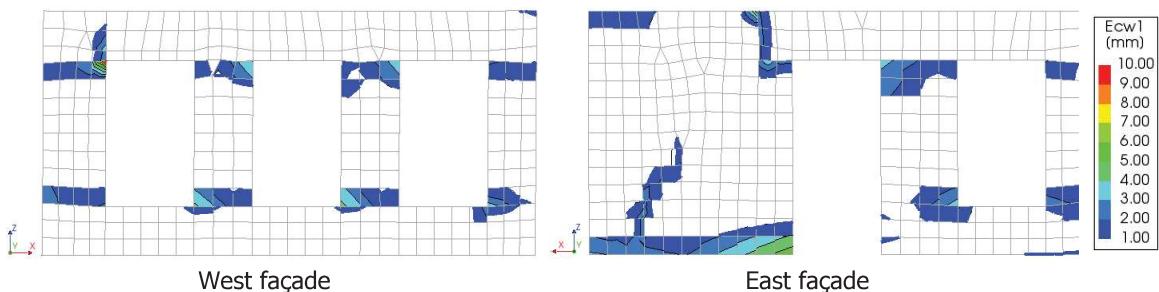


Figure 14. Principal crack width in the West and East façade of LNEC-BUILD-3 #11 for motion M11 after the collapse of the South and North walls

Table 6 reports the main outputs of the backbone curves defined for each variation in terms of total and effective mass ( $M$  and  $M_{\text{eff}}$ , respectively), effective height ( $h_{\text{eff}}$ ), initial stiffness ( $K$ ), and average attic displacement ( $d$ ) and normalised base shear ( $v_a$ ) at the points of cracking, peak and collapse as defined in section 3. The results are expressed by considering a stop criteria of 100 mm as OOP displacement collapse. Respect to the other reference building, the initial elastic behaviour of the variants of LNEC-BUILD-3 is much stiffer, as shown by the initial stiffness, which is equal to 41.7 kN/mm against the 14.9 kN/mm of EUC-BUILD-2. The average backbone curve is characterised by high values of the normalised base shear (0.98 g, with small variations from 0.88 g up to 1.04 g) but small ductility, with the displacements at peak and at collapse equal to 10.1 mm and 16.8 mm (ranges: [7.6 mm; 13.9 mm] and [15.1 mm; 21.6 mm]), respectively.

For this set of analyses, the effect of the variations on the structural response of the building is limited, as it can be observed in Figure 15. The variations affect more the global in-plane but they do not impact the OOP collapse of the South wall and, consequently, the performance of the building at failure.

Table 6. Main outputs of the backbone curves for each variation of LNEC-BUILD-3. OOP stop criteria equal to 100 mm.

<b>Variation</b>	<b>M</b>	<b>M<sub>eff</sub></b>	<b>h<sub>eff</sub></b>	<b>K</b>	<b>Cracking</b>		<b>Peak</b>		<b>Collapse</b>	
	[t]	[t]	[m]	[kN/mm]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#10	31.1	21.1	2.72	32.39	2.06	0.32	13.85	0.88	21.55	0.00
#11	31.1	21.1	2.72	44.56	1.53	0.33	10.12	1.01	17.94	0.00
#12	31.1	21.1	2.72	43.14	1.56	0.33	10.27	1.00	17.80	0.00
#13	31.8	21.5	2.72	40.74	1.61	0.31	10.63	0.94	13.53	0.00
#14	31.8	21.5	2.72	43.76	1.51	0.31	7.61	1.04	15.69	0.00
#15	31.8	21.5	2.72	38.73	1.80	0.33	9.94	0.95	15.67	0.00
#16	31.8	21.5	2.72	48.76	1.41	0.33	8.12	1.04	15.09	0.00
<b>AVG.</b>	<b>31.5</b>	<b>21.3</b>	<b>2.72</b>	<b>41.73</b>	<b>1.64</b>	<b>0.32</b>	<b>10.08</b>	<b>0.98</b>	<b>16.75</b>	<b>0.00</b>
<b>CV</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	-	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>2%</b>	<b>20%</b>	<b>6%</b>	<b>6%</b>	-

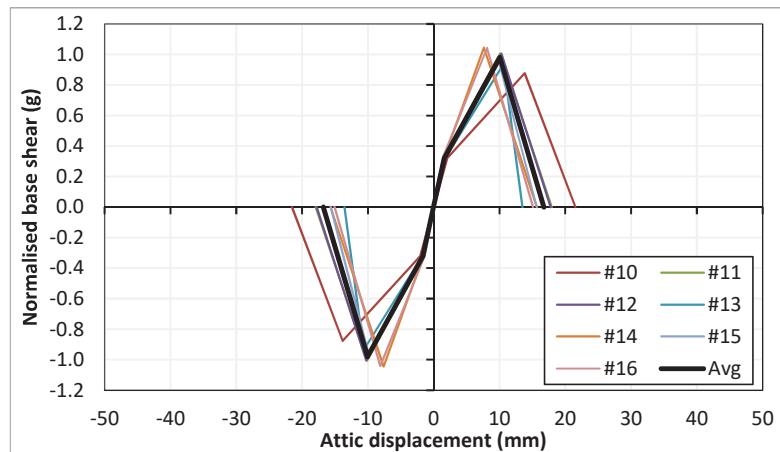


Figure 15. Backbone curves defined for the 7 variations of building LNEC-BUILD-3, and the average backbone curve. OOP stop criteria of equal to 100 mm.

The overview of the results which accounts for an OOP stop criteria of 60 mm (instead of 100 mm) is reported in Table 7. Besides the initial stiffness of the curves, which remains unchanged, the new data shows a reduction of the values of both peak and ultimate displacement of approximately 20%. The average value of the peak displacement drops from 10.1 mm to 8.1 mm and the collapse displacement from 16.8 mm to 13.3 mm. The average peak force is not influenced by the reduction of the stop criteria. These changes are in line with those observed for EUC-BUILD-2.

The backbone curves defined for each variation when considering an OOP stop criteria of 60 mm and the average backbone curve for LNEC-BUILD-3 are shown in Figure 16. The comparison of the average curves between the results cut when the displacement at North/South façade reaches 100 or 60 mm is depicted in Figure 17. The plot of each hysteretic curve for all the NLTH analyses performed for the variations of LNEC-BUILD-3 is reported in Appendix D.

Table 7. Main outputs of the backbone curves for each variation of LNEC-BUILD-3. OOP stop criteria equal to 60 mm.

<b>Variation</b>	<b>M</b>	<b>M<sub>eff</sub></b>	<b>h<sub>eff</sub></b>	<b>K</b>	<b>Cracking</b>		<b>Peak</b>		<b>Collapse</b>	
	[t]	[t]	[m]	[kN/mm]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#10	31.1	21.1	2.72	32.39	2.06	0.32	8.61	0.88	19.57	0.00
#11	31.1	21.1	2.72	44.56	1.53	0.33	9.01	1.01	13.63	0.00
#12	31.1	21.1	2.72	43.14	1.56	0.33	9.23	1.00	14.01	0.00
#13	31.8	21.5	2.72	40.74	1.61	0.31	6.75	0.94	12.27	0.00
#14	31.8	21.5	2.72	43.76	1.51	0.31	7.98	1.04	9.96	0.00
#15	31.8	21.5	2.72	38.73	1.80	0.33	7.15	0.95	13.60	0.00
#16	31.8	21.5	2.72	48.76	1.41	0.33	7.68	1.04	10.37	0.00
<b>Avg.</b>	<b>31.5</b>	<b>21.3</b>	<b>2.72</b>	<b>41.73</b>	<b>1.64</b>	<b>0.32</b>	<b>8.06</b>	<b>0.98</b>	<b>13.34</b>	<b>0.00</b>
<b>CV</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	-	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>2%</b>	<b>12%</b>	<b>6%</b>	<b>24%</b>	-

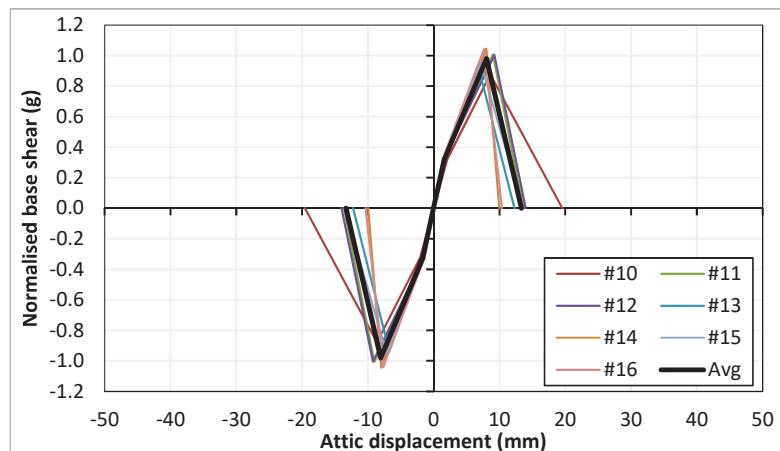


Figure 16. Backbone curves defined for the 7 variations of building LNEC-BUILD-3, and the average backbone curve. OOP stop criteria of equal to 60 mm.

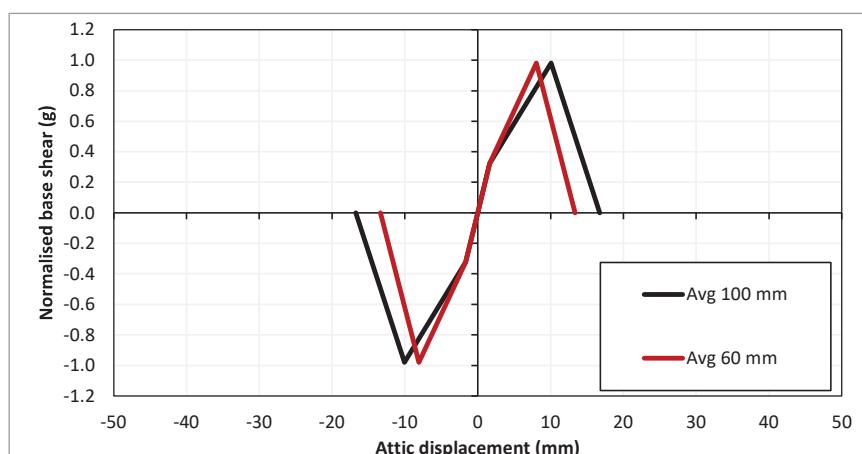


Figure 17. Comparison average backbone curves defined for the 7 variations of building LNEC-BUILD-3 for OOP stop criteria of 100 mm and 60 mm.

Similar to what has been observed for EUC-BUILD-2, also for LNEC-BUILD-3 the relative displacements of the point interface which simulate the timber-masonry pocket connections never exceed the value 10 mm. From the comparison between models with interfaces and model without interfaces, it can be seen that, differently from EUC-BUILD-2, the initial stiffness increases of 46.7% in the model with interface. However, this may be due to the fact that the motions considered were selected focusing on the behaviour at collapse of the building, and a more accurate value of this parameter might be found by running additional low PGA motions. The cracking displacement is 22.6% lower and the cracking normalized force 10.3% higher. No major differences are found as regards the peak and point of collapse. The same conclusions are derived when the OOP stop criteria is reduced to 60 mm, although the displacements at peak and collapse become smaller (12.5% and 10.6%, respectively) than those obtained for models where no interfaces were modelled.

The summary tables and the plot of each backbone curve for all the analyses variation performed for the variations of LNEC-BUILD-3 with the comparison between the models with and without interface elements are reported in Appendix F.

### 4.3 All variations

Since both the buildings EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3 belong to the same typology (Metselwerk 7), it is opportune to consider the results of all the sixteen variations together.

Table 8 lists the main outputs of the backbone curves defined for each variation, as well as the average values, the coefficients of variation, and the ratio between the maximum and the minimum value. The backbone curves are also plotted in Figure 18.

The behaviour of both the buildings is characterized by the OOP failure of (at least) a façade. Also the average normalised base shear capacity of the two buildings is relatively similar, with a difference lower than 20%. But large differences are found between the displacement capacity of the two buildings, being one more than double than the other (on average). The variants of LNEC-BUILD-3 are stiffer in the elastic phase, do not show any remarkable post-cracking softening and are rather brittle, having the south wall collapsing few millimetres after the peak. In fact, the OOP failure of the South façade occurs when the in-plane failure mechanism has just begun, but it has not fully developed yet, as shown by the limited crack-width in the two in-plane façades when compared to the cracks in the variants of EUC-BUILD-2. On the contrary, this latter building shows some more in-plane/out-of-plane interaction, with larger and more diffuse in-plane cracks at collapse.

In general, the sixteen variations are able to identify large variations in the parameters of the backbone curves, especially with regard to the initial stiffness and the displacements at peak and at collapse, as shown by the large coefficients of variation and maximum over minimum ratios. The analyses performed can then cover the large variability expected for the building typology Metselwerk 7.

Figure 19 shows a comparison between the backbone curves derived for the variants of EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3 and that defined in [11] for Badweg 12, the index building of typology URM8L (having similar characteristics with Metselwerk 7), whose seismic behaviour is characterised by the collapse of roof, chimneys, gable walls and outer leaves [9]. It should be noted that the collapse of chimneys and outer leaves is not considered in this study, because they contribute only to local collapse (CC1 and CC2). Unlike the variants of EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3, the OOP collapse occurs in the index building at the roof level, possibly for the different geometry of the building and for the presence of an annex adjacent to the back façade. Overall, the two studied buildings show better performances than the index building, especially in terms of normalised base shear.

Table 8. Main outputs of the backbone curves for each variation of both EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3. OOP stop criteria equal to 100 mm.

Variation		M [t]	M <sub>eff</sub> [t]	h <sub>eff</sub> [m]	K [kN/mm]	Cracking d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	Peak d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	Collapse d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
EUC-BUILD-2	#01	32.3	22.6	3.11	12.20	5.69	0.31	23.85	0.73	33.75	0
	#02	32.3	22.6	3.11	11.99	5.80	0.31	23.85	0.74	33.34	0
	#03	32.3	22.6	3.11	17.37	4.10	0.32	27.55	0.85	43.25	0
	#04	33.1	22.9	3.11	12.43	5.57	0.31	22.95	0.79	30.06	0
	#05	31.6	22.2	3.11	14.97	3.56	0.24	27.93	0.51	44.70	0
	#06	31.6	22.2	3.11	12.04	5.49	0.30	41.27	0.66	62.76	0
	#07	31.6	22.7	3.11	10.29	6.32	0.29	21.32	0.71	31.01	0
	#08	33.9	23.4	3.11	17.88	3.25	0.25	23.86	0.72	36.10	0
	#09	33.9	23.4	3.11	18.50	4.21	0.34	29.92	0.84	45.44	0
LNEC-BUILD-3	#10	31.1	21.1	2.72	32.39	2.06	0.32	13.85	0.88	21.55	0
	#11	31.1	21.1	2.72	44.56	1.53	0.33	10.12	1.01	17.94	0
	#12	31.1	21.1	2.72	43.14	1.56	0.33	10.27	1.00	17.80	0
	#13	31.8	21.5	2.72	40.74	1.61	0.31	10.63	0.94	13.53	0
	#14	31.8	21.5	2.72	43.76	1.51	0.31	7.61	1.04	15.69	0
	#15	31.8	21.5	2.72	38.73	1.80	0.33	9.94	0.95	15.67	0
	#16	31.8	21.5	2.72	48.76	1.41	0.33	8.12	1.04	15.09	0
AVG.		32.1	22.1	2.94	26.2	3.47	0.31	19.6	0.84	29.9	-
CV		3%	4%	7%	56%	54%	8%	50%	19%	48%	-
Max/min		1.09	1.11	1.14	4.74	4.50	1.39	5.42	2.07	4.64	-

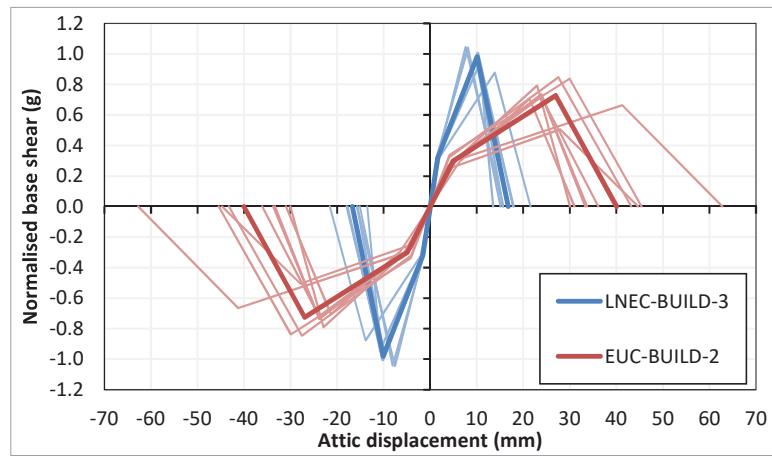


Figure 18. Backbone curves defined for the 9 variations of building EUC-BUILD-2 (light red) the 7 variations of building LNEC-BUILD-3 (light blue), and the two average backbone curves.

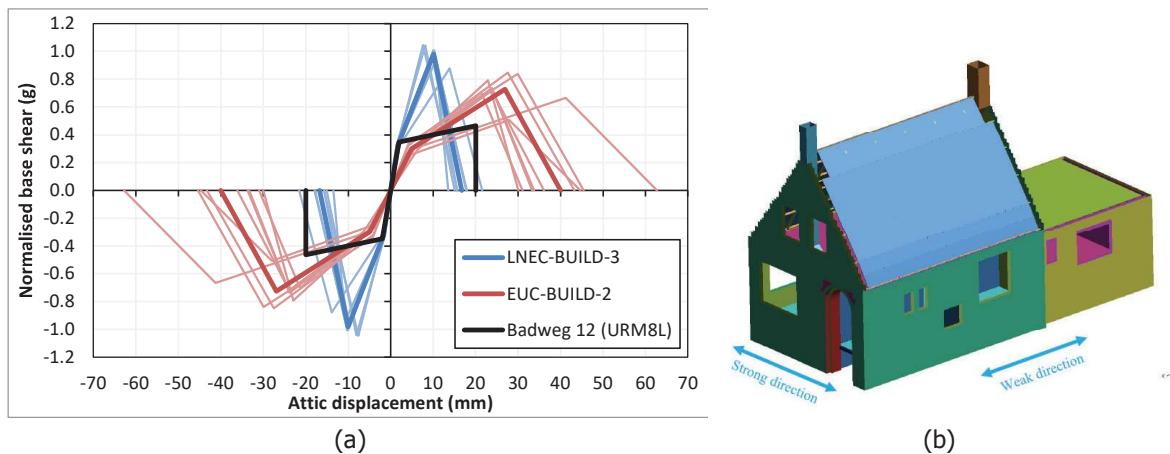


Figure 19. (a) Average backbone curves defined for EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3, and backbone curve of building Badweg 12 representative for typology URM8L [11]. (b) Model of Badweg 12 [9][11].

## 5 Conclusions

The work described in the present document aims at investigating the definition of backbone curves for buildings belonging to typology Metselwerk 7. This typology corresponds to one- and two-storey detached houses, with cavity unreinforced masonry (URM) walls, timber floor and roof structure. This description corresponds to a large extent to that of the typology URM8L as defined in the v7 report of the Hazard and Risk study produced by EUCENTRE for NAM [2].

Since this typology is characterized by large variations in terms of geometry of the buildings, two different reference buildings are considered: EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3. With respect to the two original buildings, cavity walls made by solid clay bricks are considered in place of double-wythe solid clay brick URM walls. Sensitivity studies are carried out by changing consistently a number of relevant parameters:

1. Floor shape (rectangular vs L-shape);
2. Number and length of the piers on a façade of the building;
3. Masonry material properties (walls);
4. Timber material properties (floor and roof).

Since the seismic behaviour of the buildings is governed by the out-of-plane (OOP) failure of the walls, a large number (126) of nonlinear time history (NLTH) analyses is carried out.

The outcomes of the numerical simulations suggest that:

- The buildings show consistently the same type of failure, which regards the OOP collapse of at least one façade.
- The average backbone curves for the two buildings are characterised by large normalised base shear capacity but rather limited displacement capacity, especially for the variations of LNEC-BUILD-3.
- The variations studied affect largely the displacement capacity of the buildings. For this parameter, a very large coefficient of variation is found ( $CV = 48\%$ ).
- Similarly, also the initial stiffness of the buildings varies largely from case to case ( $CV = 56\%$ ).
- Smaller differences are observed with regards to the normalised base shear capacity ( $CV = 19\%$ ).
- The values of the material properties affect significantly the results of the analyses. This is observed especially for the masonry, but not equally for the timber.
- The presence of openings in the in-plane façades influences the global behaviour of the building: larger openings reduce the normalised base shear capacity, but they slightly increase the displacement capacity.
- Plan irregularities reduce the displacement capacity of the buildings, but they have small effects on the normalised base shear.
- When the average backbone curves defined for the variations of EUC-BUILD-2 and LNEC-BUILD-3 are compared with that defined for Badweg 12 (index building of typology URM8L), the two studied buildings show better performances than the index building, especially in terms of normalised base shear. Differences are observed also in terms of failure mode, since the OOP collapse in the index building occurs at roof level, possibly due to the different geometry of the building and to the presence of an annex adjacent to the back façade.

## References

- [1] Geurts, C.P.W., Steenbergen, R.D.J.M., van Vliet, M.R.A (2019). A quick, safe and validated typology based seismic assessment of buildings. Plan of Action. 6 September 2019
- [2] Crowley, H., Pinho, R. (2020). Report on the Fragility and Consequence Models for the Groningen Field (Version 7). NAM report, March 2020
- [3] Graziotti, F., Tomassetti, U., Rossi, A., Marchesi, B., Kallioras, S., Mandirola, M, Fragomeli, A., Mellia, E., Peloso, S., Cuppari, F., Guerrini, G., Penna, A., Magenes, G. (2016). Shaking table tests on a full-scale clay-brick masonry house representative of the Groningen building stock and related characterization tests. Report EUC128/2016U, EUCLCENTRE, Pavia, IT
- [4] Kallioras, S., Correia, A.A., Marques, A.I., Bernardo, V., Candeias, P.X., Graziotti, F. (2018). LNEC-BUILD-3: an incremental shake-table test on a Dutch URM detached house with chimneys. Report EUC203/2018U, EUCLCENTRE, Pavia, IT
- [5] Kallioras, S., Guerrini, G., Tomassetti, U., Peloso, S., & Graziotti, F. (2018). Dataset from the dynamic shake-table test of a full-scale unreinforced clay-masonry building with flexible timber diaphragms. Data in brief, 18, 629-640
- [6] NEN, Nederlands Normalisatie Instituut (2018). NPR 9998:2018 nl. Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren - Geïnduceerde aardbevingen - Grondslagen, belastingen en weerstanden. Delft, the Netherlands (in Dutch)
- [7] Ravenshorst, G., & Mirra, M. (2017). Test report on cyclic behaviour of replicated timber diaphragms representing a detached house. Delft University of Technology.
- [8] Messali, F., Rots, J.G. (2018). EUC-BUILD-6: post-test refined predictions (TU Delft – DIANA 10.2). TU Delft Report, 28 October 2018
- [9] Merczel, D., Abeysekera, I., McVitty, W., Grant, D., Kluwer, R., (2017). Typology Modelling: Analysis Results in Support of Fragility Functions – 2017 Batch Results. NAM report, October 2017
- [10] Graziotti, F., Tomassetti, U., Penna, A., & Magenes, G. (2016). Out-of-plane shaking table tests on URM single leaf and cavity walls. Engineering Structures, 125, 455-470.
- [11] Crowley, H., Pinho, R., Cavalieri, F. (2019). Report on the v6 Fragility and Consequence Models for the Groningen Field. NAM report, March 2019
- [12] Schreppers, G.M.A., Garofano, A., Messali, F., Rots, J.G. (2017). DIANA Validation report for Masonry modelling. Report *DIANA FEA BV & TU Delft*, 15 February 2017

## Appendix A – Ground motions

The seven ground motions used are selected from [9] and adopted in this study and they are listed in Table 3. Each motion contains three components, two horizontal and one vertical. The accelerogram of each motion is plotted in Figure 20. The response spectra of the motions are shown in Figure 21.

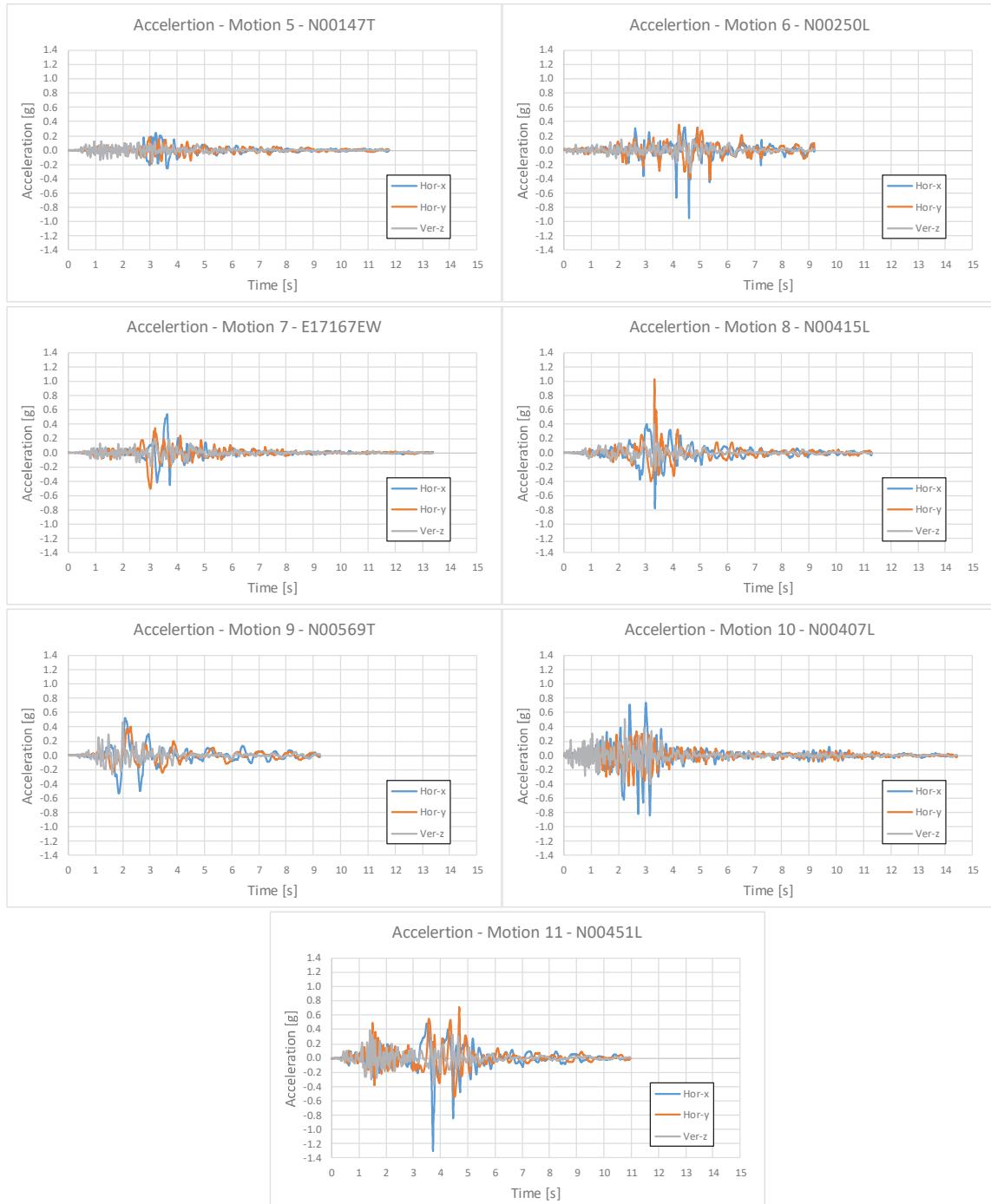


Figure 20. Accelerograms of the seven applied ground motions.

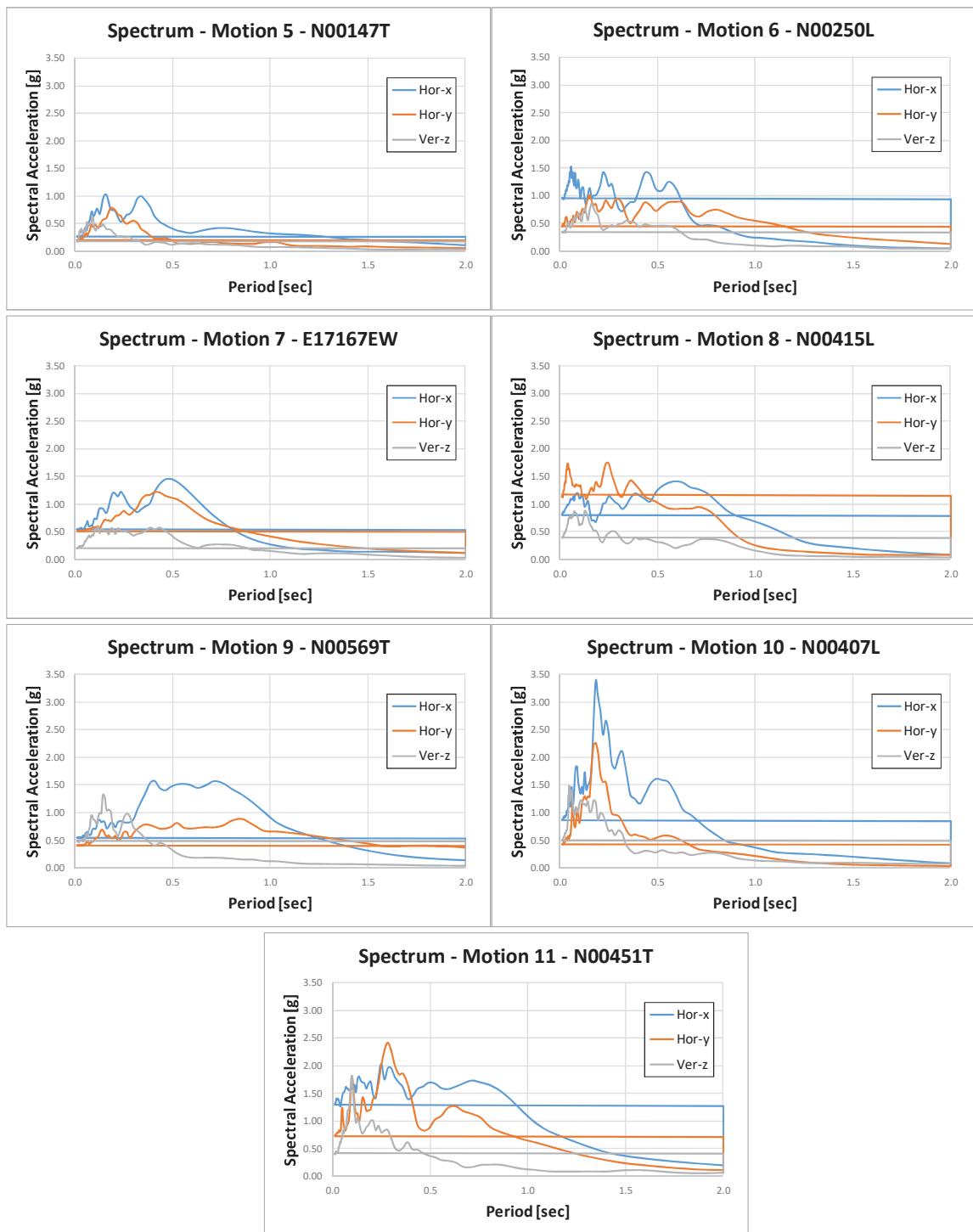


Figure 21. Response Spectra of the seven applied ground motions.

## Appendix B – Material properties

The following material properties have been used in the numerical simulations with Diana 10.4. The Engineering Masonry Model [12] is used as material model for piers, bank, spandrel and gables. Local y axis is aligned to the global Z axis in order to define the bed joint orientation. For the NLTH calculations the elastic properties are halved in order to properly capture the cyclic strength degradation, not explicitly described by the EMM. Besides, the same assumption has been already employed in other calibration/validation studies of URM buildings to overcome the global rigidity given by local connections which results in over stiff results.

### 1. Clay brick masonry (brickwork pre 1945): Engineering Masonry Model (EMM)

<b>Elasticity parameters</b>			
$E_x = 2500 \text{ N/mm}^2$	$E_y = 2500 \text{ N/mm}^2$	$G_{xy} = 1250 \text{ N/mm}^2$	$\rho = 1980 \text{ kg/m}^3$
<b>Cracking parameters</b>			
Head-joint failure type: tensile strength head-joint defined by friction			
$f_{ty} = 0.15 \text{ N/mm}^2$	$f_{tx,min} = 0.45 \text{ N/mm}^2$	$G_{fI} = 0.01 \text{ N/mm}$	$\alpha = 0.60 \text{ rad}$
<b>Crushing parameters</b>			
$f_c = 8.5 \text{ N/mm}^2$	$G_c = 20 \text{ N/mm}$	$n = 3$	$\lambda = 1$
<b>Shear failure parameters</b>			
$\phi = 0.64 \text{ rad}$	$c_0 = 0.30 \text{ N/mm}^2$	$G_{fII} = 0.1 \text{ N/mm}$	Crack bandwidth: Rots

More detailed information on the meaning of the parameters and the constitutive model can be found in [12]

### 1. Clay brick masonry (brickwork post 1945): Engineering Masonry Model (EMM)

<b>Elasticity parameters</b>			
$E_x = 1500 \text{ N/mm}^2$	$E_y = 3000 \text{ N/mm}^2$	$G_{xy} = 1250 \text{ N/mm}^2$	$\rho = 1980 \text{ kg/m}^3$
<b>Cracking parameters</b>			
Head-joint failure type: tensile strength head-joint defined by friction			
$f_{ty} = 0.30 \text{ N/mm}^2$	$f_{tx,min} = 0.90 \text{ N/mm}^2$	$G_{fI} = 0.01 \text{ N/mm}$	$\alpha = 0.50 \text{ rad}$
<b>Crushing parameters</b>			
$f_c = 10 \text{ N/mm}^2$	$G_c = 15 \text{ N/mm}$	$n = 3$	$\lambda = 1$
<b>Shear failure parameters</b>			
$\phi = 0.64 \text{ rad}$	$c_0 = 0.40 \text{ N/mm}^2$	$G_{fII} = 0.2 \text{ N/mm}$	Crack bandwidth: Rots

### 2. Timber planks: orthotropic elastic behaviour

<b>Linear material parameters</b>		
$E_x = 1.5 \text{ N/mm}^2$	$E_y = 11 \text{ N/mm}^2$	$E_z = 400 \text{ N/mm}^2$
$v_{xy} = 0$	$v_{yz} = 0$	$v_{xz} = 0$
$G_{xy} = 1100 \text{ N/mm}^2$	$G_{yz} = 1100 \text{ N/mm}^2$	$G_{xz} = 500 \text{ N/mm}^2$
$\rho = 10^{-20} \text{ T/mm}^3$ : the mass of the timber floor is applied directly to the timber joists.		

### 3. Timber beams and lintels: isotropic elastic behaviour

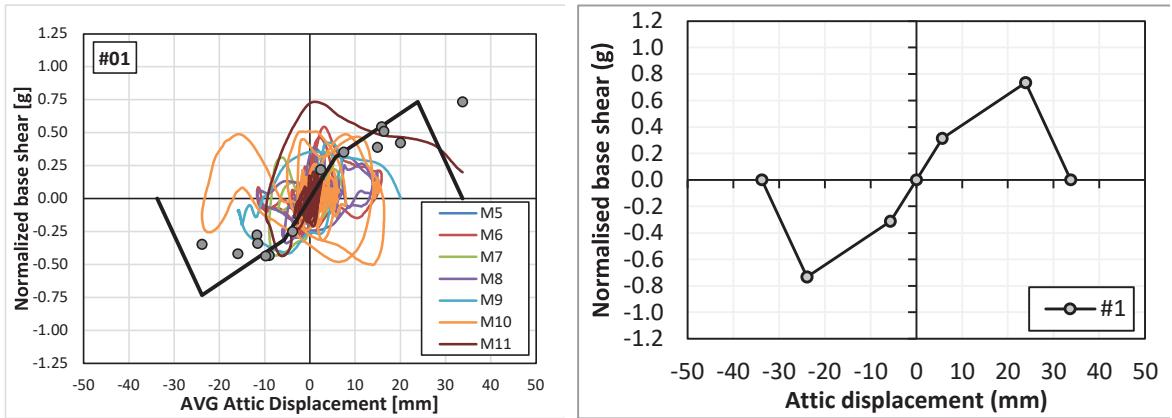
<b>Linear material parameters</b>		
$E = 12000 \text{ N/mm}^2$	$v = 0.40$	$\rho = 450 \text{ kg/m}^3$

### 4. Pocket connection timber-masonry: Coulomb-Friction

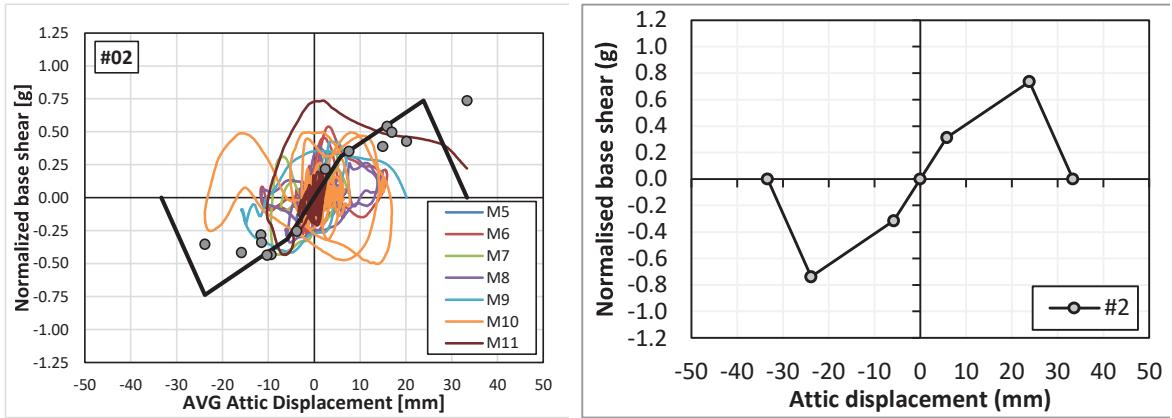
<b>Elasticity parameters</b>			
$k_n = 1000 \text{ N/mm}^3$	$k_{t1} = 100 \text{ N/mm}^3$	$k_{t2} = 100 \text{ N/mm}^3$	
<b>Coulomb friction parameters</b>			
$\phi = 0.54 \text{ rad}$	$c_0 = 0.02 \text{ N/mm}^2$	$\psi = 0.0 \text{ rad}$	Opening: No opening

## Appendix C – hysteretic and backbone curves for NLTHA of EUC-BUILD-2

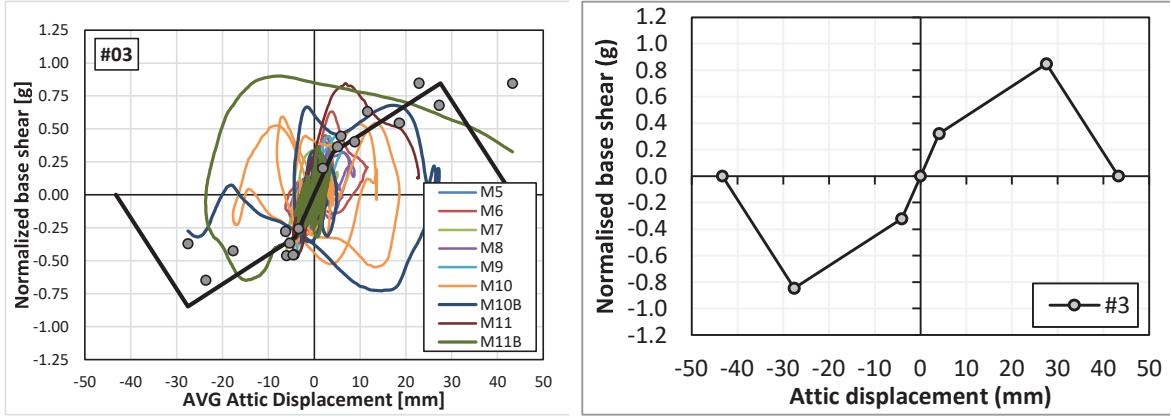
### Variation #01 - OOP Criteria 100 mm



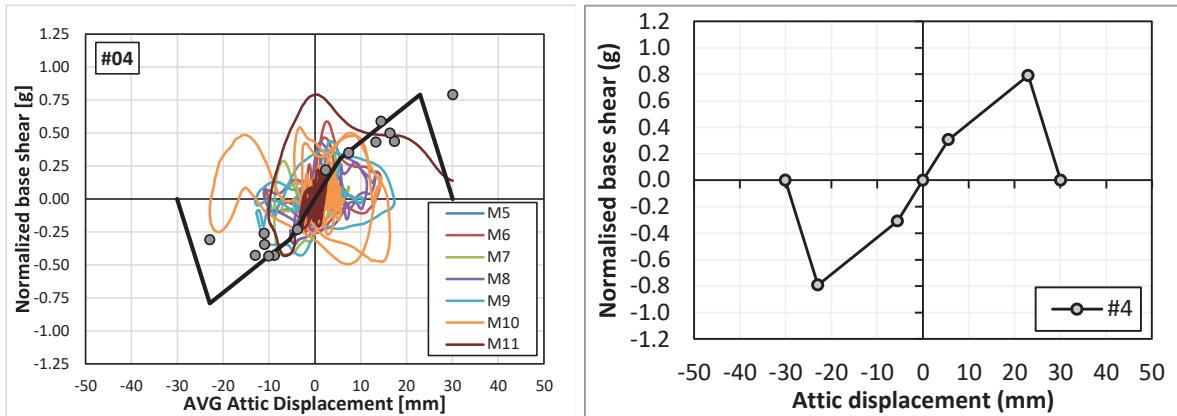
### Variation #02 - OOP Criteria 100 mm



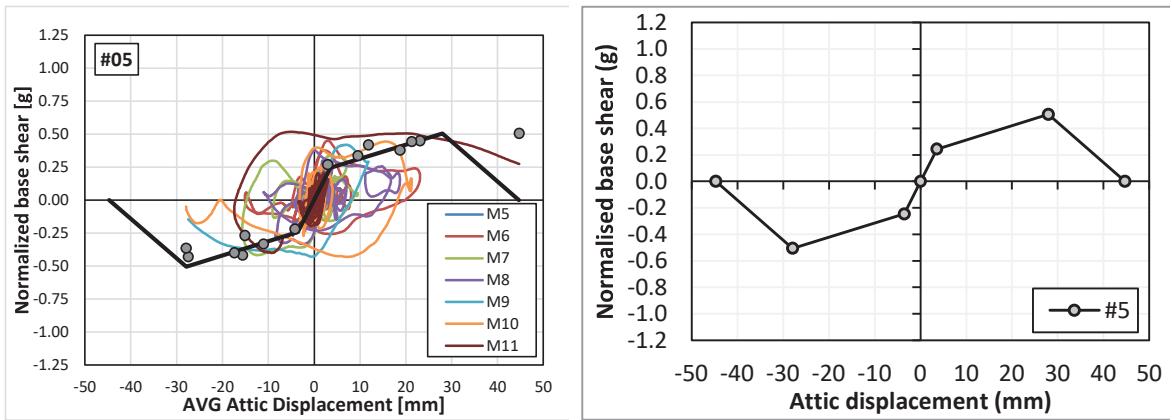
### Variation #03 - OOP Criteria 100 mm



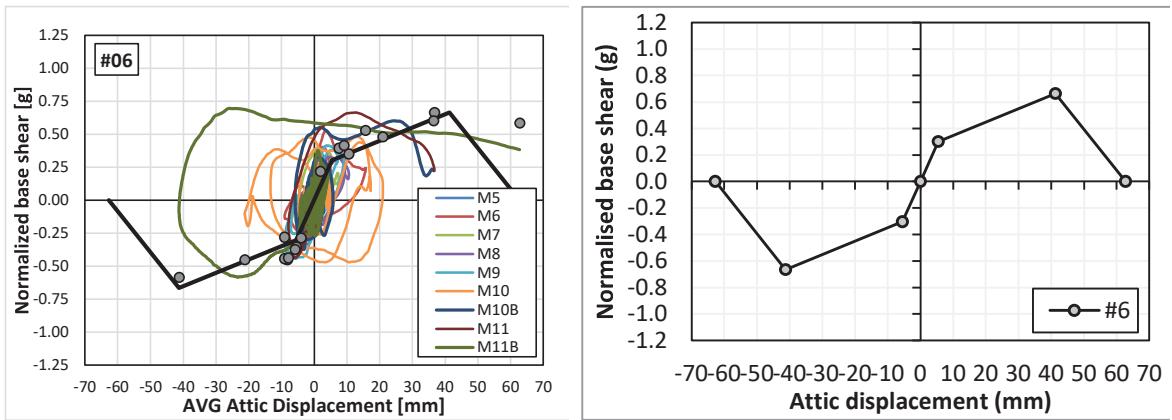
### Variation #04 - OOP Criteria 100 mm



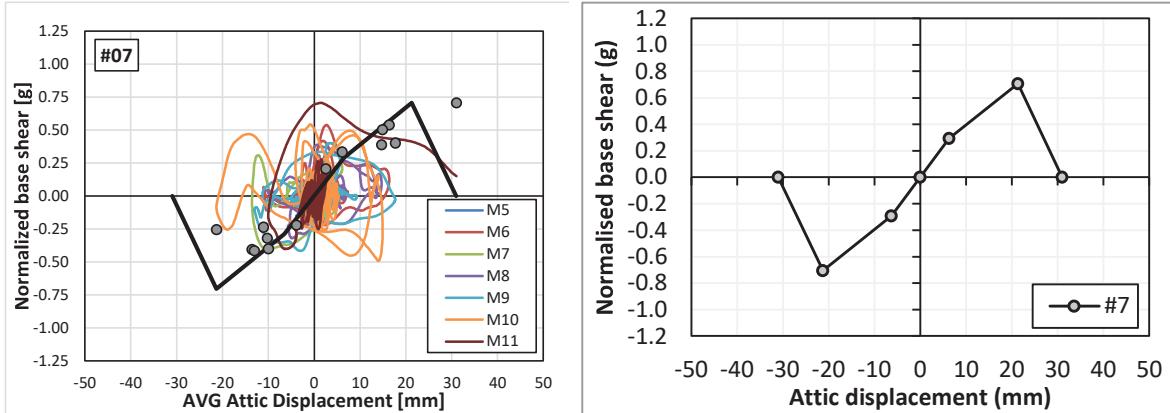
### Variation #05 - OOP Criteria 100 mm



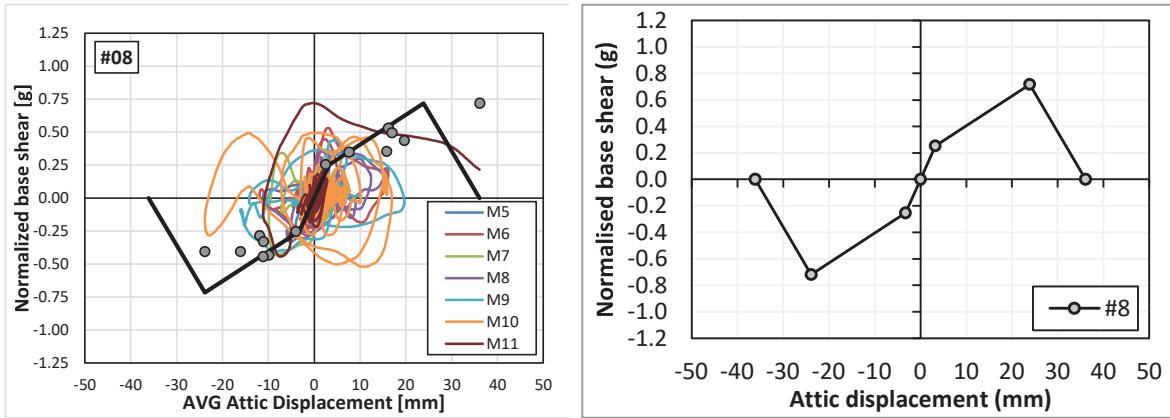
### Variation #06 - OOP Criteria 100 mm



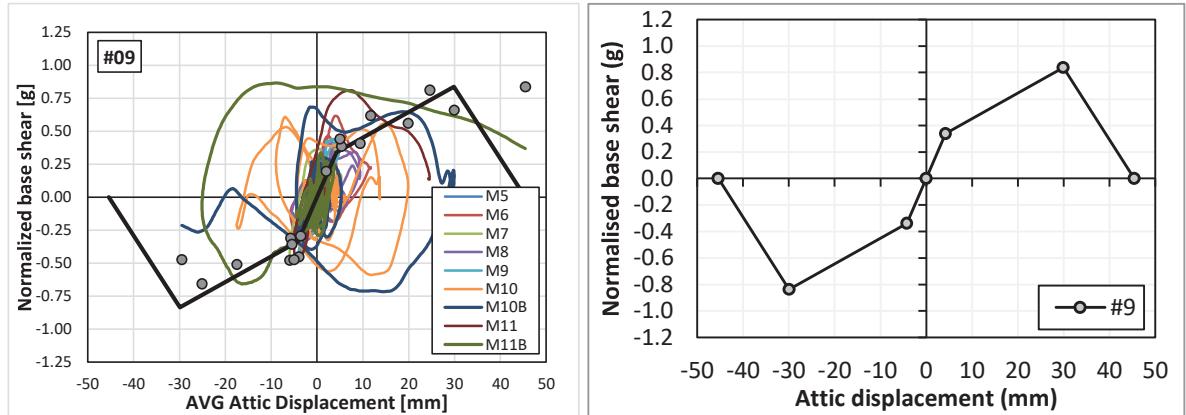
### Variation #07 - OOP Criteria 100 mm



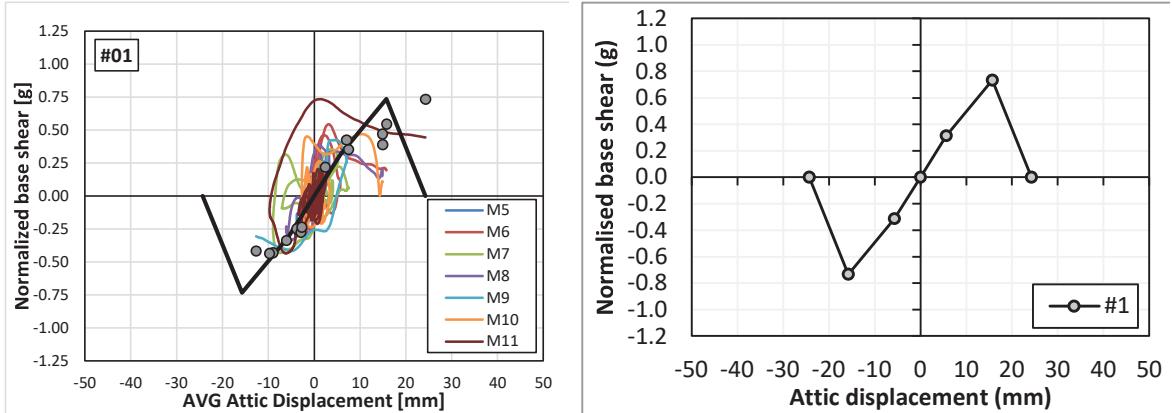
### Variation #08 - OOP Criteria 100 mm



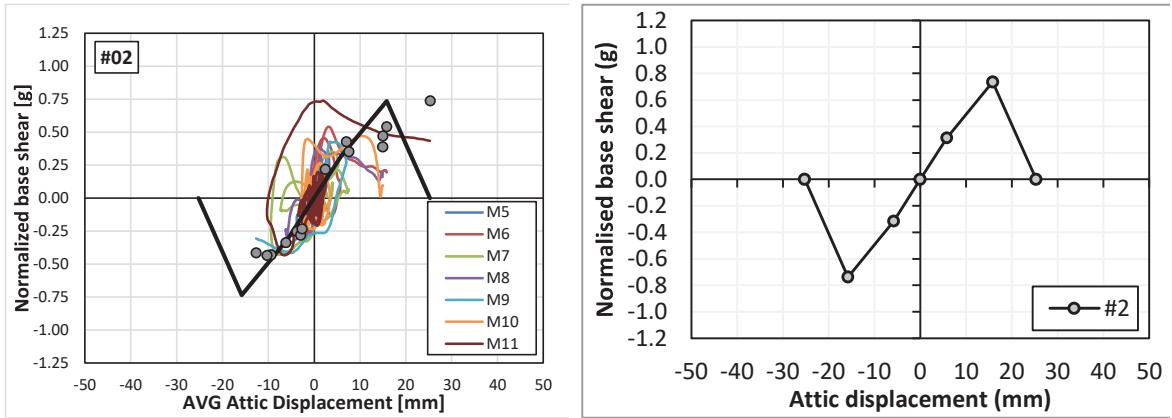
### Variation #09 - OOP Criteria 100 mm



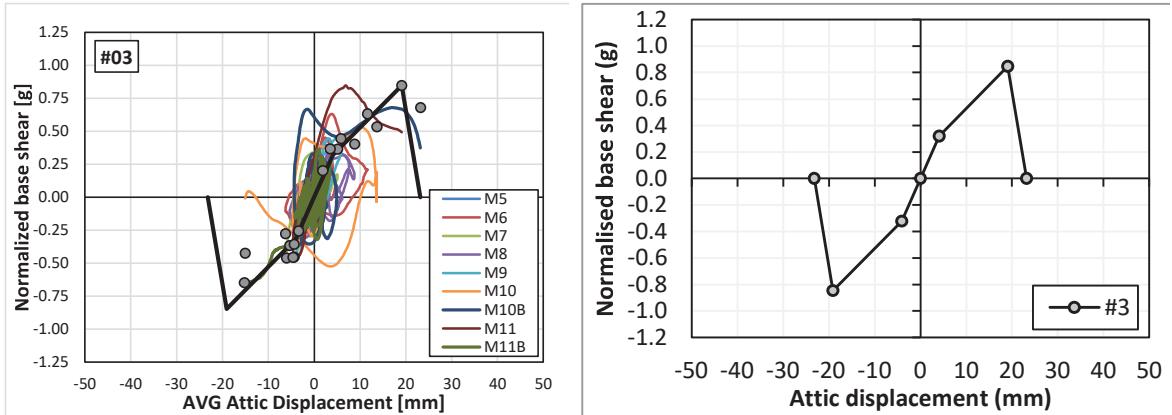
### Variation #01 - OOP Criteria 60 mm



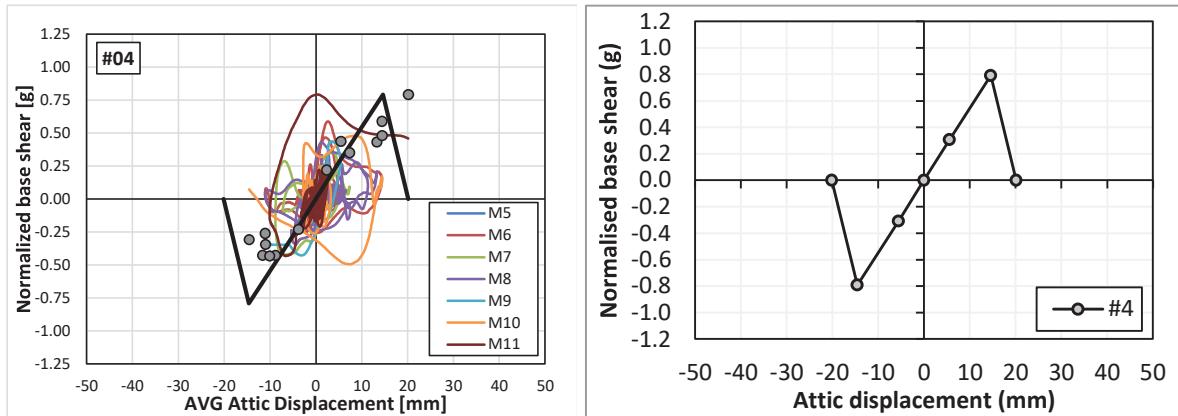
### Variation #02 - OOP Criteria 60 mm



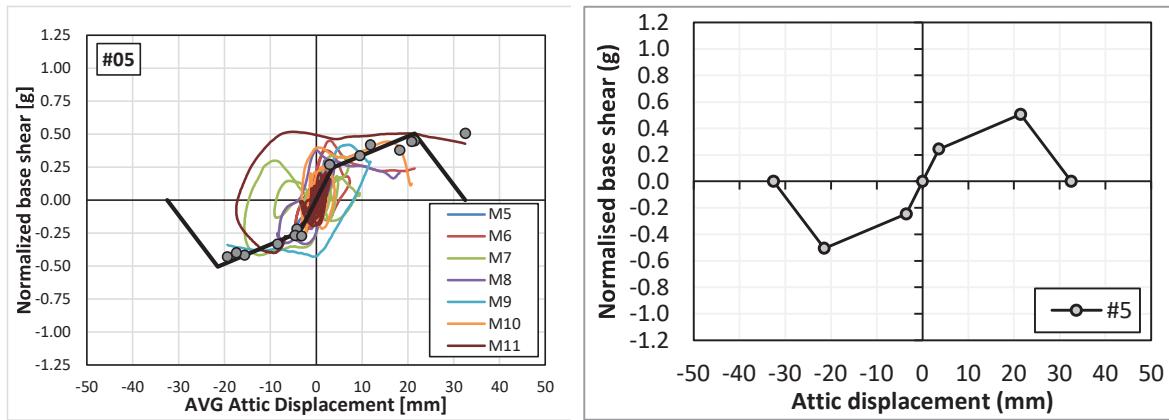
### Variation #03 - OOP Criteria 60 mm



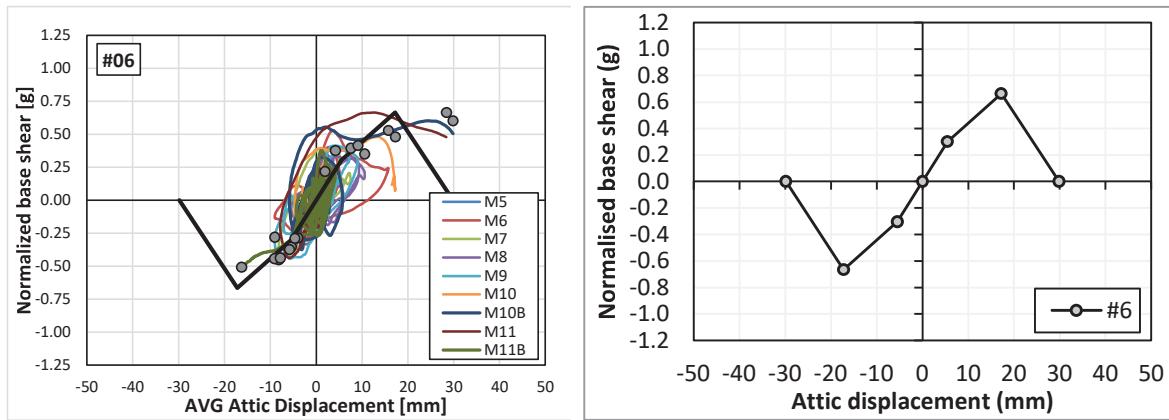
### Variation #04 - OOP Criteria 60 mm



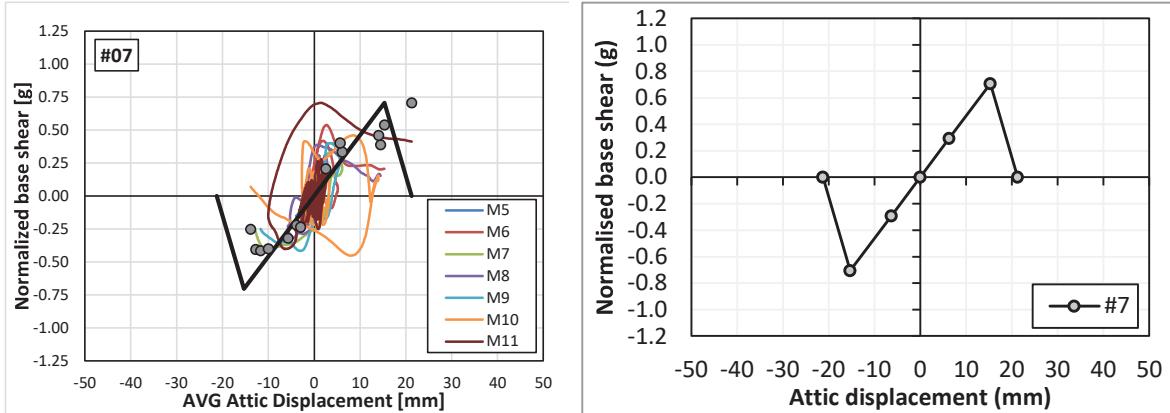
### Variation #05 - OOP Criteria 60 mm



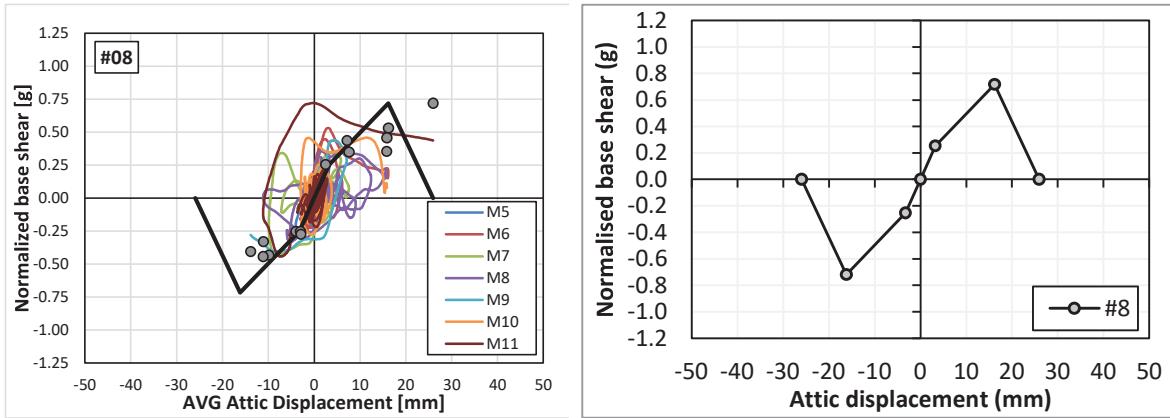
### Variation #06 - OOP Criteria 60 mm



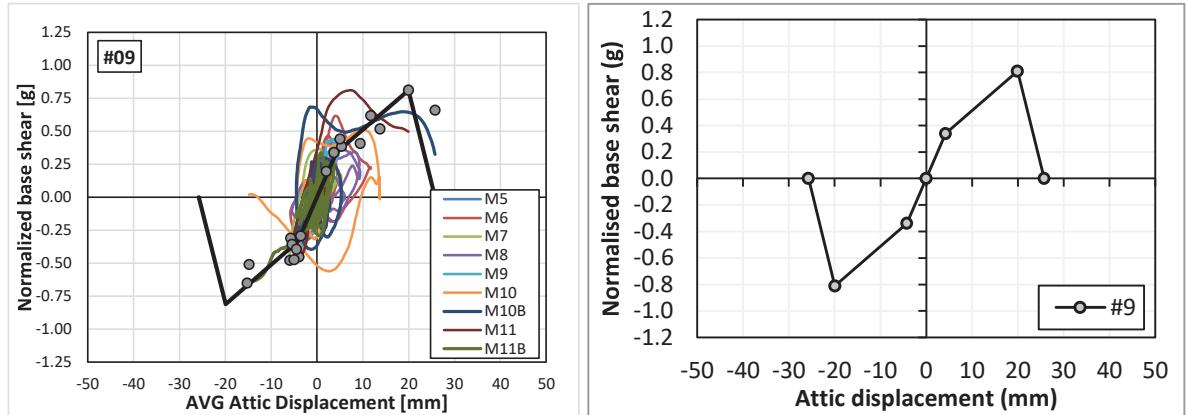
### Variation #07 - OOP Criteria 60 mm



### Variation #08 - OOP Criteria 60 mm

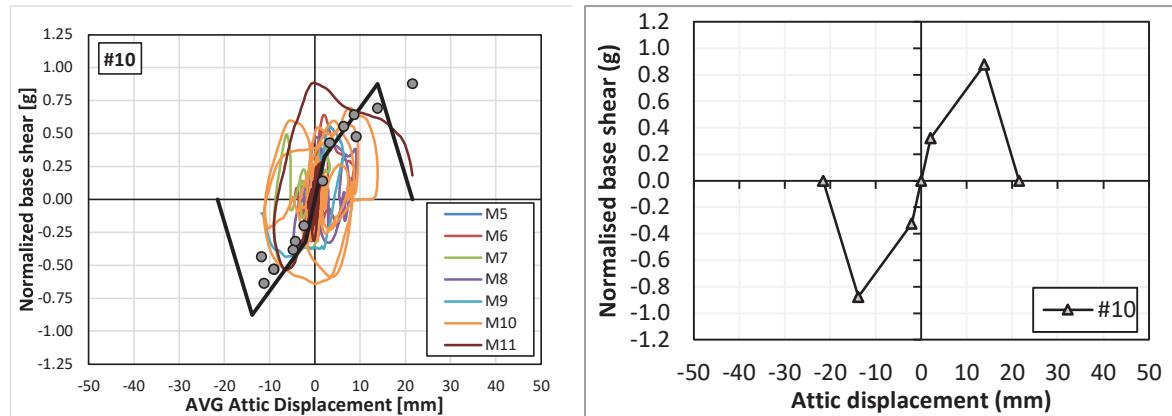


### Variation #09 - OOP Criteria 60 mm

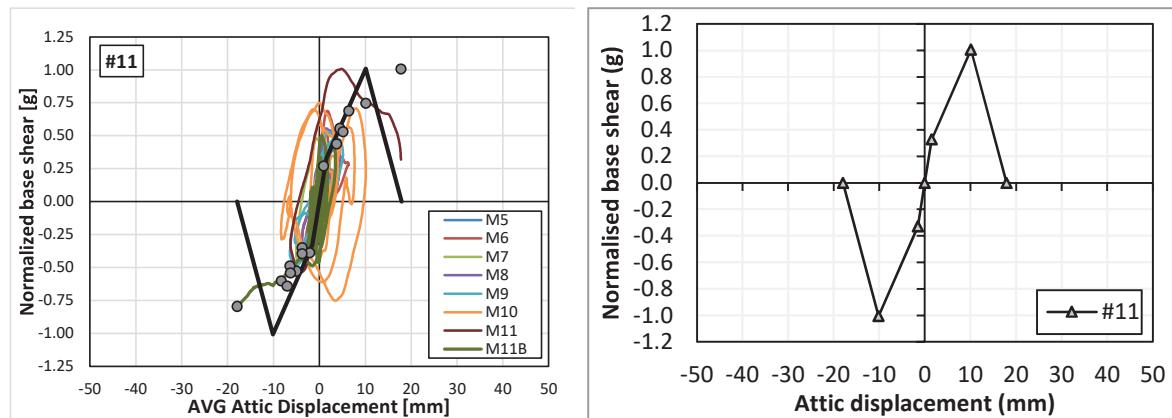


## Appendix D – Hysteretic curves for NLTHA of LNEC-BUILD-3

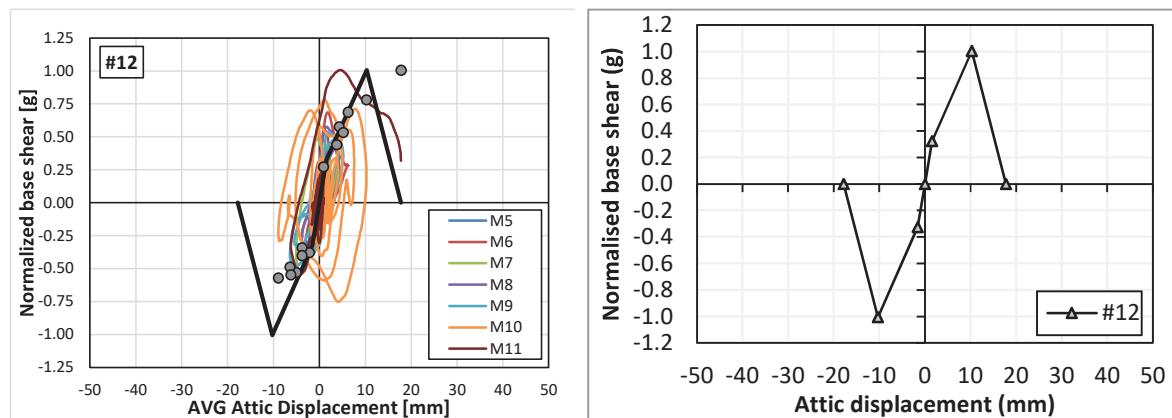
### Variation #10 - OOP Criteria 100 mm



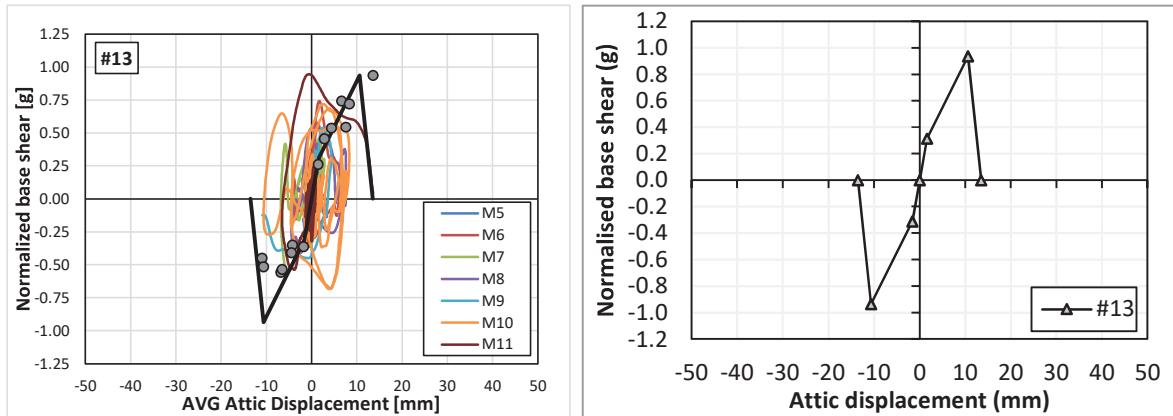
### Variation #11 - OOP Criteria 100 mm



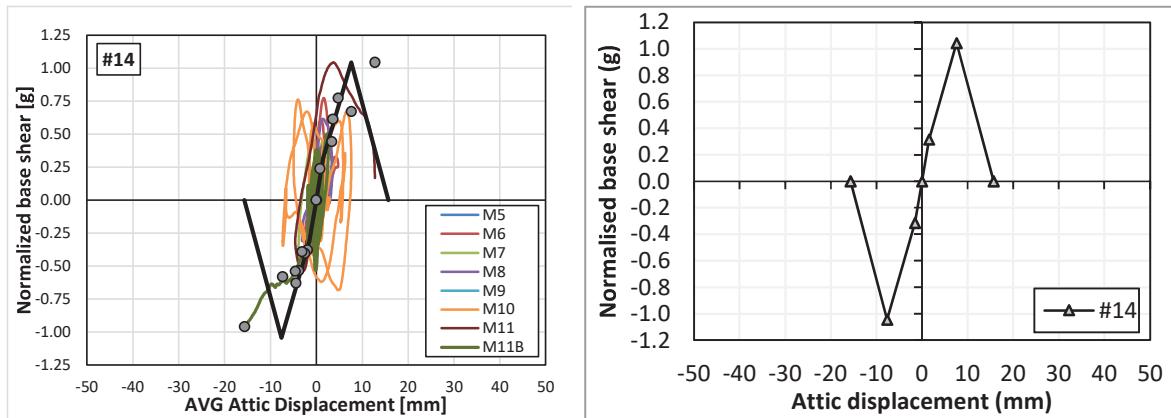
### Variation #12 - OOP Criteria 100 mm



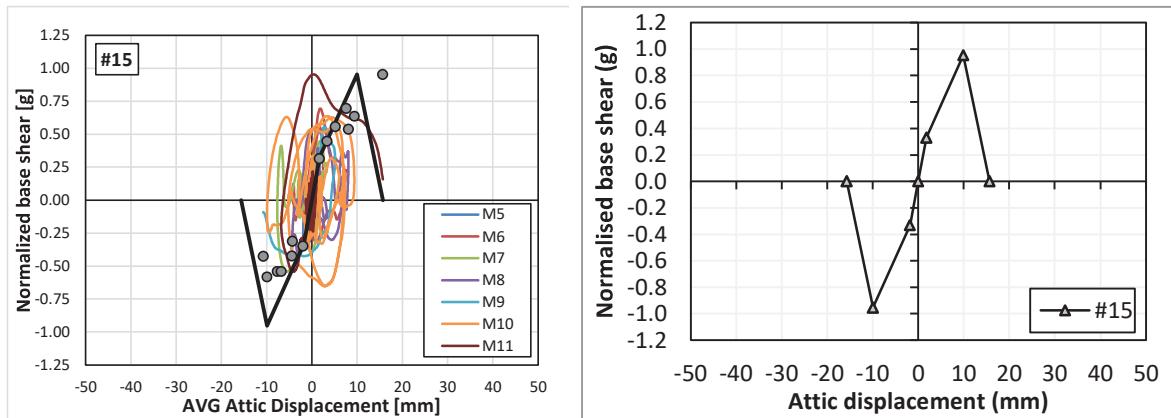
### Variation #13 - OOP Criteria 100 mm



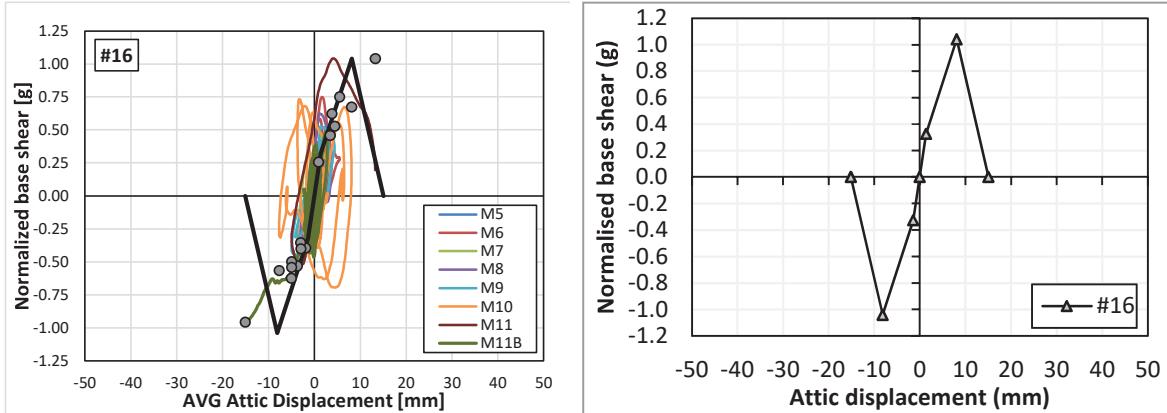
### Variation #14 - OOP Criteria 100 mm



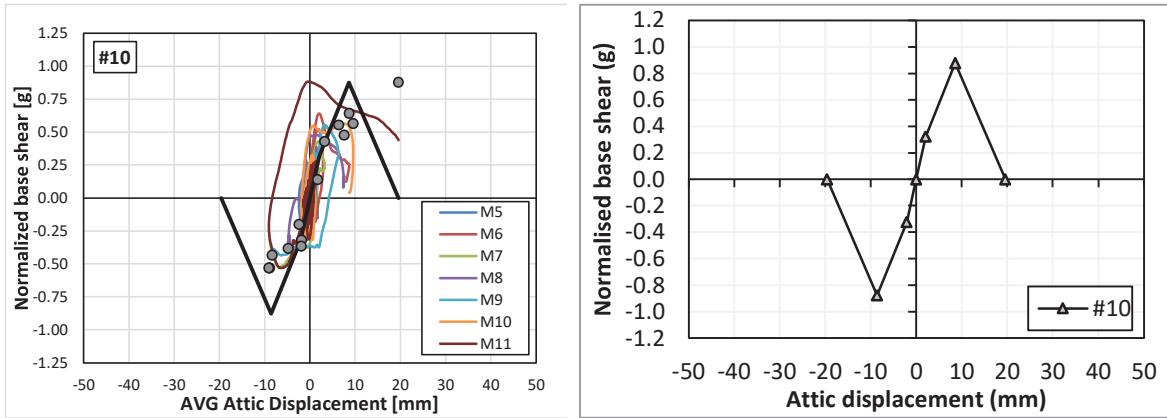
### Variation #15 - OOP Criteria 100 mm



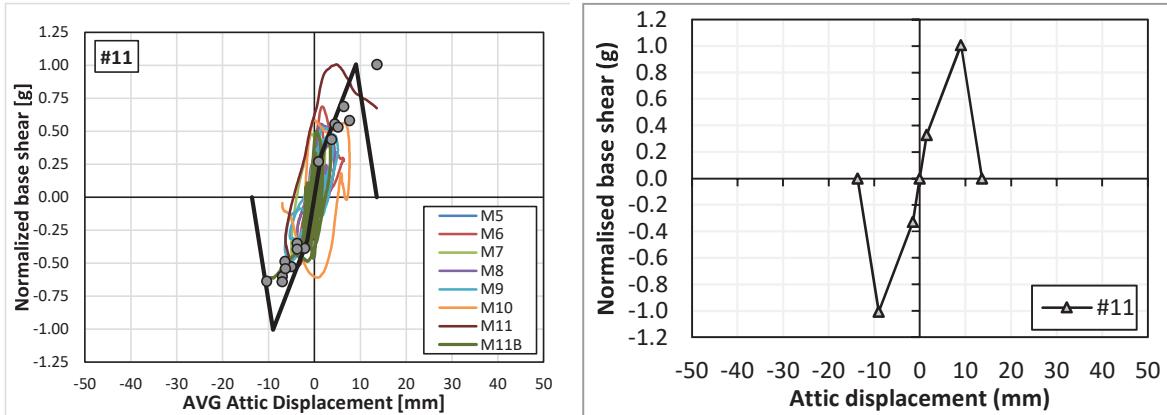
### Variation #16 - OOP Criteria 100 mm



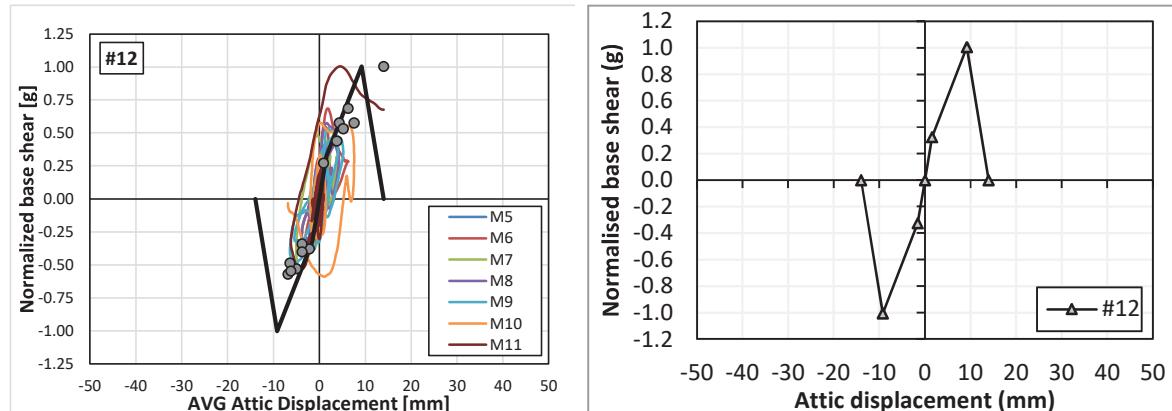
### Variation #10 - OOP Criteria 60 mm



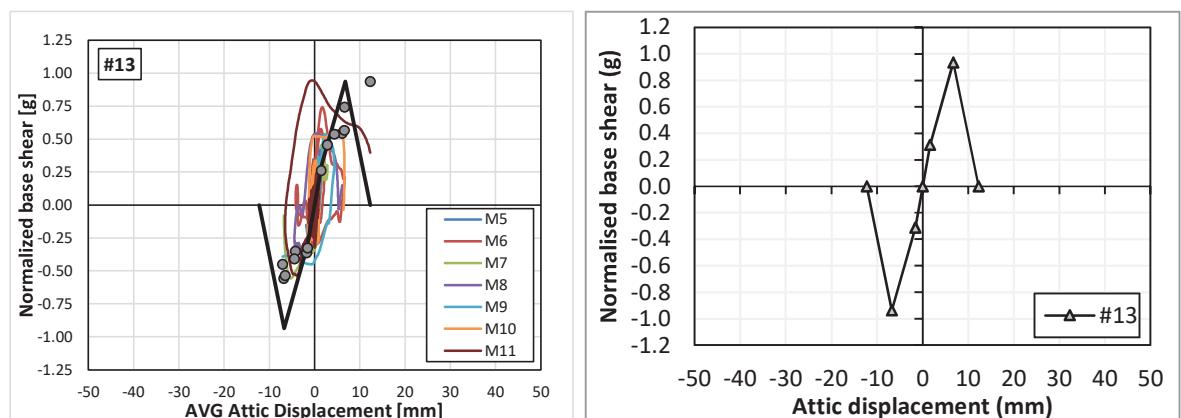
### Variation #11 - OOP Criteria 60 mm



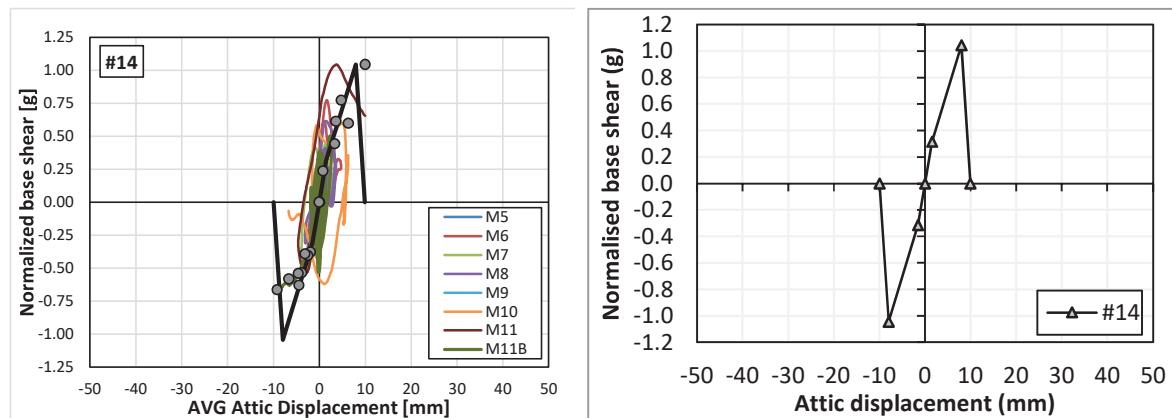
### Variation #12 - OOP Criteria 60 mm



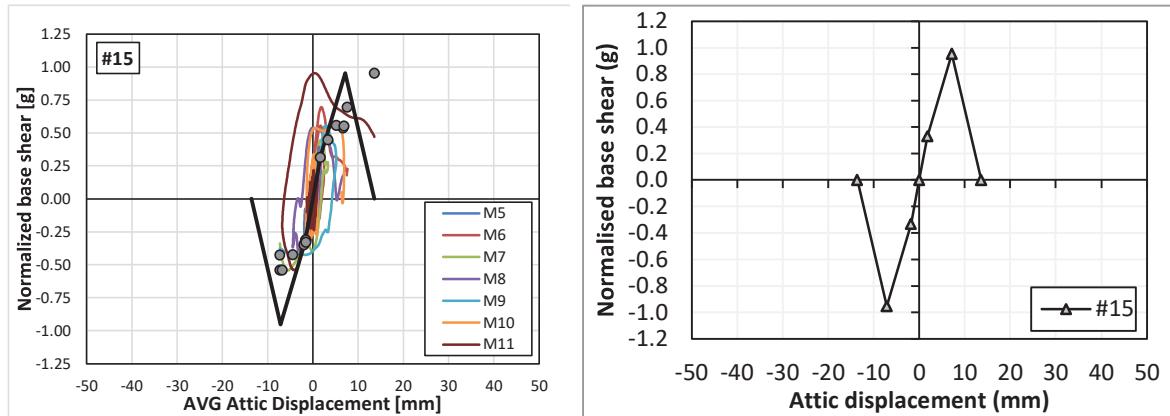
### Variation #13 - OOP Criteria 60 mm



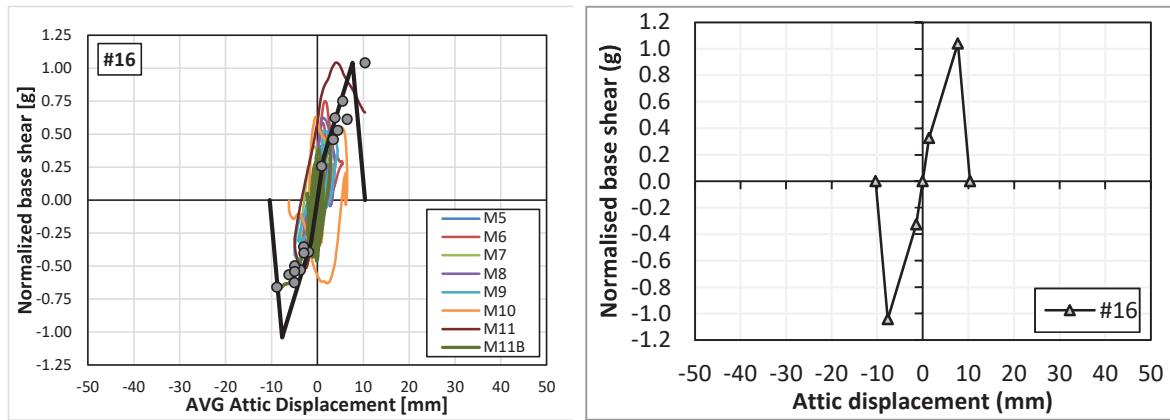
### Variation #14 - OOP Criteria 60 mm



### Variation #15 - OOP Criteria 60 mm



### Variation #16 - OOP Criteria 60 mm



## Appendix E – Comparison NLTHA of EUC-BUILD-2 of model with and without point interfaces

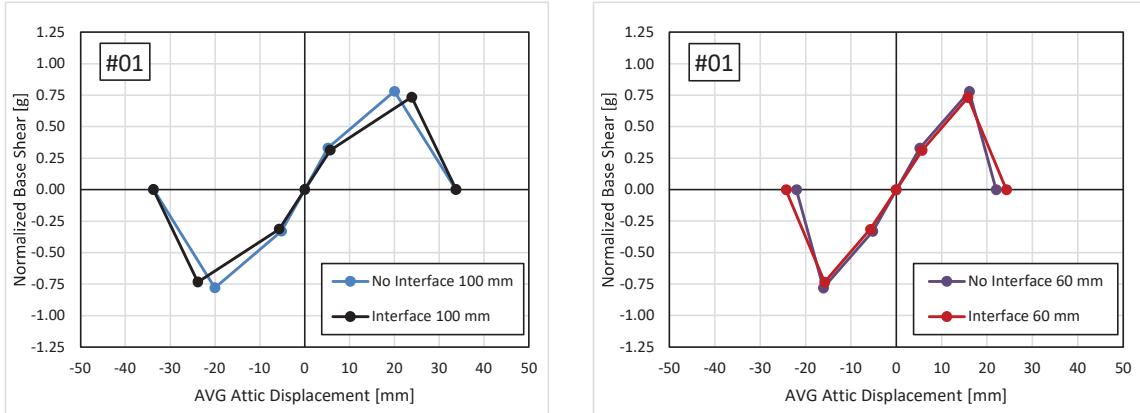
Table 9. Main outputs of the backbone curves for each variation of EUC-BUILD-2. OOP stop criteria equal to 100 mm. Comparison models with interface and without interface (in parenthesis).

Variation	K [kN/mm]	Cracking		Peak		Collapse	
		d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#01	12.20 (14.01)	5.69 (5.17)	0.31 (0.33)	23.85 (20.03)	0.73 (0.78)	33.75 (33.69)	0.0
#02	11.99 (13.99)	5.80 (5.19)	0.31 (0.33)	23.85 (20.10)	0.74 (0.78)	33.34 (33.85)	0.0
#03	17.37 (19.01)	4.10 (4.00)	0.32 (0.34)	27.55 (20.55)	0.85 (1.06)	43.25 (40.85)	0.0
#04	12.43 (14.83)	5.57 (4.75)	0.31 (0.32)	22.95 (18.84)	0.79 (0.85)	30.06 (29.55)	0.0
#05	14.97 (16.04)	3.56 (3.28)	0.24 (0.24)	27.93 (21.98)	0.51 (0.62)	44.70 (44.57)	0.0
#06	12.04 (19.22)	5.49 (3.69)	0.30 (0.32)	41.27 (30.97)	0.66 (0.81)	62.76 (49.36)	0.0
#07	10.29 (12.49)	6.32 (5.39)	0.29 (0.30)	21.32 (18.25)	0.71 (0.77)	31.01 (30.64)	0.0
#08	17.88 (19.75)	3.25 (3.01)	0.25 (0.26)	23.86 (22.56)	0.72 (0.77)	36.10 (37.34)	0.0
#09	18.50 (20.39)	4.21 (4.17)	0.34 (0.37)	29.92 (23.19)	0.84 (1.05)	45.44 (45.03)	0.0
<b>AVG.</b>	<b>14.19 (16.22)</b>	<b>4.89 (4.29)</b>	<b>0.30 (0.31)</b>	<b>26.94 (21.83)</b>	<b>0.73 (0.83)</b>	<b>40.05 (38.32)</b>	<b>0.0</b>
<b>Difference</b>	<b>-12.5%</b>	<b>+12.3%</b>	<b>-3.2%</b>	<b>+23.5%</b>	<b>-12.0%</b>	<b>+4.3%</b>	<b>-</b>

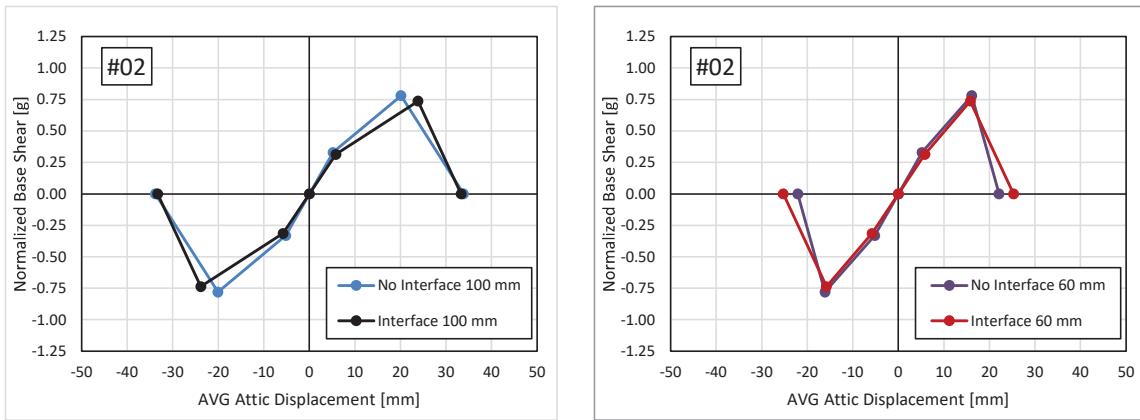
Table 10. Main outputs of the backbone curves for each variation of EUC-BUILD-2. OOP stop criteria equal to 60 mm. Comparison models with interface and without interface (in parenthesis).

Variation	K [kN/mm]	Cracking		Peak		Collapse	
		d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#01	12.20 (14.01)	5.69 (5.17)	0.31 (0.33)	15.77 (16.09)	0.73 (0.78)	24.29 (22.01)	0.0
#02	11.99 (13.99)	5.80 (5.19)	0.31 (0.33)	15.81 (16.13)	0.74 (0.78)	25.28 (22.10)	0.0
#03	17.37 (19.01)	4.10 (4.00)	0.32 (0.34)	19.08 (20.16)	0.85 (1.06)	23.17 (24.92)	0.0
#04	12.43 (14.83)	5.57 (4.75)	0.31 (0.32)	14.59 (15.78)	0.79 (0.85)	20.16 (19.85)	0.0
#05	14.97 (16.04)	3.56 (3.28)	0.24 (0.24)	21.47 (19.07)	0.51 (0.62)	32.52 (28.79)	0.0
#06	12.04 (19.22)	5.49 (3.69)	0.30 (0.32)	17.23 (26.08)	0.66 (0.81)	29.84 (29.48)	0.0
#07	10.29 (12.49)	6.32 (5.39)	0.29 (0.30)	15.32 (14.68)	0.71 (0.77)	21.26 (20.22)	0.0
#08	17.88 (19.75)	3.25 (3.01)	0.25 (0.26)	16.18 (17.36)	0.72 (0.77)	25.94 (24.49)	0.0
#09	18.50 (20.39)	4.21 (4.17)	0.34 (0.37)	19.93 (21.69)	0.81 (1.05)	25.75 (28.18)	0.0
<b>AVG.</b>	<b>14.19 (16.22)</b>	<b>4.89 (4.29)</b>	<b>0.30 (0.31)</b>	<b>17.26 (18.56)</b>	<b>0.72 (0.83)</b>	<b>25.36 (24.45)</b>	<b>0.0</b>
<b>Difference</b>	<b>-12.5%</b>	<b>+12.3%</b>	<b>-3.2%</b>	<b>-7.0%</b>	<b>-13.2%</b>	<b>+3.7%</b>	<b>-</b>

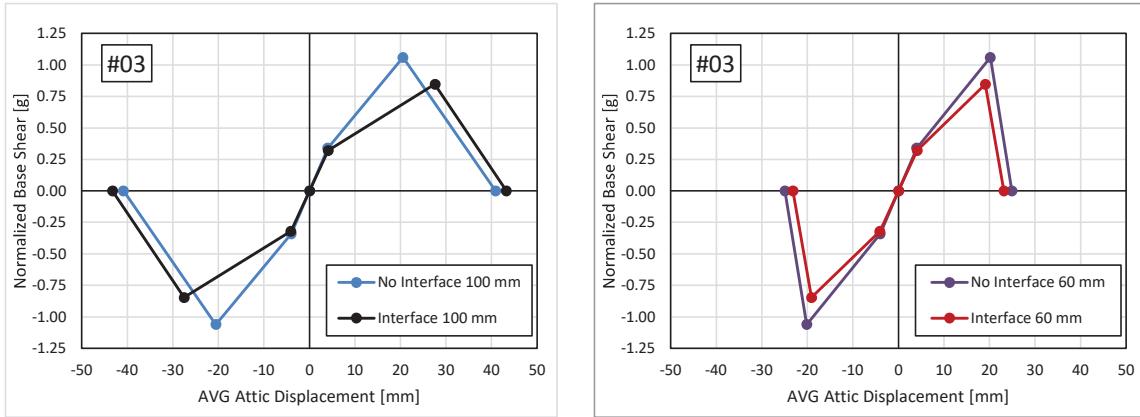
## Variation #01



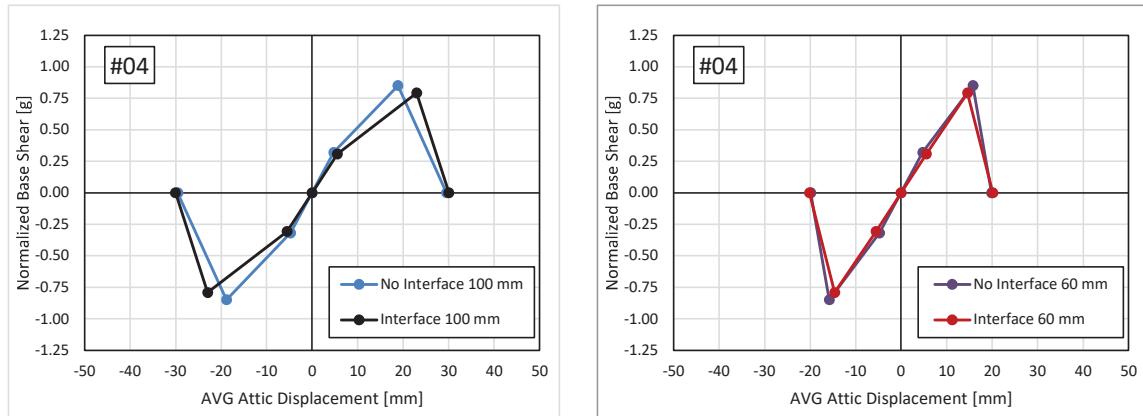
## Variation #02



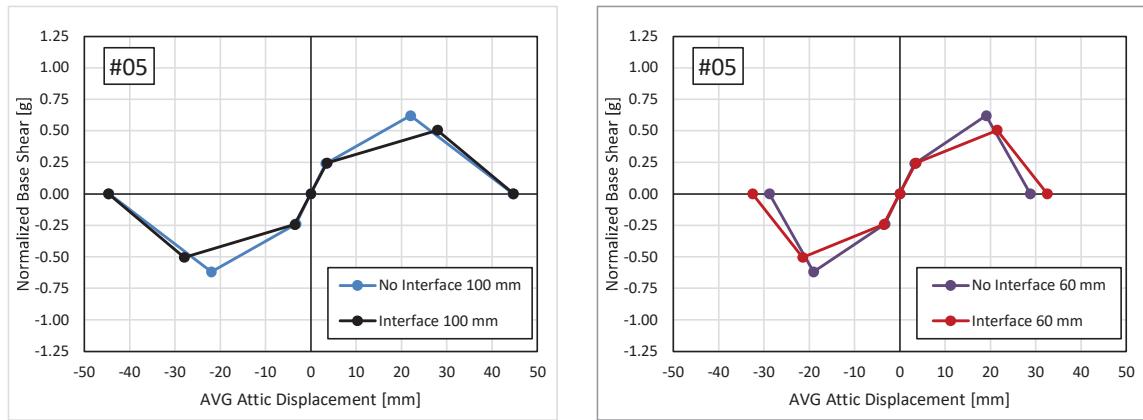
## Variation #03



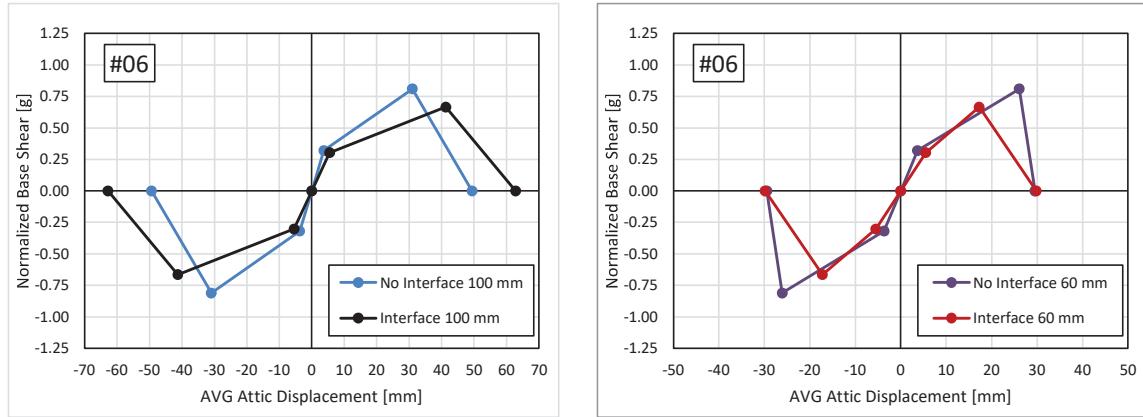
### Variation #04



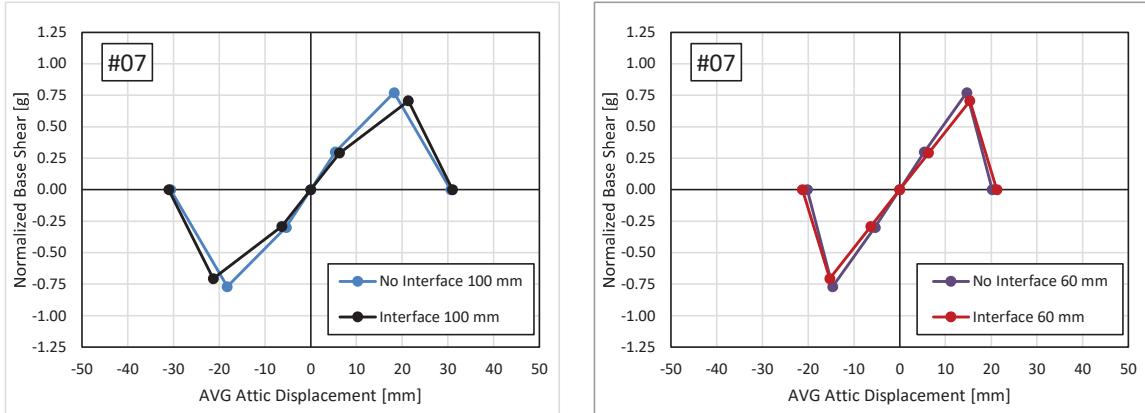
### Variation #05



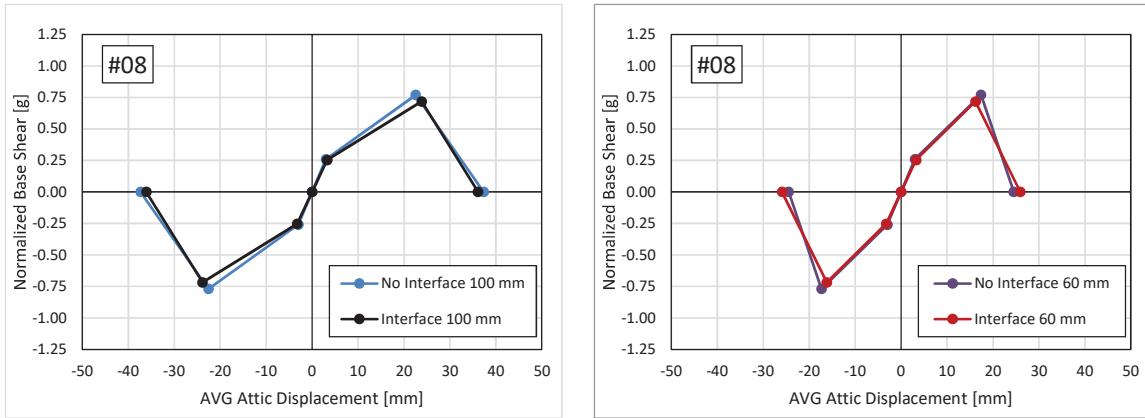
### Variation #06



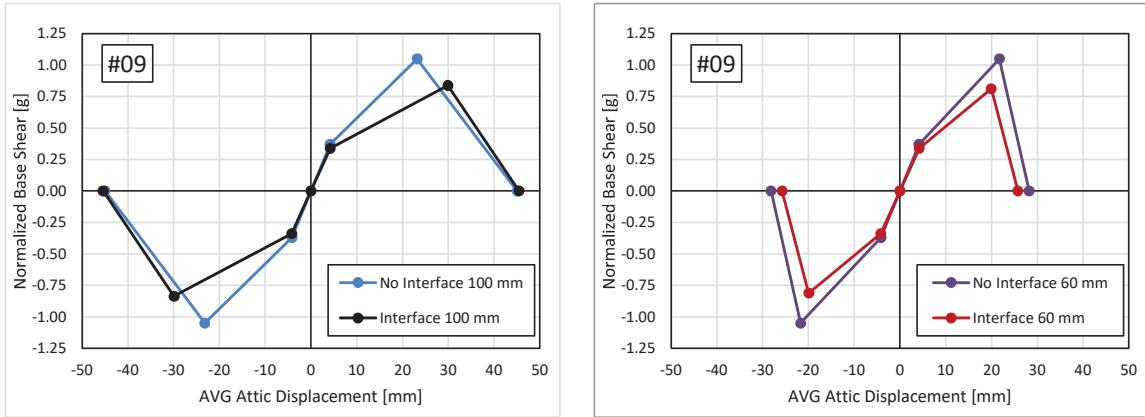
### Variation #07



### Variation #08



### Variation #09



## Appendix F – Comparison NLTHA of LNEC-BUILD-3 of model with and without point interfaces

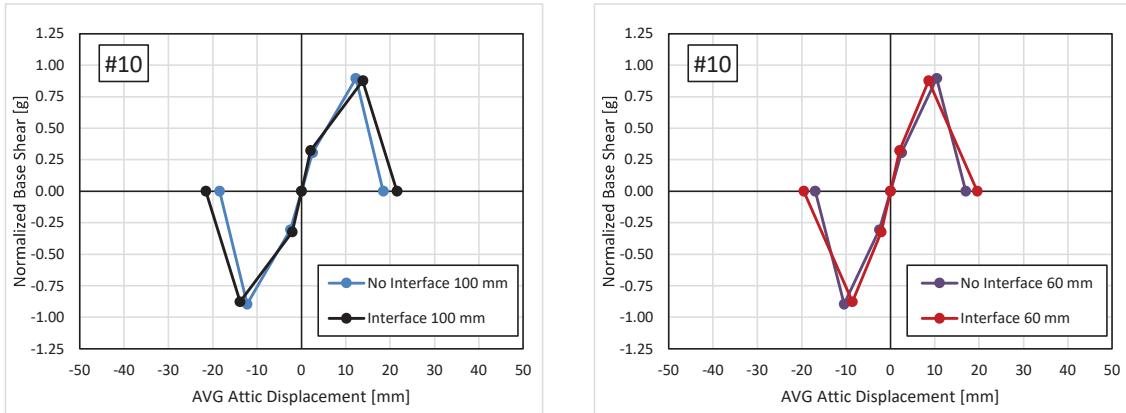
Table 11. Main outputs of the backbone curves for each variation of LNEC-BUILD-3. OOP stop criteria equal to 100 mm. Comparison models with interface and without interface (in parenthesis).

Variation	K [kN/mm]	Cracking		Peak		Collapse	
		d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#10	32.39 (25.49)	2.06 (2.48)	0.32 (0.31)	13.85 (12.25)	0.88 (0.90)	21.55 (18.44)	0.0
#11	44.56 (26.82)	1.53 (2.09)	0.33 (0.27)	10.12 (8.73)	1.01 (0.99)	17.94 (17.20)	0.0
#12	43.14 (26.83)	1.56 (2.06)	0.33 (0.27)	10.27 (8.81)	1.00 (1.00)	17.80 (17.36)	0.0
#13	40.74 (29.91)	1.61 (2.18)	0.31 (0.31)	10.63 (11.47)	0.94 (0.94)	13.53 (16.76)	0.0
#14	43.76 (29.62)	1.51 (1.95)	0.31 (0.27)	7.61 (7.96)	1.04 (1.02)	15.69 (16.01)	0.0
#15	38.73 (30.76)	1.80 (2.16)	0.33 (0.32)	9.94 (11.55)	0.95 (0.95)	15.67 (17.09)	0.0
#16	48.76 (29.64)	1.41 (1.95)	0.33 (0.27)	8.12 (7.75)	1.04 (1.06)	15.09 (15.09)	0.0
<b>AVG.</b>	<b>41.73 (28.44)</b>	<b>1.64 (2.12)</b>	<b>0.32 (0.29)</b>	<b>10.08 (9.79)</b>	<b>0.98 (0.98)</b>	<b>16.75 (16.85)</b>	<b>0.0</b>
<b>Difference</b>	<b>+46.7%</b>	<b>-22.6%</b>	<b>+10.3%</b>	<b>+3.0%</b>	<b>+0.0%</b>	<b>-0.6%</b>	<b>-</b>

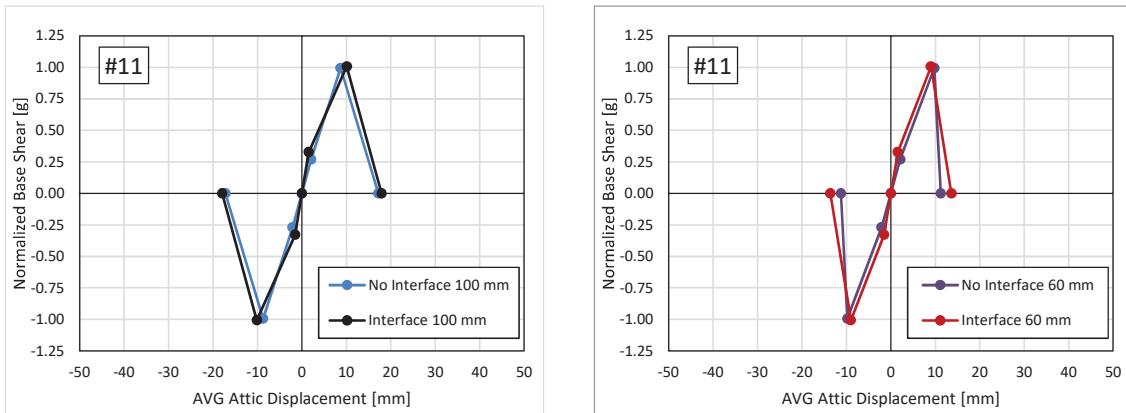
Table 12. Main outputs of the backbone curves for each variation of LNEC-BUILD-3. OOP stop criteria equal to 60 mm. Comparison models with interface and without interface (in parenthesis).

Variation	K [kN/mm]	Cracking		Peak		Collapse	
		d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]	d [mm]	v <sub>a</sub> [g]
#10	32.39 (25.49)	2.06 (2.48)	0.32 (0.31)	8.61 (10.42)	0.88 (0.90)	19.57 (16.99)	0.0
#11	44.56 (26.82)	1.53 (2.09)	0.33 (0.27)	9.01 (9.77)	1.01 (0.99)	13.63 (11.23)	0.0
#12	43.14 (26.83)	1.56 (2.06)	0.33 (0.27)	9.23 (9.99)	1.00 (1.00)	14.01 (11.32)	0.0
#13	40.74 (29.91)	1.61 (2.18)	0.31 (0.31)	6.75 (8.27)	0.94 (0.94)	12.27 (12.19)	0.0
#14	43.76 (29.62)	1.51 (1.95)	0.31 (0.27)	7.98 (8.86)	1.04 (1.02)	9.96 (10.18)	0.0
#15	38.73 (30.76)	1.80 (2.16)	0.33 (0.32)	7.15 (8.46)	0.95 (0.95)	13.60 (12.18)	0.0
#16	48.76 (29.64)	1.41 (1.95)	0.33 (0.27)	7.68 (8.69)	1.04 (1.06)	10.37 (10.29)	0.0
<b>AVG.</b>	<b>41.73 (28.44)</b>	<b>1.64 (2.12)</b>	<b>0.32 (0.29)</b>	<b>8.06 (9.21)</b>	<b>0.98 (0.98)</b>	<b>13.34 (12.06)</b>	<b>0.0</b>
<b>Difference</b>	<b>+46.7%</b>	<b>-22.6%</b>	<b>+10.3%</b>	<b>-12.5%</b>	<b>+0.0%</b>	<b>+10.6%</b>	<b>-</b>

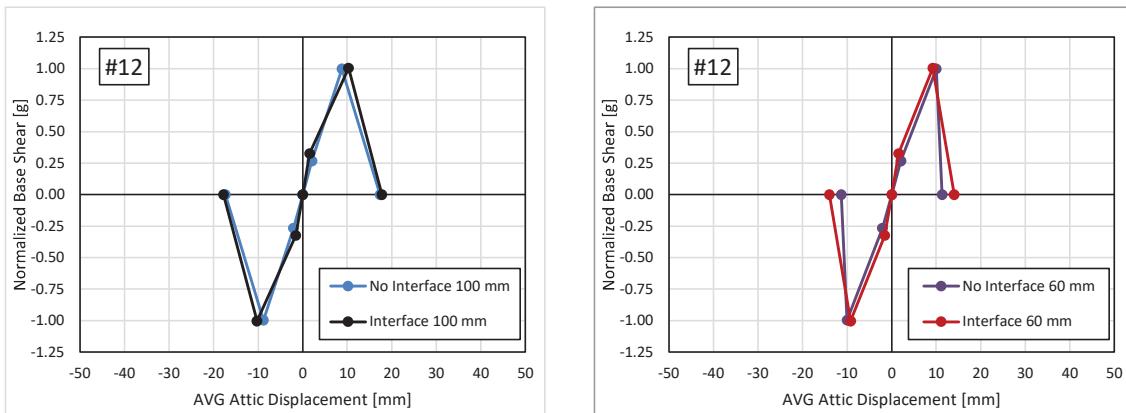
### Variation #10



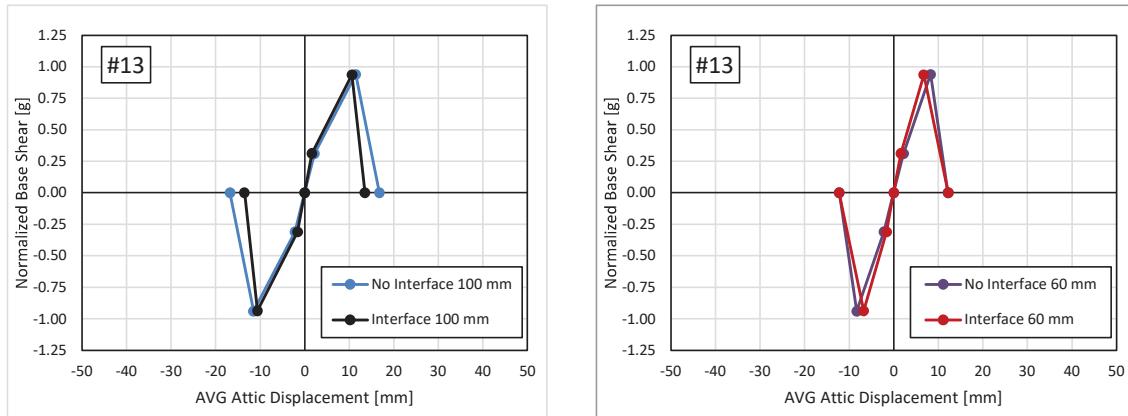
### Variation #11



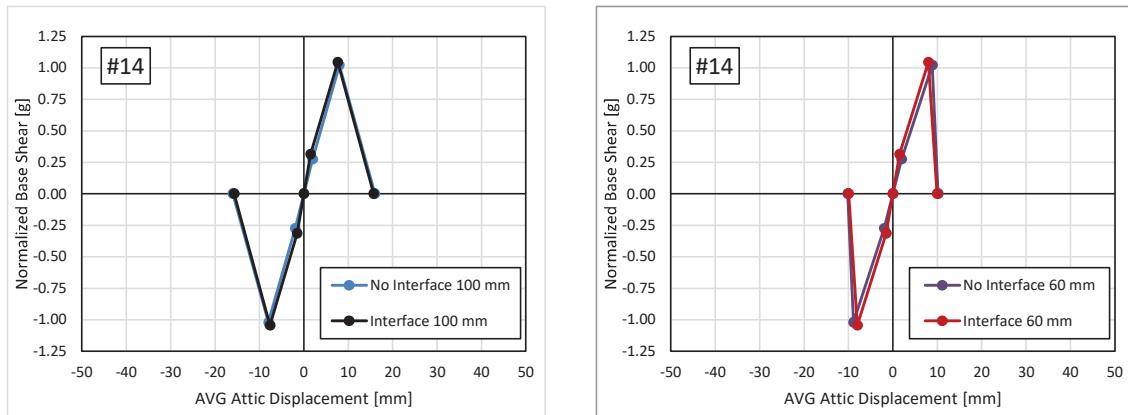
### Variation #12



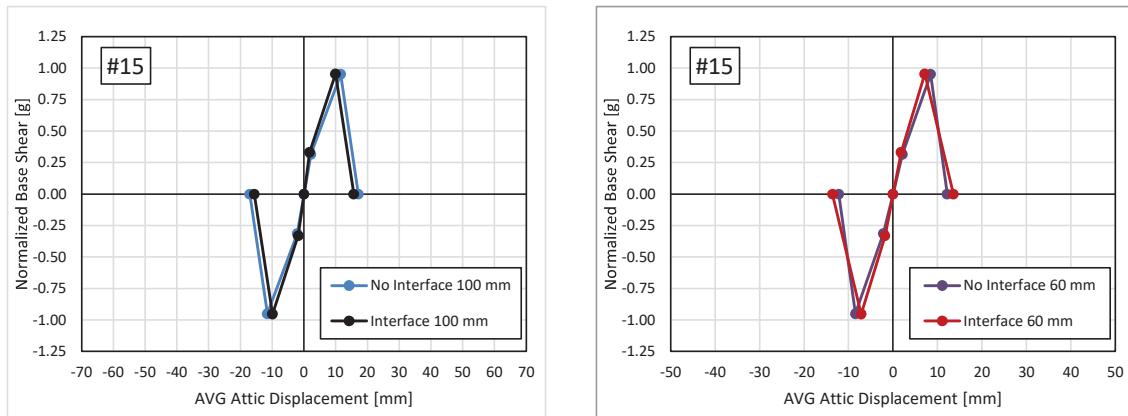
### Variation #13

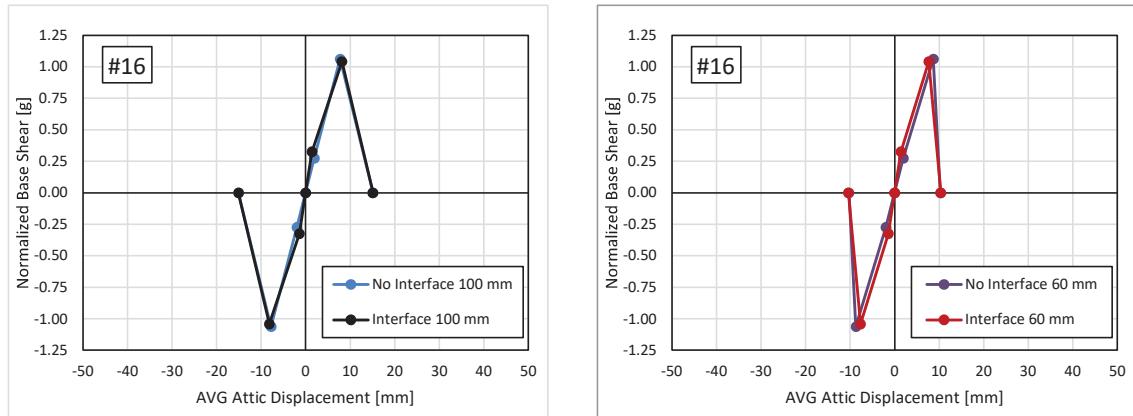


### Variation #14



### Variation #15



**Variation #16**

## D Effect van steens muren op het seismisch gedrag

Singla, A., Messali, F., Influence of the wall type and thickness on the seismic behaviour of a detached house, TU Delft Memorandum, 26 juni 2020

Date: 26 June 2020  
Authors: Anmol Singla; Francesco Messali  
E-mails: [A.Singla@tudelft.nl](mailto:A.Singla@tudelft.nl); [F.Messali@tudelft.nl](mailto:F.Messali@tudelft.nl)  
Document name: Influence of the floor type at first storey level on the seismic behaviour of a detached house  
Document type: Memorandum

---



## Influence of the wall type and thickness on the seismic behaviour of a detached house

### Introduction

For the 'Typology based assessment' of the building stock in Groningen, the self-standing (also called 'detached') houses with a gutter line at the height of the first storey level are grouped into the typology Metselwerk C. This typology is further divided in three sub-typologies: Metselwerk 5-6-7, depending on the characteristics of walls and floors. Namely, Metselwerk 5 is characterized by solid perimetral walls and timber floors, whereas Metselwerk 7 by cavity walls and timber floors. The study presented in this memorandum aims at investigating the influence of the different wall type (cavity walls and double-wythe solid walls) on the seismic response of a detached house with timber floor and roof. In other words, the memorandum studies the seismic performance of two similar buildings, one belonging to the sub-typology Metselwerk 5 and one to Metselwerk 7. To achieve this scope, this document presents a comparison between the outcomes of Nonlinear Time History (NLTH) analyses performed on two buildings that differ only for the wall type. The detached house considered in this study is the one used also to investigate the seismic behaviour of buildings belonging to typology Metselwerk 7 [1]. This building is based on specimen EUC-BUILD-2, tested on a shake table test at the laboratory of EUCENTRE (Pavia, Italy) in 2016 [1]. The specimen was designed to resemble a typical one-storey detached house with a pitched roof (Figure 1). The house is composed of a first-floor timber diaphragm and of a pitched timber roof finished with clay tiles. The timber floor and the roof framing members are supported by double-wythe solid clay URM walls. A gable is present on the front (North) and back (South) façade. More details regarding specimen EUC-BUILD-2 are provided in the testing report [2]. Unlike for the original EUC-BUILD-2, cavity walls made by solid clay bricks are considered in place of the original double-wythe walls: this structure, already considered in [1], is hereinafter called "Model A". The original EUC-BUILD-2 is also considered in this study and named "model B". It should be noted that Model A belongs to typology Metselwerk 7 and Model B to typology Metselwerk 5.

NLTH analyses are performed for the two cases (models A and B) by applying seven ground motions of increasing intensity at the base of the two structures. The ground motions are selected from those used for the Hazard and Risk study [3], and especially for the NLTHA performed by ARUP [4]. Only the stronger motions (M05 to M11) have been considered to have more information on the behaviour of

the building close to collapse. Each ground motion consists of three orthogonal components: two horizontal components (one, stronger, parallel to the East-West façades and one to North-South façades) and one vertical component. Additional information about the ground motions can be found in Appendix A of [1]. The obtained results are compared in terms of normalized base shear force-floor displacement curves, of backbone curves and of maximum out-of-plane deformations of the walls.



**Figure 1: Buildings with construction details similar to those adopted for the shake-table test specimen (from [2]), and actual specimen tested at the laboratory of Eucentre (from [5]).**

## Methodology

The same methodology described in section 3 of [1] (which reports a numerical investigation of building typology 'Metselwerk 7') is followed. Also the definitions of the displacement at near collapse and of the backbone curve are the same as presented in [1].

## Comparison between the outcomes of the NLTH analyses

The results of the NLTH analyses performed for models A and B are shown in Figure 2 for all the seven ground motions, in terms of normalised base shear force vs. average attic displacement curves. The figure shows also the points (represented as dark grey circles) derived for each motion to define the backbone curves of the two models, shown in Figure 3. The largest absolute out-of-plane (OOP) displacements of the walls, measured in the longitudinal (North-South) x-direction during ground motion 11 for Model A and during ground motion 10 for Model B, are shown in Figure 4. The maximum absolute deflections obtained for each ground motion are shown in the Appendix.

The response of both the buildings is qualitatively similar and characterised by large OOP displacements of both the North and South facade for the ground motions of larger intensity. However, the OOP displacements observed for Model B are consistently smaller than those in Model A (as shown in

Appendix), and they hardly reach 60 mm (Figure 4). Given the large thickness of the walls (200 mm), the facades are then still far from the point of near collapse. On the contrary, collapse is detected for Model A for ground motion M11 [1]. The differences highlighted above are consistently reflected by the hysteretic curves and the backbone curves of the two buildings. In fact, Models A and B reach at peak approximately the same normalized base shear forces, but the hysteretic curve of Model B for motion M11 continues until the end of the analyses and the backbone curve does not show a softening branch (and it is therefore incomplete), which could be computed only by performing additional NLTH analyses and applying ground motions of increased intensity. It should be noted that the value of the normalized base shear is already slightly higher than that measured experimentally for EUC-BUILD-2 (+4%); it is not expected that additional ground motions can increase largely the value of the normalized base shear at peak. However, significantly larger ductility can be obtained. Finally, Model B is also much stiffer, as expected for a building with thicker walls.

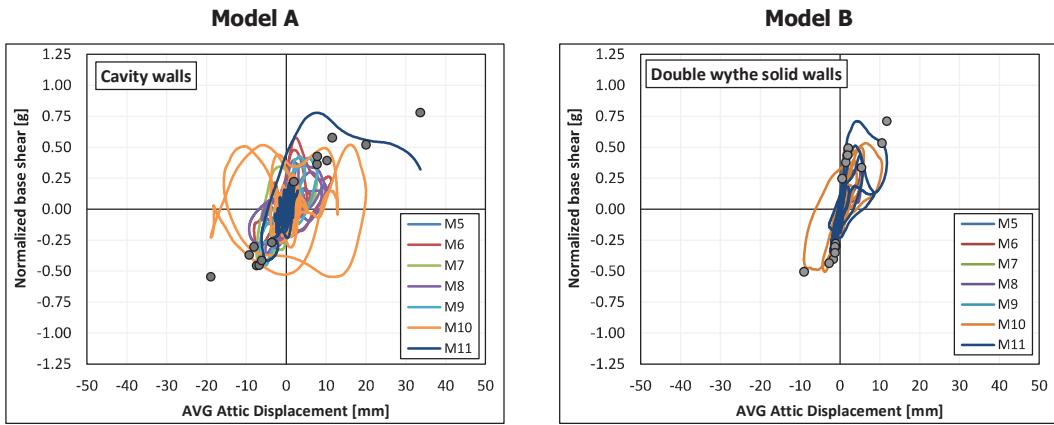


Figure 2. Normalized base shear – displacement curves for the NLTH analyses performed for models A and B

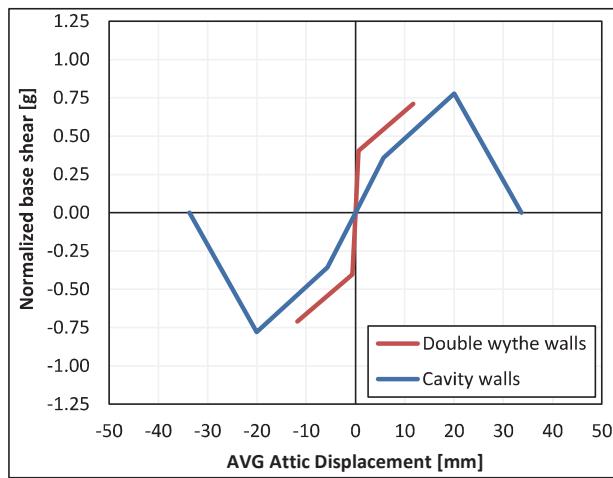


Figure 3. Backbone curves defined for the NLTH analyses performed for models A and B

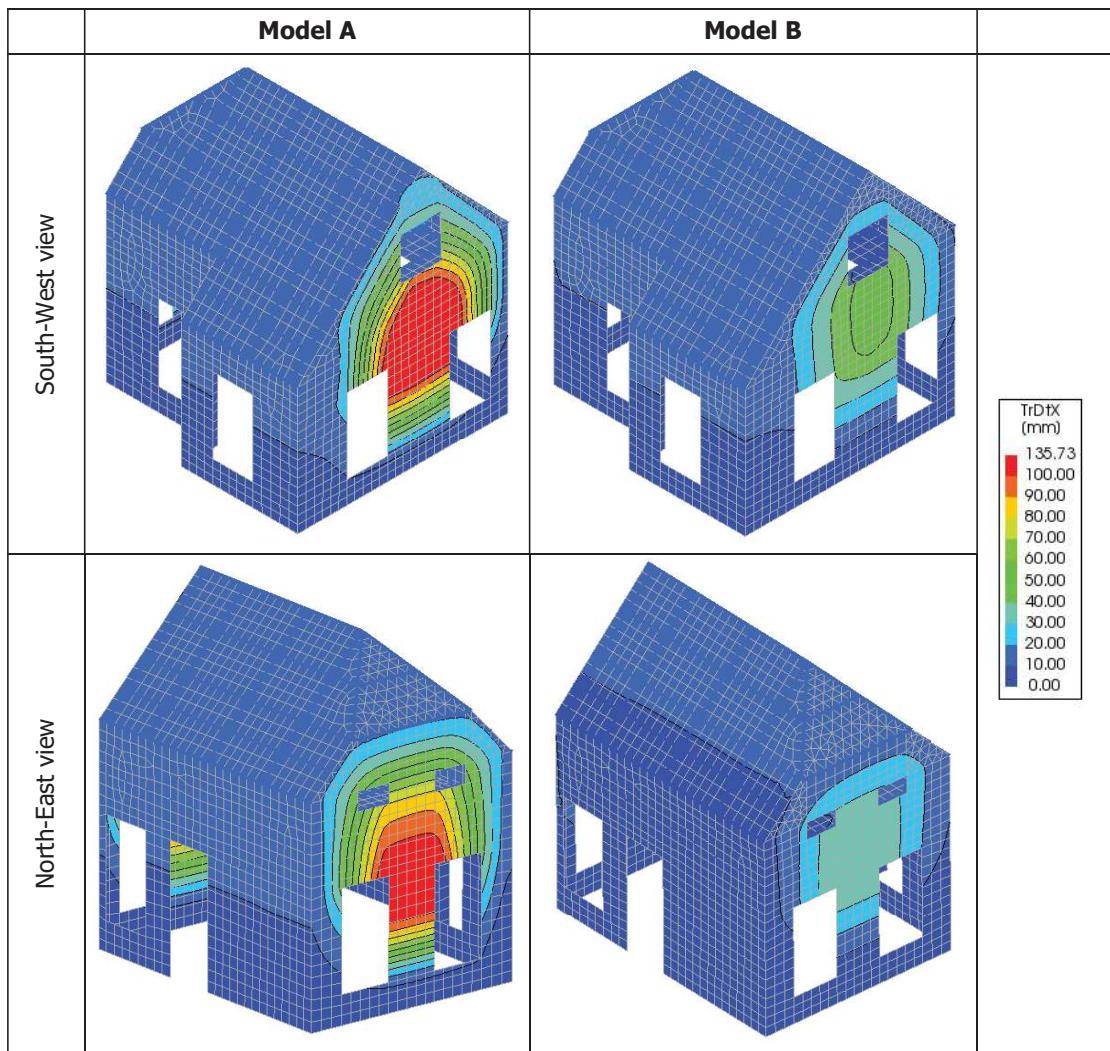


Figure 4. Maximum longitudinal (x-direction) displacements measured during ground motion 11 for Model A and during ground motion M10 for Model B, from two different perspectives

## **Conclusive remarks**

This study aims at investigating the influence of two different wall types (cavity walls and double-wythe solid walls) on the seismic response of a detached house with timber floor and roof. To achieve this scope, the terraced house used to investigate the seismic behaviour of buildings belonging to the typology Metserwerk 7 is considered also in this study. This building is a variation of specimen EUC-BUILD-2, where the original double-wythe solid walls have been replaced by cavity walls (Model A). The original building EUC-BUILD-2 is considered in this study (Model B), as variation to represent a building of typology Metserwerk 5. The seismic behaviour of the two models is investigated by comparing the outcomes of seven Nonlinear Time History (NLTH) analyses, which show several differences between the structural response of the two buildings to the applied ground motions.

In detail, although both models are characterised mainly by out-of-plane (OOP) displacements, these displacements determine the OOP collapse of the North and South facades only for Model A, whereas these walls are far from collapse for Model B. The absence of collapse for Model B is reflected also in its hysteretic and backbone curves. The latter does not have a final softening branch (unlike that of Model A) and it is therefore incomplete. The point of collapse for Model B may be computed only by performing additional NLTH analyses with ground motions of increased intensity. Those analyses may not increase largely the value of the normalised base shear at peak, but significantly larger values of the point of collapse may be found. Finally, Model B is also largely stiffer than Model A.

The remarks reported above suggest that the modelled detached house with double-wythe walls (Model B) is less vulnerable than the corresponding one with cavity walls (Model A) when subjected to the same set of ground motions.

## References

- [1] Messali, F., Longo, M. (2020). A numerical investigation of building typology 'Metselwerk 7'. Delft University of Technology. Report number 03, Version 01, 19 June 2020
- [2] Graziotti, F., Tomassetti, U., Rossi, A., Marchesi, B., Kallioras, S., Mandriola, M, Fragomeli, A., Mellia, E., Peloso, S., Cuppari, F., Guerrini, G., Penna, A., Magenes, G. (2016). Shaking table tests on a fullscale clay-brick masonry house representative of the Groningen building stock and related characterization tests. Report EUC128/2016U, EUCLCENTRE, Pavia, IT
- [3] Crowley, H., Pinho, R. (2020). Report on the Fragility and Consequence Models for the Groningen Field (Version 7). NAM report, March 2020
- [4] Merczel, D., Abeysekera, I., McVitty, W., Grant, D., Kluwer, R., (2017). Typology Modelling: Analysis Results in Support of Fragility Functions – 2017 Batch Results. NAM report, October 2017
- [5] Kallioras, S., Guerrini, G., Tomassetti, U., Peloso, S., & Graziotti, F. (2018). Dataset from the dynamic shake-table test of a full-scale unreinforced clay-masonry building with flexible timber diaphragms. Data in brief, 18, 629-640