











test - adviseert - deelt kennis in de bouw

Onderzoeksrapport: Samenvatting onderzoek naar aardbevingsbelasting bij houtskeletbouw en houtconstructies

Rapportcode: 15.0173-3

Datum: 19 april 2016

 <p>Nederlandse Branchevereniging voor de Timmerindustrie</p>	Nederlands Branchevereniging voor de Timmerindustrie (NBvT)
	VDM Woningen B.V.
	De Groot Vroomshoop B.V.
 <p>TOECK  bedenkt, tekent, realiseert</p>	Ingenieurs- en adviesbureau TOECK B.V.
 <p>TU/e Technische Universiteit Eindhoven University of Technology</p>	Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde
 <p>test - adviseert - deelt kennis in de bouw</p>	SHR
	SKH

SHR
"Het Cambium"
Nieuwe Kanaal 9b
Postbus 497
6700 AL Wageningen

Tel: 0317 – 467366
Fax: 0317 – 467399

E-mail: w.degroot@shr.nl / a.jorissen@shr.nl

Dit rapport heeft 29 bladen. Het is eigendom van de opdrachtgever, die gerechtigd is dit rapport integraal te publiceren. Gedeeltelijke publicatie, ook door de eigenaar, is slechts toegestaan na schriftelijke toestemming van SHR.

Opdrachtgever: NBvT
Nieuwe 's Gravelandsweg 16
1405 HM BUSSUM

Bijlage: 1

Projectnummer: 15.0173-3

Auteurs:



ir. W.H. de Groot
projectleider



prof. dr. ir. A.J.M. Jorissen
2^e auteur

Trefwoorden: Houtskeletbouw & houtconstructies en
aardbevingsbelastingen

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
1.1 Achtergrond	4
2 Samenvatting van de onderzoeken	10
2.1 Achtergrond	10
2.2 Voorbeeldberekening + cursus aardbevingsbelasting op HSB-wanden	12
2.3 Verdeling van de belasting over HSB-wanden	12
2.4 Constructieberekening van de woning + variantenonderzoek materialen	13
2.5 gedragsfactor (q) van HSB-wanden	18
2.6 Gedragsfactor (q) van DVW-buisverbindingen in gelamineerd hout.....	21
2.7 Gedragsfactor (q) van constructies in kruislaaghout	23
2.8 Inspectie houtconstructies Noord Oost Groningen.....	23
2.9 Literatuur.....	25
3 Conclusie	26
Literatuur.....	27
Bijlage 1: Stappenplan: berekening op aardbevingsbelasting volgens de 'Lateral force method'	29

1 Inleiding

Van de Nederlandse Branchevereniging voor de Timmerindustrie (NBvT) te Bussum is de opdracht ontvangen om onderzoek te doen naar houtskeletbouw en houtconstructies in combinatie met aardbevingsbelastingen. In het kader van de Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling, uitgeschreven door de Nederlands Aardolie Maatschappij (NAM), is financiële ondersteuning ontvangen voor uitvoering van onderdelen van de in dit rapport beschreven onderzoeken. Het rapport geeft een samenvattende beschrijving van de uitgevoerde onderzoeken naar houtskeletbouw en houtconstructies onder aardbevingsbelastingen.

1.1 Achtergrond

Als gevolg van de gasboringen in Noord Oost Groningen, uitgevoerd door de Nederlands Aardolie Maatschappij (NAM), treden er aardbevingen op in deze regio. In eerste instantie werd de relatie tussen het winnen van gas en de optredende aardbevingen niet onderkend. Langzamerhand is men zich meer bewust van de risico's en worden de eerste stappen gezet naar een oplossing. De tijdlijn in tabel 1 geeft de belangrijkste gebeurtenissen weer in de afgelopen periode. Naast het herstellen van de schade, het verstevigen van de huidige woningvoorraad is het uitvoeren van onderzoek een onderdeel van totale aanpak.

Tabel 1. Tijdlijn gebeurtenissen omtrent de aardbevingsproblematiek in Noord Oost Groningen. ¹

Datum	Gebeurtenis
8 augustus 2006	Aardbeving Middelstum (3,5 schaal Richter)
16 augustus 2012	Aardbeving Huizinge (3,6 schaal Richter)
11 februari 2013	Advies Staatstoezicht op de Mijnen aan minister Henk Kamp (22 januari 2013). Advies: gasproductie zo snel mogelijk terug in het belang van de veiligheid van de bewoners
1 november 2013	Rapport Commissie Meijer: 'Vertrouwen in een duurzame toekomst' Advies over elf maatregelen verdeeld over drie lijnen: <ul style="list-style-type: none">- Veiligheid en toekomstzekerheid voor inwoners en ondernemers- Kwaliteit van woon- en leefomgeving- Duurzaam economisch perspectief voor de regio
17 januari 2014	Bestuursakkoord 'Herstel van vertrouwen - Vertrouwen op herstel' Akkoord tussen negen aardbevingsgemeenten, Rijk en provincie waarbij de NAM 1,2 miljard euro beschikbaar stelt om de adviezen uit het rapport van de Commissie Meijer uit te werken. In het akkoord onder meer afspraken over:

Datum	Gebeurtenis
	<ul style="list-style-type: none">- veiligheid en preventief versterken huizen en gebouwen- onafhankelijke schade afhandeling (later belegd bij CVW)- middelen voor leefbaarheid (later uitgewerkt in drie leefbaarheidssporen)- middelen voor economische versterking (via Economic Board)- komst van Dialoogtafel
15 mei 2014	Interim advies Minister van Economische zaken
1 februari 2015	NPR 9998:2015 'groene versie' gepubliceerd voor commentaar [2]
9 februari 2015	Bestuurlijk akkoord over aanvullende maatregelen 'Herstel van vertrouwen-vertrouwen op herstel'
19 februari 2015	Publicatie Onderzoeksraad voor de veiligheid: Veiligheid van burgers is in de afgelopen jaren niet meegewogen in besluitvorming over gaswinning
20 april 2015	Uitkomst onderzoek naar gevolgen van Nederlandse Praktijkrichtlijn (NPR, richtlijn voor aardbevingsbestendig bouwen) voor aardbevingsgebied. Volgens de concept-bouwnormen moeten 152.000 bestaande woningen in het Groninger aardbevingsgebied worden versterkt.
1 mei 2015	Benoeming Hans Alders tot Nationaal Coördinator Groningen
23 juni 2015	Minister Kamp besluit de gaswinning voor de tweede helft van 2015 te verminderen tot 13,5 miljard kubieke meter.
4 november 2015	Nationaal Coördinator Groningen presenteert Concept-Meerjarenprogramma 'Aardbevingsbestendig en Kansrijk Groningen'.
18 december 2015	NPR 9998:2015 'witte versie' gepubliceerd [1]
18 december 2015	Het kabinet besluit om voor het jaar 2016 de gaswinning te beperken tot 27 miljard kubieke meter.

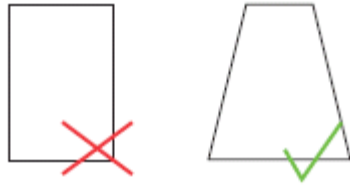
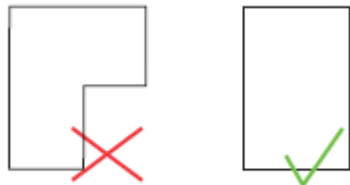
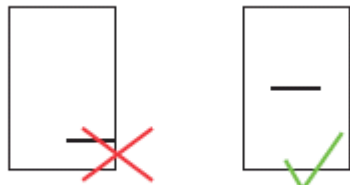

¹. zie: <http://www.provinciegroningen.nl/actueel/dossiers/aardbevingen/alles-op-een-rij/>

Op initiatief van de Nederlandse Branchevereniging voor de Timmerindustrie (NBvT) is er een projectteam aardbevingen samengesteld, bestaande uit de volgende partijen:

- VDM Woningen B.V. te Drogeham
- De Groot Vroomshoop B.V. te Vroomshoop
- Ingenieurs- en adviesbureau TOECK B.V. te Drachten
- Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Bouwkunde te Eindhoven
- SHR te Wageningen
- SKH te Wageningen
- Nederlandse Branchevereniging voor de Timmerindustrie (NBvT) te Bussum.

Door de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) is een pilot uitgeschreven met als doel het realiseren van aardbevingsbestendige nieuwbouw in Noordoost Groningen. De leidraad voor de Pilot is opgenomen in [3]. In het kader van deze pilot is door de samenwerkende partijen een startdocument geschreven met de titel: 'Realisatie van aardbevings-bestendige houtskeletbouw woningen' [4]. In dit document is het bouwkundig ontwerp van een rijwoning, een twee-onder-een-kapwoning en vrijstaande woning uitgewerkt. De plattegronden zijn samengesteld in nauw overleg tussen constructeur en architect. Hierbij zijn de principes voor aardbevingsbestendig ontwerpen gehanteerd zoals gegeven in tabel 2. De bouwkundige ontwerpen zijn opgenomen in figuur 1 t/m 3. In het startdocument is tevens een aanvraag opgenomen voor verschillende onderzoeksprojecten met bijbehorende beschrijving.

Tabel 2. Basisprincipes voor het bouwkundig ontwerpen van aardbevingsbestendige gebouwen.

<p>A: Gelijkmatische afname van de stijfheid over de hoogte.</p>	 <p>A</p>
<p>B: Gelijkmatische eenduidige hoofdvorm</p>	 <p>B</p>
<p>C: Het massamiddelpunt en het stijfheidsmiddelpunt komen met elkaar overeen</p>	 <p>C</p>
<p>Combinatie van A, B en C</p>	 <p>D</p>



Figuur 1 – Bouwkundig ontwerp: Rijwoningen.



Figuur 2 – Bouwkundig ontwerp: Twee onder een kap.



Figuur 3 – Bouwkundig ontwerp: Vrijstaande woning.

2 Samenvatting van de onderzoeken

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de tot nog toe uitgevoerde onderzoeken naar aardbevingsbelastingen bij houtskeletbouw en houtconstructies.

2.1 Achtergrond

In geval van een aardbeving wordt enkel gekeken naar de Uiterste Grenstoestand (UGT), de vervormingen worden niet beschouwd. Bij aardbevingen wordt deze grenstoestand beschreven als 'Near Collapse': de bouwconstructie staat vrijwel op instorten. Het laten optreden van grote plastische vervormingen zorgt ervoor dat constructies in staat zijn om de energie uit de aardbeving op te kunnen nemen. De rekenmethodes die hieraan ten grondslag liggen volgen daarom de plasticiteitsleer. In de constructeurswereld is men, vanwege de eenvoud, gewoon om lineair elastisch te rekenen. Middels een energievergelijking, bijvoorbeeld uitgewerkt in [5], wordt een koppeling gemaakt tussen deze twee rekenmethoden uitgedrukt in de gedragsfactor (q-factor). In feite wordt de totale belasting op funderingsniveau, bepaald volgens de lineaire elasticiteitstheorie door de q-factor gedeeld om zodoende de opneembare energie (volgens de werkelijk optredende plasticiteitstheorie) in rekening te brengen. Simpelweg geldt er dan ook: hoe groter de q-factor hoe meer energie de constructie kan opnemen hoe lager de krachten op het gebouw en hoe beter het gebouw in staat is aardbevingsbelastingen te weerstaan.

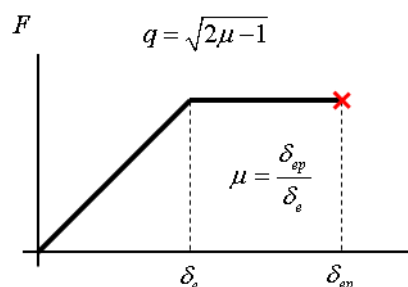
De ductiliteitsratio (μ) van een constructie, oftewel het vermogen om na een elastisch traject zonder afname van de opneembare belasting plastisch te kunnen vervormen, wordt uitgedrukt door de verhouding (zie figuur 4) tussen de elastische (δ_e) en de plastische vervorming (δ_{ep}):

$$\mu = \frac{\delta_{ep}}{\delta_e} \quad [1]$$

Met behulp van de hiervoor genoemde energievergelijking [5] is vervolgens de q-factor te berekenen:

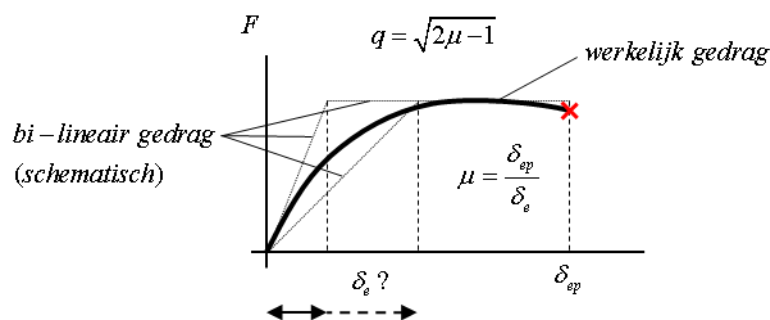
$$q = \sqrt{2\mu - 1} \quad [2]$$

Bovenstaande geldt voor een zuiver bi-lineair gedrag zoals schematisch weergegeven in figuur 4.



Figuur 4 – Schematische weergave gedragsfactor.

Hout belast door buiging breekt bros en heeft daarmee geen ductiel vermogen. Echter zijn houtconstructies via verbindingen met slanke stiftvormige verbindingsmiddelen (zie NPR 9998 voor de eisen te stellen aan slanke verbindingsmiddelen) zeer goed in staat grote plastische vervormingen te ondergaan zonder noemenswaardige afname van de draagcapaciteit. Om onverwacht bezwijken te voorkomen worden de bros bezwijkende delen overgedimensioneerd door een zogenaamde 'oversterkte-factor' in rekening te brengen. Het gedrag van slanke houtverbindingen is echter zelden zuiver bi-lineair. Er ontstaat eerst een elastisch traject, daarna een elasto-plastisch traject om vervolgens in stijfheid af te nemen voordat bezwijken optreedt. Tussen de verschillende stadia vindt een vloeiende overgang plaats, zodat het schematische weergegeven beeld in figuur 5 ontstaat.



Figuur 5 – Schematische weergave kracht-verplaatsingsdiagram bij houtconstructies, zonder eenduidig vloeipunt (δ_e).

Het eenduidig vaststellen van een vloeipunt (δ_e) is voor de situatie in figuur 5 niet eenvoudig mogelijk, waardoor er grote verschillen kunnen ontstaan in de ductiliteitsratio en de q-factor, met grote verschillen in de belasting veroorzaakt door aardbevingen tot gevolg. Een groot deel van het internationale onderzoek richt zich dan ook op deze cruciale vraag: het bepalen van de q-factor.

Om deze vraag te beantwoorden worden er in de onderzoeken experimenten uitgevoerd, theoretische analyses opgesteld en berekeningen met gespecialiseerde software uitgevoerd. Een beschrijving van deze onderzoeken wordt gegeven in de volgende paragrafen.

Opmerking: Mede om de hiervoor beschreven redenen omtrent plasticiteit en om sociaal economische redenen wordt in het algemeen, dus voor alle typen constructies (staal, beton, metselwerk en houtconstructies) enkel ontworpen op het Near Collapse stadium: *nét* niet bezwijken van de constructie in geval van een aardbeving. Het voorkomen van menselijke slachtoffers is hierbij het hoofddoel. Na de aardbeving wordt het gebouw economisch afgeschreven, het is zelfs niet meer in staat om naschokken op te kunnen vangen. Enkel gebouwen met een cruciale functie voor de samenleving, zoals bijvoorbeeld een ziekenhuis, worden ontworpen om na een aardbeving te kunnen blijven functioneren.

2.2 Voorbeeldberekening + cursus aardbevingsbelasting op HSB-wanden

In opdracht van het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) is een voorbeeldberekening opgesteld voor het dimensioneren van een houtskeletbouw woning op aardbevingsbelastingen. [6] Deze berekening geldt als toelichting op het verschijnen van de NPR 9998 'Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: geïnduceerde aardbevingen'. Om de berekening zo inzichtelijk mogelijk te maken is er voor gekozen om uit te gaan van één stabiliteitswand opgebouwd uit één volledige plaat. De voorbeeldberekening en de NPR 9998 komen aan bod tijdens de cursus 'Training Aardbevingsbestendig bouwen voor constructeurs en bouwkundig ontwerpers (3 dagen)' georganiseerd voor NEN in het Hampshire Hotel in Groningen. Naar aanleiding van het verschijnen van de witte versie van de NPR 9998 in december 2015 is afgelopen februari de cursus wederom georganiseerd. De voorbeeldberekening is te downloaden via:

<https://www.nen.nl/NEN-Shop/Eurocodes/Veilige-constructies-bij-aardbevingen.htm>

2.3 Verdeling van de belasting over HSB-wanden

Houtskeletbouwwanden in een gebouw worden, volgend uit het ontwerp, toegepast in verschillende afmetingen. Voor dimensionering op windbelasting worden zoveel mogelijk wanden, met een minimale lengte van 600 mm, meegenomen in de constructieberekening zodat de afschuifbelasting per strekkende meter zo laag mogelijk is. De belasting over de wanden wordt verdeeld naar rato van de lengte. Op deze wijze loont het om korte wanden mee te nemen in de berekening. Bij aardbevingen met HSB-wanden voorzien van wandgrote platen ontstaat er echter een andere situatie. Door de koppeling van de wanden op het bovengelige vloerniveau krijgen alle wanden dezelfde verplaatsing. Als gevolg hiervan zal de langste wand, welke de meeste stijfheid bezit, de meeste belasting afdragen. Relatief dragen de kortere wanden (uitgaande van wandgrote beplating) minder bij aan de belastingafdracht. Naar de werkelijke verdeling van de belasting over de wanden, in geval van aardbeving, is in dit onderzoek een oriënterend analytisch onderzoek uitgevoerd. De stijfheid van de wanden is in principe niet-lineair, waarmee de verdeling van de belasting ook niet-lineair is. Dit probleem is enkel op te lossen door middel van een iteratief proces, hetgeen voor de praktijk weinig inzichtelijk, niet controleerbaar en niet eenvoudig toepasbaar is. Daarom wordt de belasting, net als bij windbelasting, evenredig over de lengte verdeeld. Vervolgens wordt met behulp van de nagelafstand de stijfheid van de korte wanden aangepast zodanig dat deze bij de aangenomen belastingverdeling dezelfde verplaatsing geeft als de lange wand. De formules voor het bepalen van de nagelafstanden van de korte wanden zijn opgenomen in [7].

In het onderzoek in [7] zijn alle wanden voorzien van één volledige wandgrote plaat, waarbij lange wanden worden vergeleken met korte wanden. In de praktijk worden doorgaans platen toegepast met een maximale breedte van 1.220 mm. Volgend uit het onderzoek in [7] loont het niet om korte wanden

($b_{kort} \leq \frac{2 \cdot b_{lang}}{3}$) mee te nemen in de beschouwing. Verder onderzoek is benodigd om het verschil in

stijfheid, en daarmee het verschil in bijdrage van opname van de belasting, te bepalen tussen lange wanden (lengte ≥ 2.440 mm) voorzien van meerdere platen in vergelijking met korte wanden (lengte = 600 mm).

De afleiding van de formules is opgenomen in SHR-rapport 150173-1 [7]. In dit rapport is tevens de stabiliteitskern (aangegeven in figuur 1 t/m 3) berekend op aardbevingsbelastingen in Loppersum voor het bouwkundig ontwerp van de Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling, zie figuur 1 t/m 3. Verder onderzoek op het gebied van de krachtsverdeling over de wanden met een verschillende lengte is benodigd. Dit kan door middel van niet-lineaire iteraties, eindige elementenberekeningen (EEM) en laboratoriumonderzoek. De eigenfrequentie van meerdere wanden van verschillende lengte is tevens onderwerp van verder onderzoek.

2.4 Constructieberekening van de woning + variantenonderzoek materialen

Door Ingenieurs- en adviesbureau TOECK B.V. is het bouwkundig ontwerp van de Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling doorgerekend op aardbevingsbelastingen en de belastingen voorgeschreven volgens de bestaande bouwregelgeving opgenomen in het Bouwbesluit [8]. Hiernaast is een materiaalonderzoek met verschillende varianten uitgevoerd en is extra aandacht besteed aan de detaillering. De varianten in tabel 3 zijn onderzocht.

Tabel 3. Variantenonderzoek uitgevoerd door Ingenieurs- en adviesbureau TOECK B.V [8].

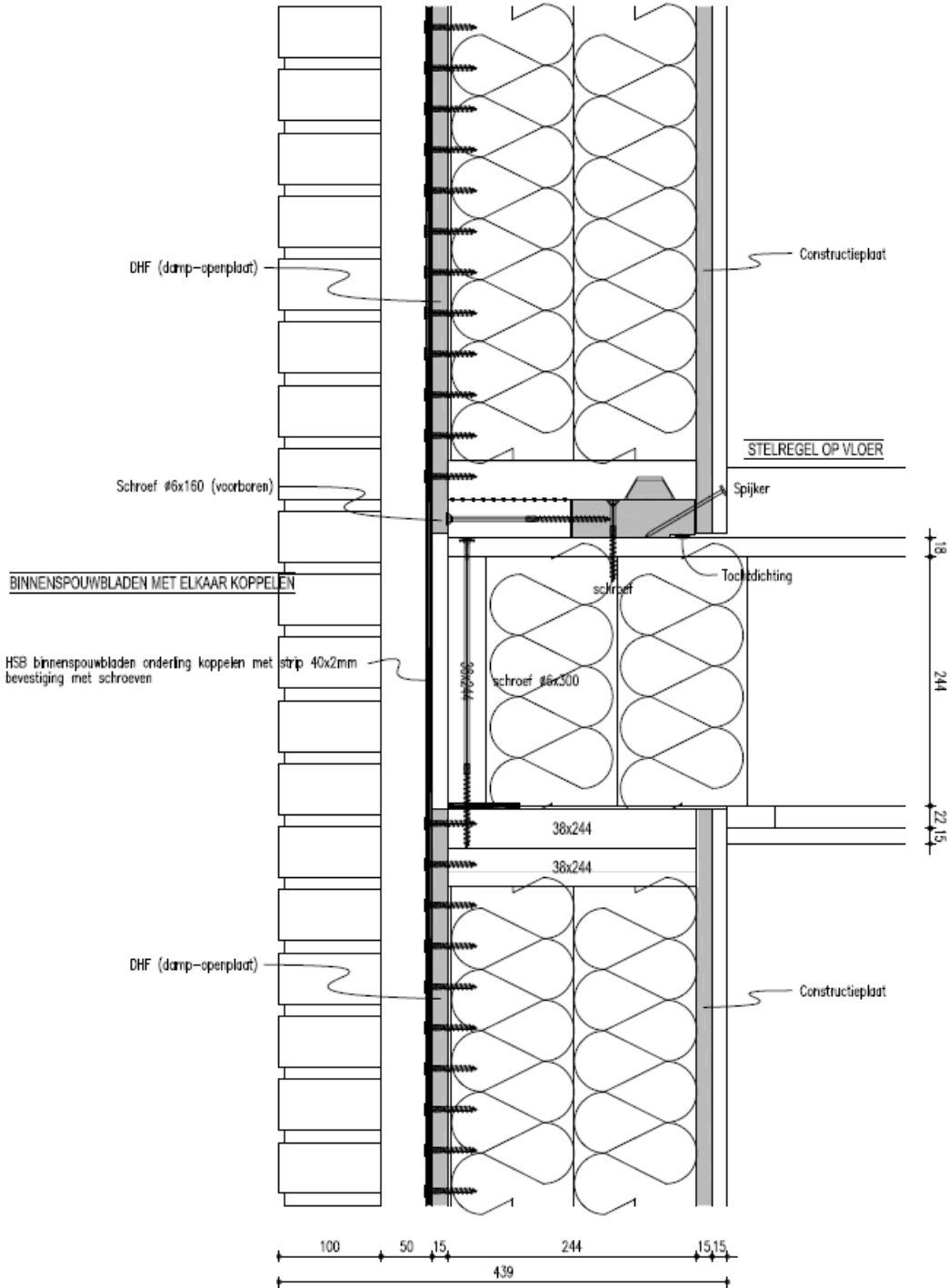
Dakbedekking	Gevelmaterialen	1e verdiepingsvloer
a. Dakpannen	d. Rabat	g. Anhydrietvloer
b. Zonnepanelen	e. Steenstrips	h. Cementdekvloer
c. Leien	f. Metselwerk	i. "Estrich"-vloer

Met betrekking tot de verschillende varianten in het materiaalonderzoek worden in het rapport de volgende conclusies getrokken:

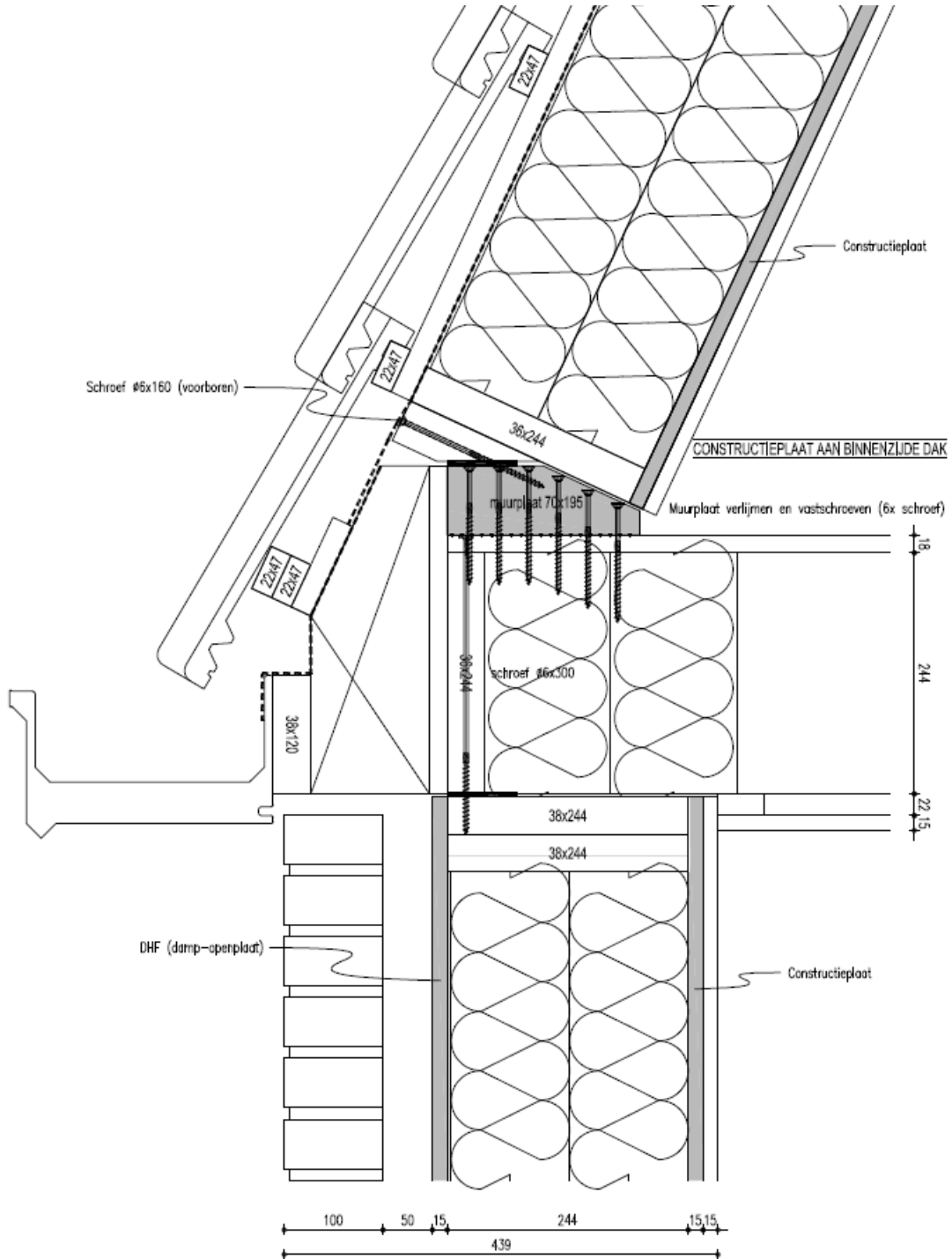
- Wanneer zonnepanelen worden toegepast i.p.v. dakpannen, dan worden de krachten met ca. 10% gereduceerd.
- Voor gevels met rabatdelen worden de krachten t.o.v. metselwerk met ca. 25% gereduceerd.
- Wanneer een "Estrich"-vloer wordt toegepast wordt de belasting met ca. 12% gereduceerd t.o.v. een cementdekvloer.
- Wanneer de "Pilot"- woning wordt uitgevoerd met een combinatie van zonnepanelen-dak, rabatdelen en een "Estrich"-vloer, dan kunnen de krachten met ca. 40% worden gereduceerd.

In het rapport wordt aanbevolen lichte materialen toe te passen en bij het ontwerp van de woning rekening te houden met de positionering van de wanden en de eisen aan de regelmatigheid plattegrond en doorsnede voor het toe mogen passen van de 'zijdelingse belastingmethode'.

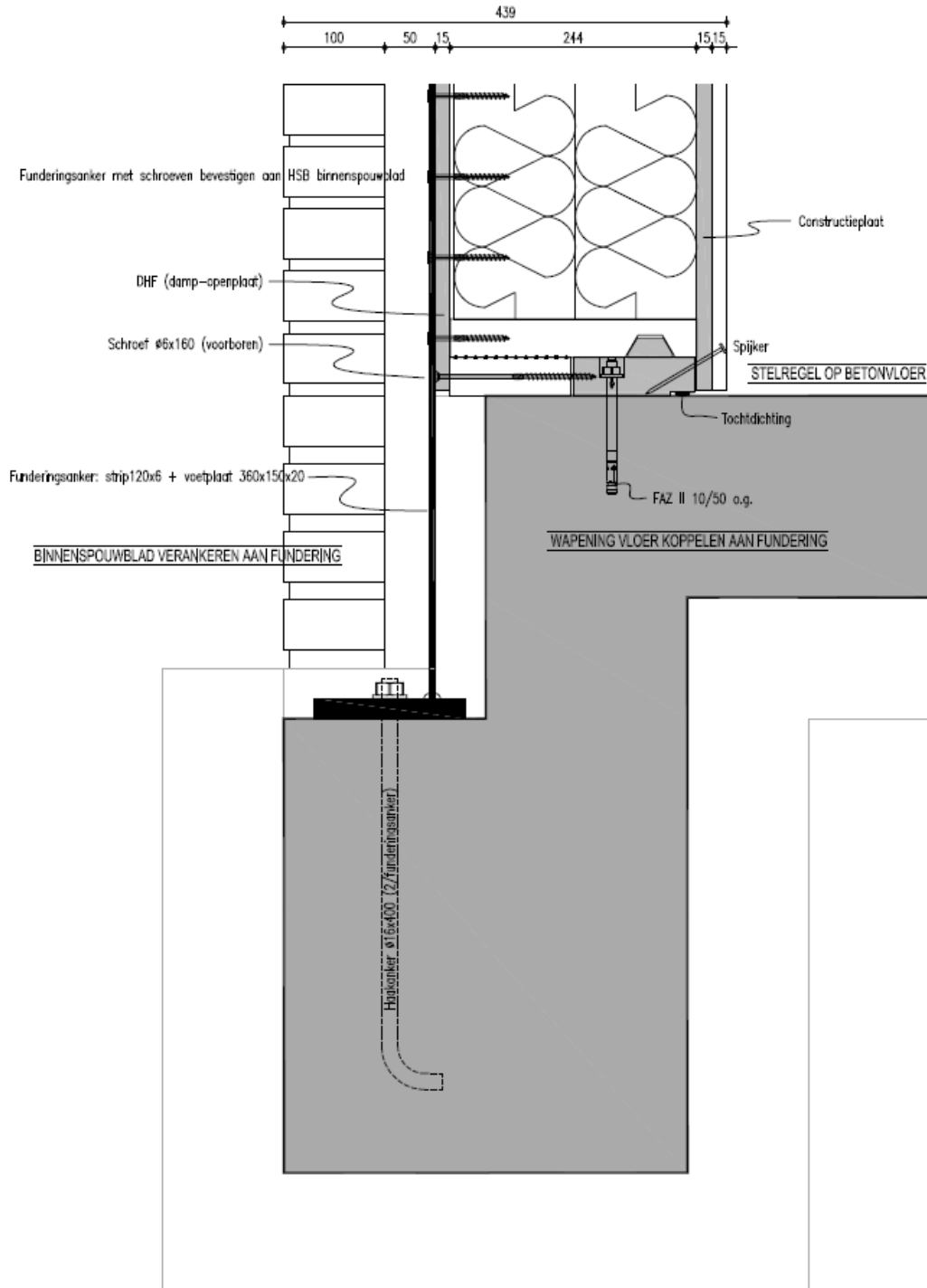
De verankeringen worden, als gevolg van een groter kantelmoment ten gevolge van de aardbevingsbelasting, zwaarder uitgevoerd dan gebruikelijk bij windbelasting. De detaillering, gegeven in figuur 6 t/m 8, is tegen redelijk beperkte meerkosten te realiseren.



Figuur 6 – Detail verdiepingsvloer – wanden in de gevel [8].



Figuur 7 – Detail dak – zoldervloer – wand [8].



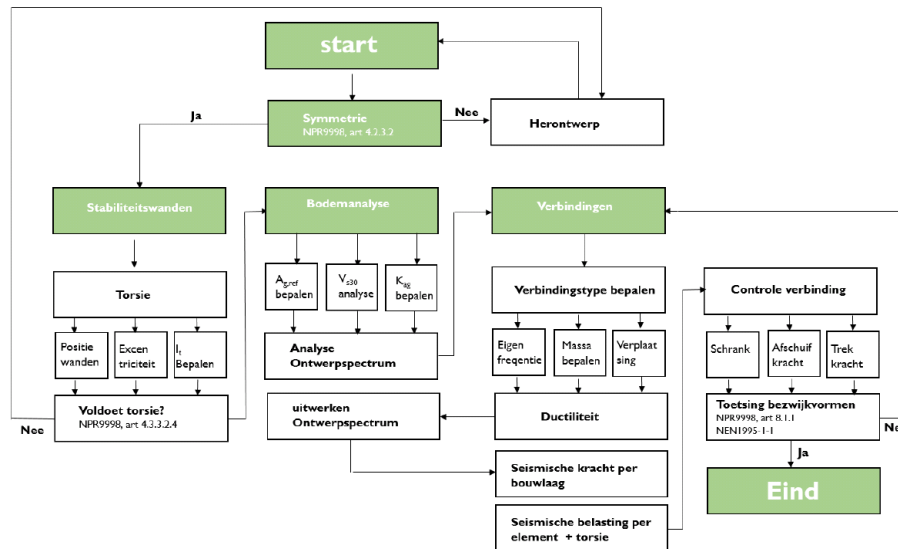
Figuur 8 – Detail wand – begane grondvloer – fundering [8].

Voor een goede aardbevingsbestendige bouwconstructie is het raadzaam om vanaf de eerste ontwerpschetsen rekening te houden met de ontwerprichtlijnen van de NPR 9998. Tevens bij het ontwerp rekening houden met het gewicht bij de materiaalkeuze om de massa zo veel mogelijk te beperken. Kracht is immers 'massa x versnelling'. Bij een goed bouwkundig ontwerp is de woning relatief eenvoudig te berekenen met de "Lateral Force Method". Aan de hand van deze handberekeningsmethode is het gedrag van de woning en de daarmee samenhangende krachtswerking tijdens een aardbeving goed te voorspellen. Een bouwkundig ontwerp dat voldoet aan de uitgangspunten in de NPR 9998 voor toepassen van de "Lateral Force Method" geeft bovendien lage torsiekrachten en daarmee lagere krachten om af te voeren naar de fundering.

Wanneer het ontwerp niet voldoet aan de uitgangspunten in de NPR 9998 voor het toepassen van de "Lateral Force Method", dan is al snel een 3D-programma noodzakelijk om het gedrag van de woning te kunnen voorspellen. Tijdens het onderzoek is de definitieve versie van de NPR 9998 (december 2015) uitgebracht. In deze definitieve versie komt de relatie tussen het ontwerp van de woning en de bodemopbouw van de betreffende locatie direct tot uiting in het "Elastisch responspectrum". Voor een berekening op aardbevingsbelastingen van een bouwconstructie betekent dit dat de gegevens van de bodemopbouw d.m.v. -indien nodig seismische- sonderingen beschikbaar moeten zijn. In de berekening van de pilotwoning [8] zijn alle toetsingseisen van de NPR 9998 voor de bouwconstructie gehanteerd.

De praktijk vraagt met betrekking tot het verdelen van de belasting over de verschillende wanden meer duidelijkheid. Ook over het omgaan met torsiekrachten en het combineren van de belastingen in verschillende richtingen bestaat nog onduidelijkheid. Verschillende ingenieursbureaus en controlerende partijen gaan hier nog verschillend mee om. Met uiteindelijk verschillen in belastingen tot gevolg. Een rekenvoorbeeld waarin deze onderwerpen worden behandeld zou hiervoor uitkomst bieden.

Op basis van de pilot-berekening is een "stappenplan" gemaakt voor de "Lateral Force Method" welke te gebruiken is voor het berekenen van een aardbevingsbestendige bouwconstructie. Deze is in het eindrapport als bijlage 1 toegevoegd en in figuur 9 afgebeeld.

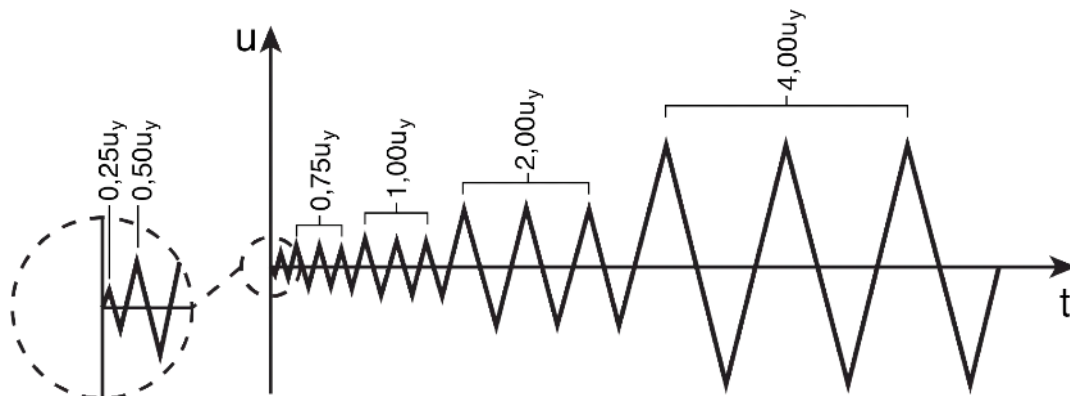
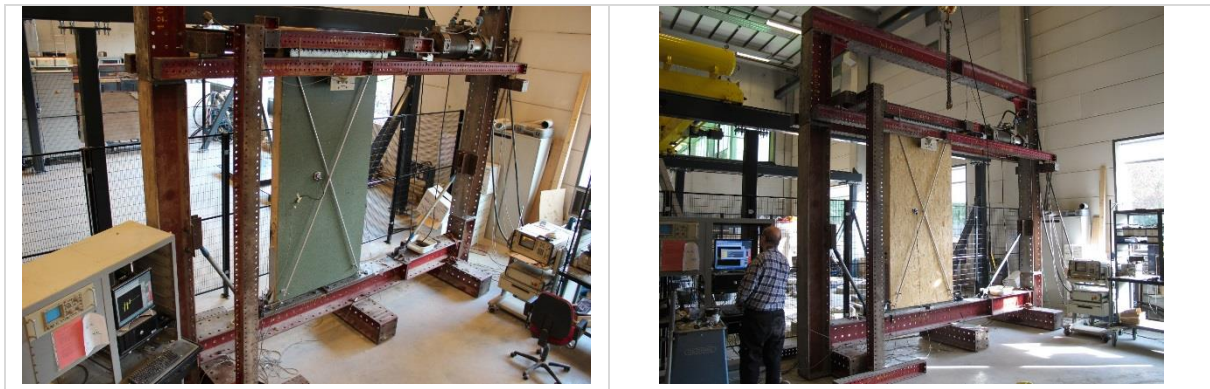


Figuur 9 – Stappenplan voor toepassen van de “Lateral Force Method”

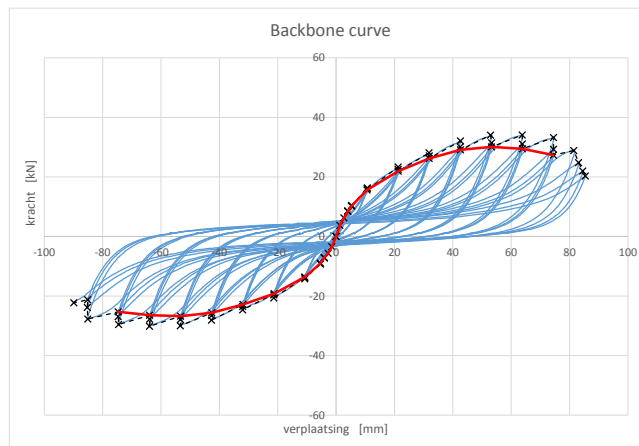
De aardbevingsbelasting heeft nagenoeg geen invloed op de uitvoering van de zogenaamde “platformmethode” waarop in Nederland houtskeletbouwoningen worden gebouwd. Voor de opbouw van de afzonderlijke elementen en de onderlinge bevestiging van de elementen aan elkaar en aan de begane grondvloer heeft de aardbevingsbelasting echter wel grote invloed. Zo moeten de wanden overwegend aan weerszijden worden voorzien van constructief plaatmateriaal. Deze platen moeten met een relatief groot aantal (t.o.v. de normale HSB-methode) slanke verbindingsmiddelen (plastisch gedrag bij vervormen) aan de stijlen worden bevestigd. Datzelfde geldt voor de onderlinge aansluiting van de elementen, de bevestiging aan de begane grondvloer en de verankering aan de fundering. Het kantelmoment ten gevolge van aardbevingen is groter dan dat ten gevolge van wind en heeft zwaardere koppelingen en verankeringen tussen deze elementen tot gevolg. Desondanks blijven de extra benodigde voorzieningen voor aardbevingsbestendig bouwen in houtskeletbouw relatief beperkt.

2.5 gedragsfactor (q) van HSB-wanden

Zoals aangegeven in de inleiding is onderzoek naar de gedragsfactor (q) een belangrijk onderwerp voor het bepalen van de aan te houden belasting op de constructie volgens een lineair elastische berekening. In het afstudeeronderzoek door C. Bekkers [5] en onderzoek door SHR [9] is de gedragsfactor van Houtskeletbouw-wanden voorzien van 11 mm spaanplaat P5 (Bekkers) en 15 mm OSB/3 (SHR) nader onderzocht. De wanden zijn geleverd door De Groot Vroomshoop (spaانplaat P5) en VDM Woningen (OSB/3). NEN-EN 12512 beschrijft een cyclische beproeving, waarvan de procedure grafisch is gegeven in figuur 10, voor het bepalen van de ductiliteit. De uitvoering van de testen, inclusief testopstelling, is gegeven in figuur 11.

**Figuur 10 – Schematische weergave cyclische beproeving volgens EN 12512.****Figuur 11 – Testopstelling cyclische testen volgens EN 12512, spaanplaat P5 (links) OSB/3 (rechts).**

Na de beginprocedure worden in de testprocedure steeds drie cycli met eenzelfde vervorming herhaald, waarna de vervorming stapsgewijs wordt vergroot. Er volgt uit de test een krachtverplaatsingsdiagram, een zogenaamde hysteresis, welke is gegeven in figuur 12. Door nu de toppen van de derde en laagste cycli met elkaar te verbinden ontstaat de zogenaamde 'backbone curve', weergegeven met de rode lijn. Op deze curve dient het einde van het elastische traject (δ_e), zie figuur 4, oftewel het vloeipunt bepaald te worden. Bekkers geeft in zijn literatuurstudie [11] een uitgebreide beschrijving van een aantal methoden, welke grote verschillen in uitkomsten geven [5,9].



Figuur 12 – Hysterese en backbone curve van proefstuk OSB/3-A2 [9].

Vooralsnog hanteert de NEN-EN 1998-1 voor houtachtige constructies de methode gegeven in EN 12512 voor het bepalen van het vloeipunt. In tabel 4 zijn de resultaten voor de gedragsfactor gegeven. Het vloeipunt en ductiliteitsratio is bepaald volgens EN12512. De lagere ductiliteit voor dünnere beplating blijkt duidelijk uit de uitkomsten opgenomen in tabel 4. Bij dünnere beplating ontstaat er immers maar één plastisch scharnier in de nagels in plaats van twee bij dükkere beplating.

Tabel 4. Gedragsfactor HSB-wanden voorzien van verschillende typen beplating [5,9] bepaald volgens EN 12512.

Type wand	Gedragsfactor
HSB-wanden voorzien van 11 mm spaanplaat P5	2,5
HSB-wanden voorzien van 15 mm OSB/3	3,0

Aangezien het onderzoek op een klein aantal proefstukken is uitgevoerd dient te worden opgemerkt dat het voorlopige testresultaten betreft. De NPR 9998 [1] geeft voor HSB-wanden voorzien van beplating met minimale dikte van 13 mm een gedragsfactor van 3,0. De resultaten uit het onderzoek komen overeen met waarden gegeven in de NPR 9998. De lagere gedragsfactor voor dünnere beplating, het type plaatmateriaal, en de nagelafstand is onderwerp van verder onderzoek.

Het vervolgonderzoek betreft het maken van berekeningen volgens het principe ‘time-history dynamic analysis’, waarin door het schalen van aardbevingssignalen het elastische en plastische gedrag van de constructie wordt onderzocht. Hiervoor wordt de hysterese, verkregen door middel van de laboratoriumtesten, ingelezen in het programma So.ph.i. [12] voor het bepalen van de eigenschappen van een niet-lineaire veer voorzien van demping. Deze eigenschappen kunnen vervolgens ingelezen worden in het eindige elementenprogramma voor het uitvoeren van de ‘time-history dynamic analysis’.

Voor aardbevingsbestendige nieuwbouw volgens de NPR 9998 zijn constructies met een Ductility Class Low niet toegestaan. Enkel Ductility Class Medium (DCM) en Ductility Class High (DCH) zijn toegestaan volgens de NPR 9998 [1]. De bijbehorende ductiliteitsratio (μ) en gedragsfactor (q) volgens Eurocode 8 [13] is gegeven in tabel 5.

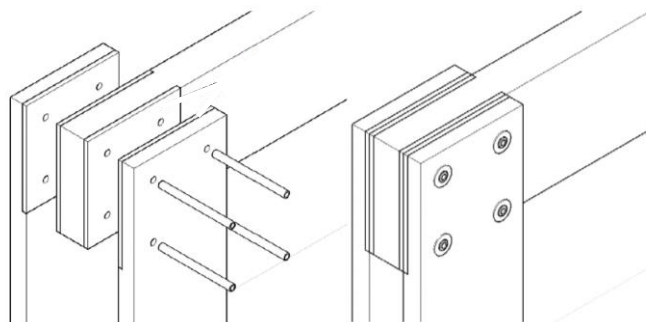
Tabel 5. Ductiliteitsratio (μ) en gedragsfactor (q) volgens Eurocode 8 [13].

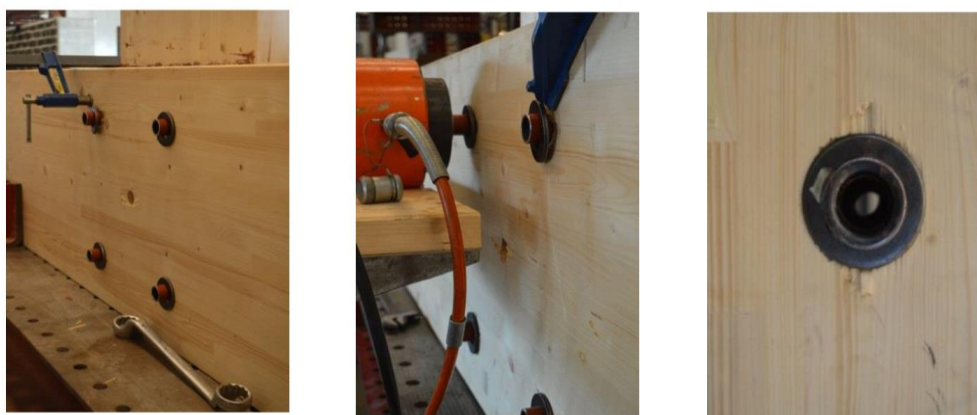
klasse	Ductiliteitsratio (μ)	gedragsfactor (q)
DCM	≥ 4	$\geq 2,65$
DCH	≥ 6	$\geq 3,32$

HSB-wanden voorzien van 15 mm OSB/3 ($q = 3,0$) voldoen aan de gestelde voorwaarden met betrekking tot de ductiliteit voor toepassing in nieuwbouw volgens de NPR 9998. In het onderzoek is de houtachtige beplating vastgezet met nagels. Er wordt voor aardbevingsbestendig bouwen afgeraden om houtachtige beplating te voorzien van nieten, deze bezitten een lage ductiliteit.

2.6 Gedragsfactor (q) van DVW-buisverbindingen in gelamineerd hout

DVW-buisverbindingen maken het mogelijk om gelamineerde houten onderdelen aan elkaar te verbinden, waarbij de maximale momentcapaciteit van de doorsnede op elkaar overgedragen kan worden. Dit maakt het mogelijk om zeer slank te dimensioneren. DVW-buisverbindingen bestaan uit Densified Veneer Wood gelijmd op het gelamineerde hout. De verschillende onderdelen worden met behulp van buisverbindingen aan elkaar verbonden. Door de buizen met behulp van een hydraulische pers te expanderen sluiten ze exact passend in het gat. Belast op buiging ontstaat er een nagenoeg zuiver bi-lineair krachtverplaatsingsdiagram als gevolg van de plastische scharnieren die ontstaan in de stalen buisverbindingen. Het vloei-traject van het staal zorgt voor een zeer lang plastisch traject resulterend in een hoge gedragsfactor. Samen met de lange eigentrillingstijd van de portaalconstructie, resulterend in lage aardbevingsbelastingen, maakt het een ideale bouwmethode voor in gebieden met aardbevingsbelastingen. Een schematische weergave van de DVW-buisverbinding is gegeven in figuur 13 en de vervaardiging is weergegeven in figuur 14.

**Figuur 13 – Schematische weergave van de buisverbinding [14].**



Figuur 14 – Uitvoering van de buisverbinding [14].

Door R. van Bakel is in zijn afstudeerscriptie [14] onderzoek gedaan naar de ductiliteit van de DVW-buisverbinding. Op basis van push-over berekeningen en time-history dynamic analysis met behulp van eindige elementensoftware is een gedragsfactor bepaald. Op basis van een gemiddelde waarde wordt een gedragsfactor van 4,5 gedeclareerd voor een enkel portaal. Hierbij dient opgemerkt te worden dat verder onderzoek is benodigd naar de statistische verwerking van de resultaten tot een waarde die normatief opgenomen kan worden. In de NPR 9998 [1] is voor deze verbinding een gedragsfactor van 3,0 opgenomen hetgeen wellicht een reële waarde is doordat van Bakel de waarde 4,5 heeft bepaald op basis van proeven op verbindingen. De waarde voor met deze verbindingen opgebouwde constructies ligt zeker lager. Vergroting van het aantal verdiepingen en h.o.h.-afstanden geeft een vergroting van het aantal knopen en daarmee een verhoging van de ductiliteit en gedragsfactor. Met behulp van de portalen en de DVW-buisverbinding is een volledig vrij indeelbare plattgrond mogelijk. Het opnemen van stabiliteitswanden in het bouwkundig ontwerp is dan niet nodig. De methode biedt veel mogelijkheden bij het realiseren van de in Nederland populaire doorzonwoning. Figuur 15 geeft een voorbeeld van een ingeklemde portaalconstructie vervaardigd met de DVW-buisverbinding.



Figuur 15 – Ingeklemde portaalconstructie. [documentatie Lignostone®]

2.7 Gedragsfactor (q) van constructies in kruislaaghout

Houtconstructies gebouwd met kruislaaghout, in het Engels genaamd Cross Laminated timber (CLT), zijn in Nederland in opmars. De methode waarbij volledige wandpanelen worden opgebouwd uit kruislings verlijmd gelamineerd hout sluit goed aan bij de Nederlandse wijze van prefab bouwen. In Nederland is nog geen onderzoek gedaan naar CLT in combinatie met aardbevingsbelastingen. De opgedane ervaringen in het buitenland met deze bouwmethode maken het noemenswaardig deze op te nemen.



Figuur 16 – Voorbeeld van stabiele kern opgebouwd uit Cross Laminated Timber (CLT).

De panelen zelf zijn verlijmd en vertonen daarmee inherent bros breukgedrag, waarop overgedimensioneerd dient te worden met een 'oversterkte' factor. De ductiliteit wordt enkel verkregen uit de verbindingen tussen de panelen zelf en de onderconstructie. Opdelen van de wandpanelen in meerdere panelen (in het Engels 'segmented panels') geeft een hogere gedragsfactor. In de NPR 9998 is een gedragsfactor van $q = 2,0$ opgenomen. Ondanks de lagere gedragsfactor dan HSB-wanden biedt het aardbevingsbestendig bouwen met CLT panelen kansen vanwege de hoge sterkte van de panelen. Een voorbeeld van een constructie met CLT-panelen is opgenomen in figuur 16.

2.8 Inspectie houtconstructies Noord Oost Groningen

Veel van de Groninger schuren zijn gebouwd volgens het kop-hals-romp principe waarbij het voorhuis is opgetrokken uit metselwerk en de achtergelegen schuur bestaat uit houten portalen voorzien van schoren, zoals weergegeven in figuur 17.



Figuur 17 – Houten portalen voorzien van schoren.

Veelal zijn de schoren verbonden aan de liggers en kolommen met zwaluwstaartverbindingen. Een voorbeeld van een dergelijke verbinding is gegeven in figuur 18. De schoor belast op druk geeft ductiliteit uit het plastisch bezwijken van de vezels onder de drukspanning loodrecht op de vezel. Indien de schoor belast wordt op trek zal de zwaluwstaart verbinding zichzelf vastklemmen, met drukspanningen loodrecht op de vezel waaraan ductiliteit ontleend kan worden.



Figuur 18 – Schoor verbonden aan ligger door middel van zwalustaartverbinding.

Naast een rekenkundige controle van de stabiliteit bij aardbevingsbelastingen is inspectie ter plaatse benodigd. De schuren zijn vaak ruim 150 jaar oud met de daarbij de behorende kans op aantasting en achterstallig onderhoud resulterend in een potentieel risico.

Het gewicht van de schuur is ten opzichte van het totale volume erg laag. Het aangeblazen oppervlak door de wind is daarentegen erg groot. De portalen zijn relatief sterk en in combinatie met lage aardbevingsbelastingen (vanwege het lage eigen gewicht) relatief goed bestand tegen aardbevingen. Mits alle onderdelen aanwezig zijn en er geen sprake is van ernstige aantasting.

2.9 Literatuur

In Europa, met name in Duitsland en Italië, maar ook in Japan, New Zeeland en Canada, is in het verleden ervaring opgedaan met de ontwikkeling en onderzoek naar aardbevingsbestendig bouwen met hout. Naar aanleiding van dit onderzoek zijn er diverse publicaties opgesteld. De volgende samenvattende documenten zijn noemenswaardig om hier te vermelden:

- 'Nachweis der Erdbbensicherheit von Holzgebäuden' Ingenieurkammer-Bau Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf www.ikbaunrw.de [15]
- optimberQUAKE 'Seismic design of timber structures: guideline'. W.Seim, J. Hummel Universiteit Kassel. [16]
- optimberQUAKE 'Seismic design of timber structures: Abschlussbericht'. W.Seim, M. Fragiaco Universiteit Kassel. [17]

3 Conclusie

Uit de in hoofdstuk 2 beschreven onderzoeken en voorbeeldberekeningen blijkt dat het zeer goed mogelijk is om aardbevingsbestendig te bouwen met houtskeletbouw en houtconstructies. In hout- en houtachtig materiaal zijn zeer veel opties mogelijk om aardbevingsbestendig te bouwen. Voor de woningbouw zijn de volgende constructies, met elk hun voor- en nadelen, de meest voor de hand liggende:

- Houtskeletbouw wanden voorzien van houtachtige beplating vastgezet met nagels;
- Wandens opgebouwd uit kruislaaghout, voorzien van verankering met voldoende ductiliteit;
- Portalen voorzien van DVW-buisverbindingen of stiftverbindingen

De combinatie tussen bouwkundig ontwerp, de materiaalkeuze en de bouwmethode bepalen samen of een project aardbevingsbestendig gerealiseerd kan worden. Met HSB-wanden is op uitermate kostenefficiënte wijze aardbevingsbestendig te bouwen. De bouwkundig ontwerpen [4] gemaakt naar aanleiding van de Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling en de onderliggende berekeningen [7,8] tonen aan dat aardbevingsbestendig bouwen in houtskeletbouw mogelijk is tot in het epicentrum in Loppersum ($a_{g,ref} = 0,36$).

Wanden gemaakt met kruislaaghout (in het Engels: CLT of X-lam) bezitten weliswaar een lagere ductiliteit dan HSB-wanden maar compenseren dit door de zeer hoge sterkte. Door middel van vergelijkende berekeningen dient bepaald te worden waarmee de grootste indelingsvrijheid gerealiseerd kan worden.

De bouwmethode met portalen (DVW-buisverbindingen of stiftverbindingen) maakt het mogelijk om een volledig vrije indeelbaarheid te realiseren: in de plattegrond staan géén stabiliteitswanden. Hiermee is de in Nederland zo geliefde 'doorzon' woning te realiseren: de voor- en achtergevel volledig voorzien van glas met volledig vrije doorkijk tussen beide. De lange trillingstijd van het portaal, waardoor ongevoelig voor de korte trillingstijd van de aardbeving, en de hoge ductiliteit in de verbindingen creëren een grote ontwerpvrijheid.

Literatuur

- [1] NPR 9998: december 2015 Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: geïnduceerde aardbevingen.
- [2] Ontwerp NPR 9998:1-2-2015 Ontwerp en beoordeling van aardbevingsbestendige gebouwen bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – geïnduceerde aardbevingen
- [3] Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling. Leidraad. J. Finkielsztajn. versie 01 d.d. 18 februari 2015
- [4] 'Realisatie van aardbevings-bestendige houtskeletbouw woningen' met als ondertitel: Stabiliteit: de kern van de zaak! NBvT, startdocument Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling georganiseerd door de NAM
- [5] 'Het gedrag van houtskeletbouw elementen tijdens aardbevingen', C. Bekkers A. Jorissen artikel onderzoeksmiddag 22 januari 2016 TU Eindhoven
- [6] voorbeeldberekening NEN, te downloaden via: <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Eurocodes/Veilige-constructies-bij-aardbevingen.htm>
- [7] SHR-rapport 150173-1 'Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling - Dimensionering stabiliteitskern op aardbevingsbelasting' d.d. 3 september 2015
- [8] Pilot Nieuwbouw Innovatieregeling. Aardbevingsbestendige houtskeletbouw woning. d.d. 30 maart 2016. TOECK Ingenieurs- en adviesbureau B.V.
- [9] SHR-rapport 150173-2 'Cyclisch belasten van HSB-wanden volgens EN 12512 voor het bepalen van de q-factor: reductiefactor van de krachten in een lineaire berekening op aardbevingsbelasting' d.d. 9 december 2015
- [10] NEN-EN 12512:2001 Houtconstructies – Beproevingsmethoden – Cyclische beproeving van verbindingen met mechanische bevestigingsartikelen
- [11] 'Behaviour of Timber Joints and Structures under Seismic Loading' Literature review. C.P.T. Bekkers. Eindhoven University of Technology
- [12] So.ph.i. – SOftware for PHenomenological Implementations versie 4.58 - G. Rinaldin <http://giovanni.rinaldin.org/giovanni/cms/sophi> Geraadpleegd: 9 februari 2016

- [13] NEN-EN 1998-1:2005+C1:2009+A1:2013 Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies - Deel 1: Algemene regels, seismische belastingen en regels voor gebouwen

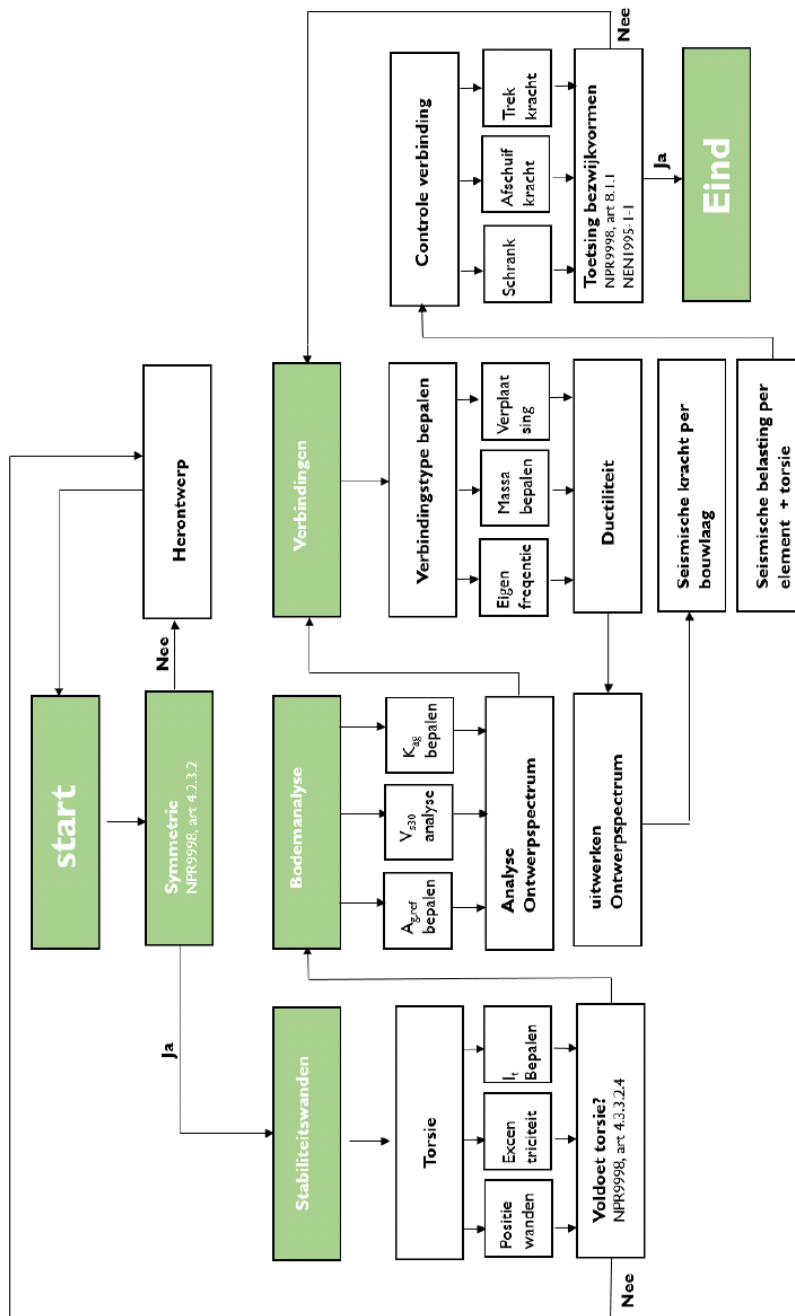
- [14] 'Seismic behaviour of Densified Veneer Wood reinforced timber connections with expanded tube fasteners' Afstudeerscriptie R. van Bakel. Technische Universiteit Eindhoven. d.d. 28 oktober 2015

- [15] 'Nachweis der Erdbbensicherheit von Holzgebäuden' Ingenieurkammer-Bau Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf www.ikbaunrw.de

- [16] optimberQUAKE 'Seismic design of timber structures: guideline'. W.Seim, J. Hummel Universiteit Kassel.

- [17] optimberQUAKE 'Seismic design of timber structures: Abschlussbericht'. W.Seim, M. Fragiaco Universiteit Kassel.

Bijlage 1: Stappenplan: berekening op aardbevingsbelasting volgens de 'Lateral force method'



Het stappenplan voor de berekening op aardbevingsbelasting volgens de 'Lateral force method' is overgenomen uit [8].