

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

TNO 2017 R10217

Monitoringsnetwerk gebouwtrillingen - Analyse aardbevingen in 2014 en 2015

Dit is de vertaling van rapport TNO 2016 R11323/A

Datum	12 december 2016
Auteur(s)	Ir. H. Borsje Ir. J.P. Pruiksmann Ir. S.A.J. de Richemont
Exemplaarnummer	2017.0100303610
Oplage	
Aantal pagina's	54 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	NAM Postbus 28000 9400 HH Assen
Projectnaam	Aardbevingen 2014-2015
Projectnummer	060.16792

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.

© 2017 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doel.....	4
1.3	Leeswijzer	5
2	Opzet van het monitoringsnetwerk	6
2.1	Monitoringsnetwerk.....	6
2.1.1	Achtergrondinformatie	6
2.1.2	Geïnstalleerde sensoren	7
2.2	Raamwerk trillingsanalyses	8
2.3	Raamwerk schade-analyse	8
2.3.1	Algemeen.....	8
2.3.2	Heropnames	9
2.3.3	Schadecurven.....	10
3	Gebouwen getriggerd door aardbevingen	11
3.1	Aardbeving Garmerwolde.....	11
3.2	Aardbeving Zandweer	12
3.3	Aardbeving Woudbloem	12
3.4	Aardbeving Wirdum	13
3.5	Aardbeving Helling	14
3.6	Samenvattend overzicht	15
4	Trillingskenmerken	17
4.1	Algemene informatie met betrekking tot versnelling.....	17
4.1.1	Piekversnellingen.....	17
4.1.2	Dominante frequenties	19
4.2	Algemene informatie met betrekking tot snelheid	21
4.2.1	Pieksnelheden	22
4.2.2	Dominante frequenties	24
5	Analyse trillingskenmerken	27
5.1	Horizontale versus verticale component van de trillingen	27
5.2	Piekversnelling versus pieksnelheid	30
6	Herhalingsopname schade	31
6.1	Algemeen.....	31
6.2	Maatgevende trillingssnelheid	31
6.3	Geregistreeerde scheuren	32
6.4	Reparaties	33
7	Analyse herhalingsopnames	34
7.1	Initiële opnames.....	34
7.2	Schadecurven.....	34
7.3	Conclusies	37
8	Conclusies	38

NAM

9	Referenties	40
10	Ondertekening	41
11	Verklarende woordenlijst.....	42

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In Groningen treden zogenoemde geïnduceerde aardbevingen op, als gevolg van de winning van aardgas. Deze aardbevingen veroorzaken bodemtrillingen die worden overgedragen op de funderingen van gebouwen, waardoor de gebouwen zelf gaan trillen. Deze trillingen kunnen schade toebrengen aan de gebouwen.

Om de effecten van geïnduceerde aardbevingen te kunnen bepalen heeft NAM een onderzoeksprogramma opgezet. Een onderdeel van dit onderzoeksprogramma is een monitoringsnetwerk voor gebouwtrillingen. In ongeveer 300 gebouwen is een trillingssensor geplaatst die continu de trillingen van het gebouw op funderingsniveau meet. Om inzicht te krijgen in de kwetsbaarheid van de gebouwen in Groningen voor bepaalde trillingsniveaus omvat dit monitoringsnetwerk ook een schade-inventarisatie. Door de schade aan deze gebouwen voor en na een aardbeving in kaart te brengen, kan een verband worden gevonden tussen de gebouwtrillingen als gevolg van een aardbeving en de schade aan het gebouw die door die aardbeving is veroorzaakt.

TNO heeft dit monitoringsnetwerk voor gebouwtrillingen ontwikkeld en geïnstalleerd, inclusief een IT-infrastructuur voor het verwerken en analyseren van de gegevens (het Vibration Data Center). De opzet van dit monitoringsnetwerk is beschreven in TNO-rapport 2015 R10501 "Monitoring Network Building Vibrations" [ref 01].

1.2 Doel

NAM heeft TNO opdracht gegeven de effecten van geïnduceerde aardbevingen te analyseren. Deze analyses omvatten de overdracht van bodemtrillingen naar gebouwtrillingen en de schade die wordt toegebracht aan de gebouwen als gevolg van de geïnduceerde aardbevingen.

De analyse van de effecten van de geïnduceerde aardbevingen is uitgevoerd voor aardbevingen met een magnitude van 2,5 of hoger (volgens KNMI). Voor elk van deze aardbevingen zijn alle gebouwen geanalyseerd, waarvoor de gemeten trillingssnelheid hoger was dan het triggerniveau van 1 mm/s.

In de periode september 2014 - december 2015 hebben in totaal vijf geïnduceerde aardbevingen met een magnitude van 2,5 of hoger plaatsgevonden (tabel 1.1). Voor deze vijf aardbevingen zal dit rapport de tot nu toe verkregen gegevens combineren en analyseren.

Tabel 1.1: Kenmerken van de geanalyseerde aardbevingen (zie website KNMI)

Naam	Garmerwolde	Zandeweer	Woudbloem	Wirdum	Hellum
Datum	30-9-2014	5-11-2014	30-12-2014	6-1-2015	30-9-2015
Tijd (UTC)	11:42	1:12	2:37	6:55	18:05
Magnitude	2,8	2,9	2,8	2,7	3,1
Locatie epicentrum (latitude)	53258	53374	53208	53324	53234
Locatie epicentrum (longitude)	6655	6678	6728	6768	6834
Locatie epicentrum (X)	239605	240908	244580	247004	251603
Locatie epicentrum (Y)	58461	599397	580985	593944	584016

1.3 Leeswijzer

In dit rapport wordt een gecombineerde analyse gepresenteerd van de vijf geïnduceerde aardbevingen die zijn genoemd in tabel 1.1.

Als eerste komt in hoofdstuk 2 de opzet van het monitoringsnetwerk, de trillingsanalyse en de schadeopname aan bod.

Daarna wordt in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de gebouwen waarvoor de gemeten trillingssnelheid op funderingsniveau hoger was dan de vooraf bepaalde triggerwaarde van 1 mm/s.

De hoofdstukken 4 en 5 behandelen de trillingskenmerken en de analyse daarvan.

In de hoofdstukken 6 en 7 worden de resultaten van de schadeopname en de schadecurven gepresenteerd.

Tot slot geven de hoofdstukken 8 tot en met 11 de conclusies, referenties, ondertekening en een verklarende woordenlijst.

2 Opzet van het monitoringsnetwerk

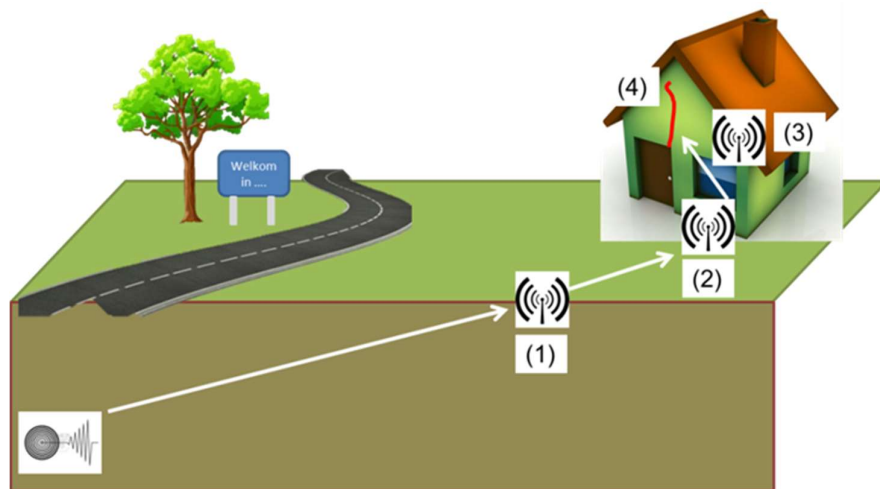
2.1 Monitoringsnetwerk

2.1.1 Achtergrondinformatie

Het monitoringsnetwerk is gebaseerd op een analyse van de wijze waarop de trillingen zich voortplanten vanaf de bron naar de gebouwen. De stappen die hierin zijn te onderscheiden zijn (figuur 2.1):

1. Bodemtrillingen, veroorzaakt door een aardbeving, verspreiden zich naar de omgeving.
2. Overdracht van bodemtrillingen op de fundering van gebouwen, die leiden tot een trillingsbelasting op deze gebouwen.
3. Gebouwtrillingen, die schade kunnen veroorzaken.

De effecten die optreden in deze drie stappen zijn afzonderlijk geanalyseerd.



Figuur 2.1: Illustratie van de voortplanting van trillingen als gevolg van een aardbeving.

Ad 1: Bodemtrillingen

De bodemtrillingen in stap 1 worden gemeten en geanalyseerd door het KNMI via hun eigen (op zichzelf staande) monitoringsnetwerk. Dit effect maakt geen deel uit van de analyseprocedure van dit monitoringsnetwerk. De door het KNMI gemeten bodemtrillingen leveren echter waardevolle input over de overdracht van de bodemtrillingen naar gebouwtrillingen (stap 2).

Tijdens de eerste vier geanalyseerde aardbevingen was het sensornetwerk van het KNMI nog niet operationeel. Het was dus niet mogelijk overdrachtsfuncties te berekenen of een analyse hierop uit te voeren.

Bij de meest recente aardbeving, de aardbeving van Hellum, was de afstand tussen de KNMI-stations en de dichtstbijzijnde TNO-sensoren vrij groot, waardoor het eveneens niet mogelijk was betrouwbare overdrachtsfactoren voor de individuele gebouwen te berekenen.

Ad 2: Trillingsbelasting op gebouwen

Bodemtrillingen worden (waarschijnlijk) niet een-op-een overgedragen op de gebouwen. De mate waarin de bodemtrillingen worden overgedragen op gebouwen wordt in de praktijk gekarakteriseerd met een overdrachtsfunctie. De overdracht van trillingen is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de lokale bodemgesteldheid, het type fundering enzovoort.

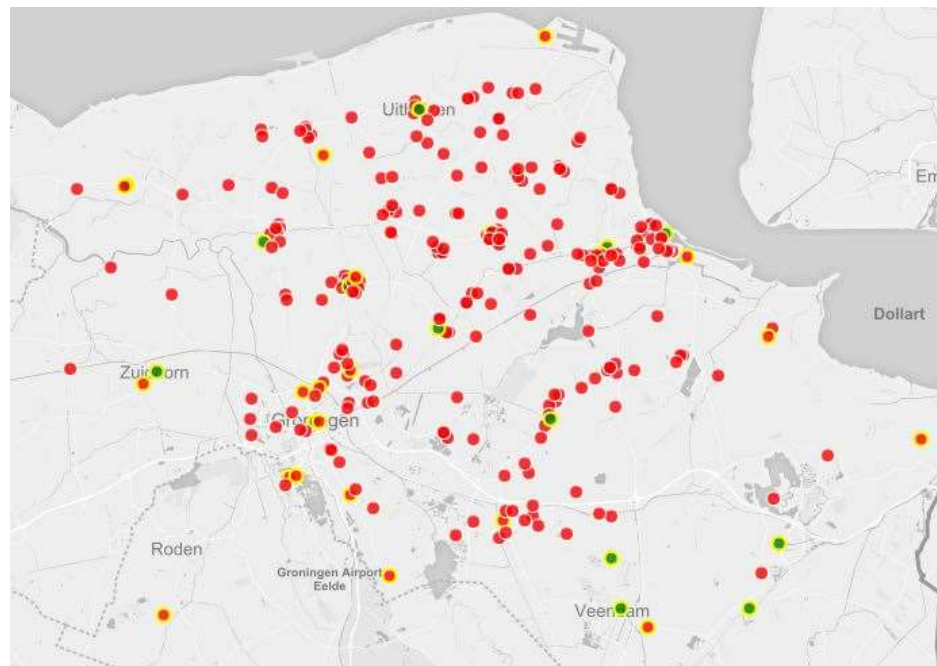
Om inzicht te krijgen in de overdracht van de trillingen worden de trillingsmetingen in gebouwen (2) vergeleken met de bodemtrillingen die zijn gemeten of berekend door het KNMI (1) om zodoende de overdrachtsfuncties te kunnen bepalen.

Ad 3: Schade veroorzaakt door trillingen

Voor alle woningen in het monitoringsnetwerk is een initiële schadeopname uitgevoerd. Na elke aardbeving met een magnitude van $M=2,5$ of groter, is een heropname uitgevoerd voor woningen waarvoor het gemeten trillingsniveau tijdens de aardbeving hoger was dan een vooraf bepaalde waarde. Deze vooraf bepaalde waarde wordt het "triggerniveau" van de sensor genoemd en is voor de onderhavige aardbevingen ingesteld op 1 mm/s. De resultaten van deze heropname zijn vergeleken met de resultaten van de voorgaande opname om de door de aardbeving veroorzaakte schade te kunnen bepalen.

2.1.2 *Geïnstalleerde sensoren*

Eind 2015 bestond het monitoringsnetwerk uit ongeveer 300 sensoren. De meeste van deze sensoren zijn geïnstalleerd in woningen. Ongeveer 30 sensoren zijn geïnstalleerd in andere gebouwen zoals gemeentehuizen, dorpshuizen en kantoren van lokale industrie. Een kaart met de locaties van alle geïnstalleerde sensoren is weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: Geïnstalleerde sensoren in november 2015 (rood = woning, rood/geel = geen woning, groen/geel = gemeentehuis).

De in het monitoringsnetwerk opgenomen woningen zijn zo geselecteerd dat ze representatief zijn voor de meerderheid van de woningen in Groningen. Een overzicht van de geïnstalleerde sensoren in woningen per gebouwtype is te vinden in tabel A.1, bijlage A.

De sensoren zijn dicht bij het funderingsniveau geïnstalleerd op een buigstijve locatie, waarbij rekening werd gehouden met de technische en praktische omstandigheden.

2.2 Raamwerk trillingsanalyses

De gebouwsensoren meten de versnellingen van de gebouwtrillingen op funderingsniveau in drie richtingen (twee horizontaal, één verticaal). Op basis van deze gemeten versnellingen berekenen de sensoren rechtstreeks de trillingssnelheden en deze berekende trillingssnelheden worden gebruikt om te bepalen of de vooraf vastgestelde trigger, een trillingssnelheid van 1 mm/s, is overschreden.

Als de vooraf vastgestelde trigger is overschreden, verzendt het sensorsysteem de oorspronkelijk gemeten trillingsversnellingen naar het Vibration Data Center (VDC). Deze oorspronkelijk gemeten versnellingen worden gebruikt voor de analyse van de gebouwtrillingen.

Uitgebreidere informatie over de trillingssignalen en de wijze waarop de verscheidene kenmerken zijn berekend, is te vinden in bijlage B.






Een aantal voorbeelden van trillingssignalen is weergegeven in bijlage C (versnellingen en frequenties) en bijlage D (snelheden en frequenties).

2.3 Raamwerk schade-analyse

2.3.1 Algemeen

Tijdens de installatie van de sensor vindt een initiële opname van het gebouw plaats (zie TNO-rapport "Monitoring Network Building Vibrations"; hoofdstuk 11 (ref [01])). Deze opname wordt gebruikt om de initiële schadeklasse te bepalen door het gebouw in te delen volgens de EMS-98 Europese Macroseismische Schaal (zie figuur 2.3 en tabel 2.1). Deze manier van indelen is gekozen om in overeenstemming te zijn met de opzet van de "fragility curves" voor het gebouwenbestand in de regio Groningen (zie ARUP-rapport "Seismic Risk Study Earthquake Scenario-Based Risk Assessment" van 29 november 2013) en omdat deze indeling in veel andere schadeonderzoeken in Europa wordt gebruikt.

De initiële opname beperkt zich tot een inventarisatie van de grote scheuren aan de buitenzijde van de gevels. Deze informatie wordt voldoende geacht om de gebouwschade in te kunnen delen volgens de EMS-schaal.

Classification of damage to masonry buildings	
	Grade 1: Negligible to slight damage (no structural damage, slight non-structural damage) Hair-line cracks in very few walls. Fall of small pieces of plaster only. Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.
	Grade 2: Moderate damage (slight structural damage, moderate non-structural damage) Cracks in many walls. Fall of fairly large pieces of plaster. Partial collapse of chimneys.
	Grade 3: Substantial to heavy damage (moderate structural damage, heavy non-structural damage) Large and extensive cracks in most walls. Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual non-structural elements (partitions, gable walls).
	Grade 4: Very heavy damage (heavy structural damage, very heavy non-structural damage) Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.
	Grade 5: Destruction (very heavy structural damage) Total or near total collapse.

Figuur 2.3: Schade-indeling voor gemetselde gebouwen (EMS-98).

Tabel 2.1: Schadeklasse van gebouwen

Schadeklasse	Beschrijving
DS 0	Geen schade
DS 1	Verwaarloosbare schade ("niet constructief")
DS 2	Matige schade ("licht constructief")
DS 3	Substantiële tot zware schade ("constructief")
DS 4	Zeer zware schade
DS 5	Instorting

2.3.2 Heropnames

Na een aardbeving met een magnitude van $M=2,5$ of meer zijn alle door die aardbeving getriggerde woningen opnieuw opgenomen om te zien of de situatie was veranderd.

Bij deze heropname zijn de al aanwezige scheuren onderzocht om te zien of:

- de lengte en/of breedte was toegenomen;
- de scheuren in de tussentijd zijn gerepareerd;
- gerepareerde scheuren opnieuw zijn gescheurd.

Ook werden nieuwe scheuren gerapporteerd, op dezelfde manier als bij de initiële opname.

Op basis van de resultaten van de heropname is opnieuw de schadeklasse van de getriggerde woningen na de aardbeving bepaald.

2.3.3 *Schadecurven*

Op basis van een vergelijking van de schadeklasse van een gebouw vóór de aardbeving en de schadeklasse na de aardbeving, kan het effect van de aardbeving op individuele gebouwen worden bepaald. Vervolgens kan dit effect worden gekoppeld aan de gemeten trillingen op funderingsniveau tijdens de aardbeving.

Het verband tussen het trillingsniveau en de opgetreden schade kan op verschillende manieren worden gekarakteriseerd. In overeenstemming met de SBR-richtlijn voor trillingsschade (ref [02]) wordt het trillingsniveau bepaald door de pieksnelheid van de gebouwen.

Daarom zijn de schadecurven opgezet op basis van het verband tussen de piektrillingssnelheid op funderingsniveau en de schadeklasse na de aardbeving.

Indien er voldoende gegevens beschikbaar zijn, zullen er ook andere schadecurven worden gemaakt, op basis van andere kenmerken van de trillingen, zoals in relatie tot de piekgrondversnelling (KNMI; in overeenstemming met de fragility curves) of in relatie tot de piekversnelling van de gebouwen.

In de periode tussen twee schade-opnames, kunnen ook andere trillingen van meer dan 1 mm/s hebben plaatsgevonden, die door de sensor geregistreerd zijn. Voorbeelden daarvan zijn: trillingen als gevolg van andere aardbevingen met een magnitude van minder dan $M=2,5$ die in de tussenliggende periode hebben plaatsgevonden, bouwactiviteiten, verkeer enzovoort. Als deze trillingen groter waren dan de trillingen tijdens de geanalyseerde aardbeving, zijn de eigenaars van de gebouwen gevraagd naar de oorzaak van deze trigger. Als die oorzaak heeft geleid tot een algehele trilling van het gebouw is hiermee rekening gehouden bij de analyses. Als de oorzaak te lokaal was (bijvoorbeeld een stoot tegen de sensor), is de meting van de betreffende trilling buiten beschouwing gelaten bij de analyse.

3 Gebouwen getriggert door aardbevingen

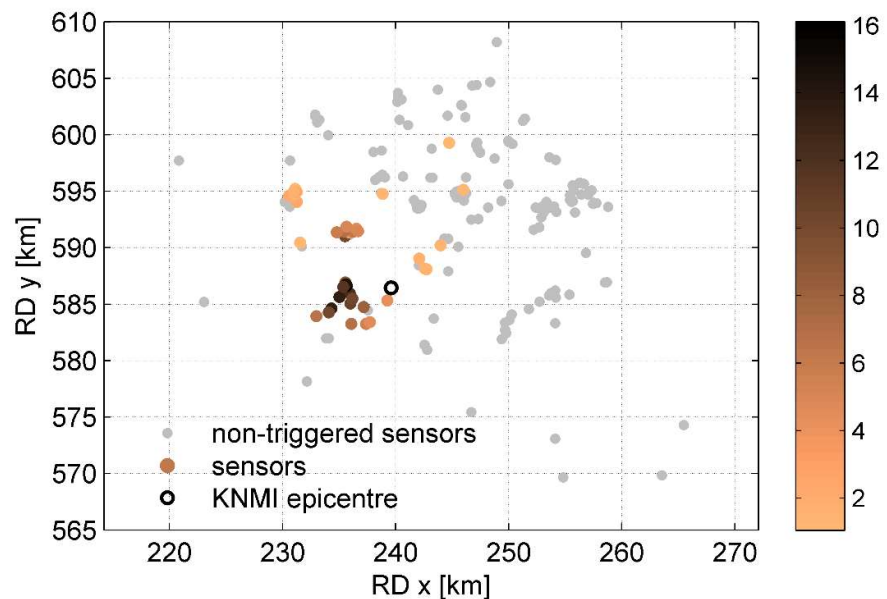
Voor elk van de aardbevingen worden alle gebouwen waarvoor de gemeten trillingssnelheid hoger was dan het triggerniveau van 1 mm/s geanalyseerd. Dit triggerniveau van 1 mm/s wordt algemeen gezien als de ondergrens voor schade als gevolg van trillingen.

3.1 Aardbeving Garmerwolde

Tijdens de aardbeving van Garmerwolde zijn gegevens verzameld van 45 sensoren waarbij de maximale trillingssnelheid (v_{max}) meer was dan 1 mm/s:

- 42 getriggerte gebouwen zijn woningen; deze zijn geselecteerd voor zowel signaalanalyse als schadeanalyse.
- 3 getriggerte gebouwen zijn gemeentehuizen; deze zijn geselecteerd voor signaalanalyse, maar buiten beschouwing gelaten voor de schadeanalyse.

Figuur 3.1 geeft de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) van alle gebouwen in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Garmerwolde zoals opgegeven door het KNMI. Met "niet-getriggerte" sensoren worden hier de sensoren bedoeld waarvoor de maximaal gemeten snelheid minder dan 1 mm/s was en de sensoren die geen trillinggegevens hebben geregistreerd.



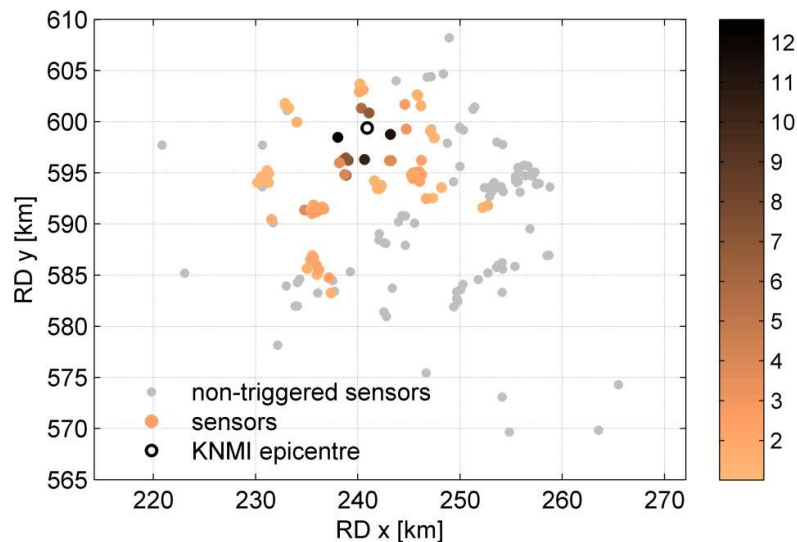
Figuur 3.1: Overzicht van de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden in de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x, y, max}$ mm/s) in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Garmerwolde.

3.2 Aardbeving Zandeweer

Tijdens de aardbeving van Zandeweer zijn gegevens verzameld van 91 sensoren waarbij de maximale trillingssnelheid (v_{max}) meer was dan 1 mm/s:

- 87 getriggerde gebouwen zijn woningen; deze zijn geselecteerd voor zowel signaalanalyse als schadeanalyse.
- 4 getriggerde gebouwen zijn gemeentehuizen; deze zijn geselecteerd voor signaalanalyse, maar buiten beschouwing gelaten voor de schadeanalyse.
- Voor vier van de getriggerde woningen waren lange tijd geen signaalgegevens beschikbaar als gevolg van langdurig ontbreken van een internetverbinding. Daarom zijn deze woningen destijds niet geselecteerd voor een schade-opname en is dus geen schadeopname uitgevoerd.
- Voor één getriggerde woning heeft geen schade-opname plaatsgevonden vanwege langdurige bouwwerkzaamheden in die periode.

Figuur 3.2 geeft de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) van alle gebouwen in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Zandeweer zoals opgegeven door het KNMI. Met "niet-getriggerde" sensoren worden hier de sensoren bedoeld waarvoor de maximaal gemeten snelheid minder dan 1 mm/s was en de sensoren die geen trillinggegevens hebben geregistreerd.



Figuur 3.2: Overzicht van de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden van de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$ mm/s) in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Zandeweer.

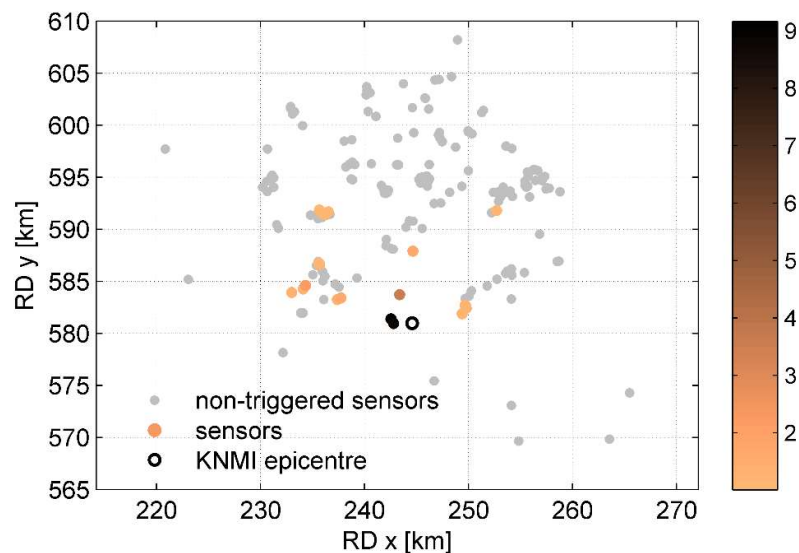
3.3 Aardbeving Woudbloem

Tijdens de aardbeving van Woudbloem zijn gegevens verzameld van 23 sensoren waarbij de maximale trillingssnelheid (v_{max}) meer was dan 1 mm/s:

- 22 getriggerde gebouwen zijn woningen; deze zijn geselecteerd voor zowel signaalanalyse als schadeanalyse.

- 1 getriggerd gebouw is een gemeentehuis; deze is geselecteerd voor signaalanalyse, maar buiten beschouwing gelaten voor de schadeanalyse.
- Voor één getriggerde woning is geen "event file" (dit is een uitgebreid bestand van het trillingssignaal tijdens de beving) gegenereerd, doordat de trillingssnelheid precies het triggerniveau van 1 mm/s had. Daarom is alleen een schadeanalyse opgenomen en geen signaalanalyse.

Figuur 3.3 geeft de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) van alle gebouwen in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Woudbloem zoals opgegeven door het KNMI. Met "niet-getriggerde" sensoren worden hier de sensoren bedoeld waarvoor de maximaal gemeten snelheid minder dan 1 mm/s was en de sensoren waarvan die geen trillinggegevens hebben geregistreerd.



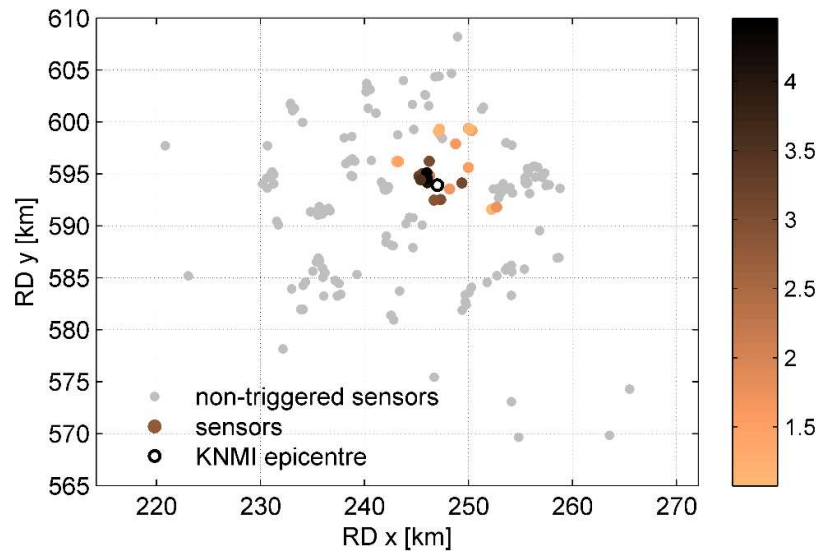
Figuur 3.3: Overzicht van de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden in de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x, y,max}$ mm/s) in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Woudbloem.

3.4 Aardbeving Wirdum

Tijdens de aardbeving van Wirdum zijn gegevens verzameld van 38 sensoren waarbij de maximale trillingssnelheid (v_{max}) meer was dan 1 mm/s:

- 37 getriggerde gebouwen zijn woningen; deze zijn geselecteerd voor zowel signaalanalyse als schadeanalyse.
- 1 getriggerd gebouw is een gemeentehuis; deze is geselecteerd voor signaalanalyse, maar buiten beschouwing gelaten voor de schadeanalyse.

Figuur 3.4 geeft de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) van alle gebouwen in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Wirdum zoals opgegeven door het KNMI. Met "niet-getriggerde" sensoren worden hier de sensoren bedoeld waarvoor de maximaal gemeten snelheid minder dan 1 mm/s was en de sensoren die geen trillinggegevens hebben geregistreerd.



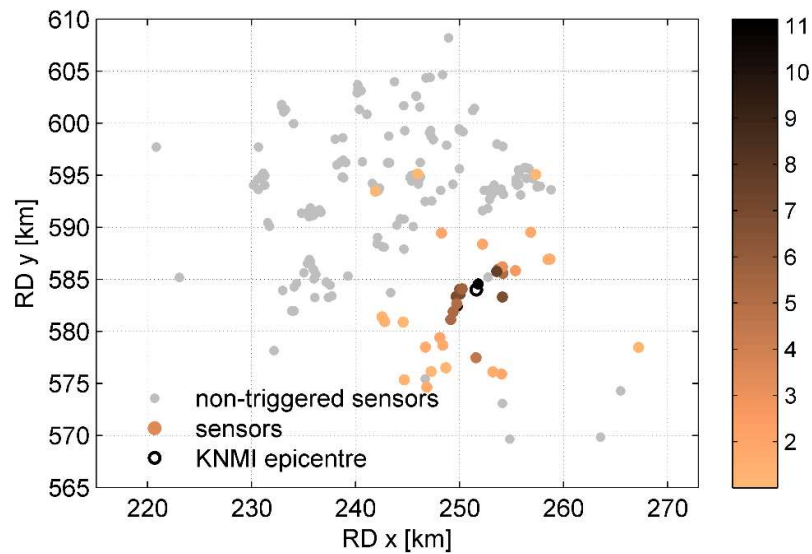
Figuur 3.4: Overzicht van de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden in de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$ mm/s) in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Wirdum.

3.5 Aardbeving Hellum

Tijdens de aardbeving van Hellum zijn gegevens verzameld van 40 sensoren waarbij de maximale trillingssnelheid (v_{max}) meer was dan 1 mm/s:

- 38 getriggerde gebouwen zijn woningen; deze zijn geselecteerd voor zowel signaalanalyse als schadeanalyse.
- 2 getriggerde gebouwen zijn gemeentehuizen; deze zijn geselecteerd voor signaalanalyse, maar buiten beschouwing gelaten voor de schadeanalyse.
- Voor één getriggerde woning is geen "event file" (dit is een uitgebreid bestand van het trillingssignaal tijdens de beving) gegenereerd, doordat de trigger precies het triggerniveau van 1 mm/s had. Daarom is alleen een schadeanalyse opgenomen en geen signaalanalyse.
- Voor twee woningen waren geen trillingsgegevens beschikbaar als gevolg van een defect in de meetapparatuur. Op basis van de trillingsgegevens van nabijgelegen woningen mag echter worden verwacht dat het trillingsniveau in deze twee woningen het triggerniveau heeft overschreden. Daarom zijn deze twee woningen ook geselecteerd voor schadeanalyse.

Figuur 3.5 geeft de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) van alle gebouwen in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Hellum zoals opgegeven door het KNMI. Met "niet-getriggerde" sensoren worden hier de sensoren bedoeld waarvoor de maximaal gemeten snelheid minder dan 1 mm/s was en de sensoren die geen trillinggegevens hebben geregistreerd.



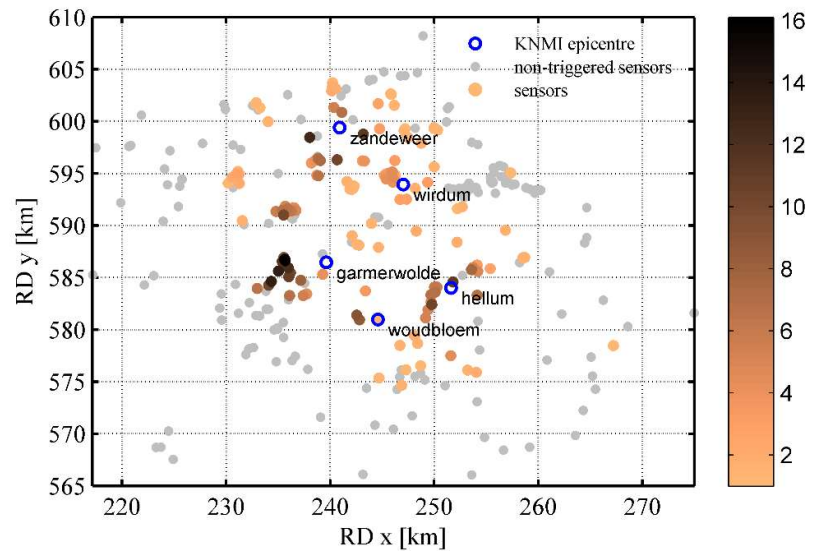
Figuur 3.5: Overzicht van de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden in de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$ mm/s) in relatie tot het epicentrum van de aardbeving van Hellum.

3.6 Samenvattend overzicht

Figuur 3.6 geeft de maximaal gemeten horizontale component van de trillings-snelheden in de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) van alle gebouwen, veroorzaakt door de vijf geanalyseerde aardbevingen. Ook zijn de epicentra van de aardbevingen zoals opgegeven door het KNMI vermeld.

Met "niet-getriggerde" sensoren worden de sensoren bedoeld

- waarvoor de maximaal gemeten snelheid minder dan 1 mm/s was;
- waarvoor geen gegevens zijn geregistreerd (verbroken internetverbinding);
- die waren geïnstalleerd ten tijde van de laatste aardbeving, maar niet waren geïnstalleerd ten tijde van een eerdere aardbeving.



Figuur 3.6: Overzicht van de maximaal gemeten horizontale component van de trillingssnelheden in de gebouwen op funderingsniveau ($v_{x, y, max}$ mm/s) in relatie tot de epicentra van de vijf aardbevingen.

4 Trillingskenmerken

De trillingssignalen van de getriggerde gebouwen zijn geregistreerd gedurende een periode van 30 s, ongeveer 10 s voor en 20 s na het begin van het trillingssignaal. Deze registraties zijn opgeslagen in zogenoemde "event files". Van vijf aardbevingen zijn in totaal 235 event files verzameld en gebruikt voor de analyse.

4.1 Algemene informatie met betrekking tot versnelling

Bijlage C van dit rapport geeft een aantal voorbeelden van de gemeten versnellingssignalen. Dezelfde bijlage bevat ook grafieken van de frequentie-inhoud van elk signaal.

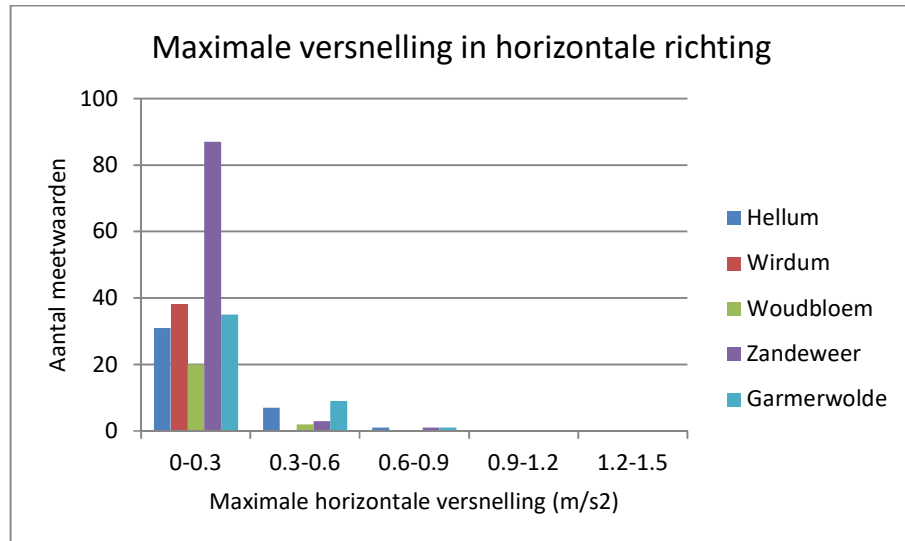
4.1.1 *Piekversnellingen*

De berekende trillingskenmerken met betrekking tot de versnelling van de vijf aardbevingen zijn samengevat in de figuren 4.1 - 4.4, met daarin de volgende informatie:

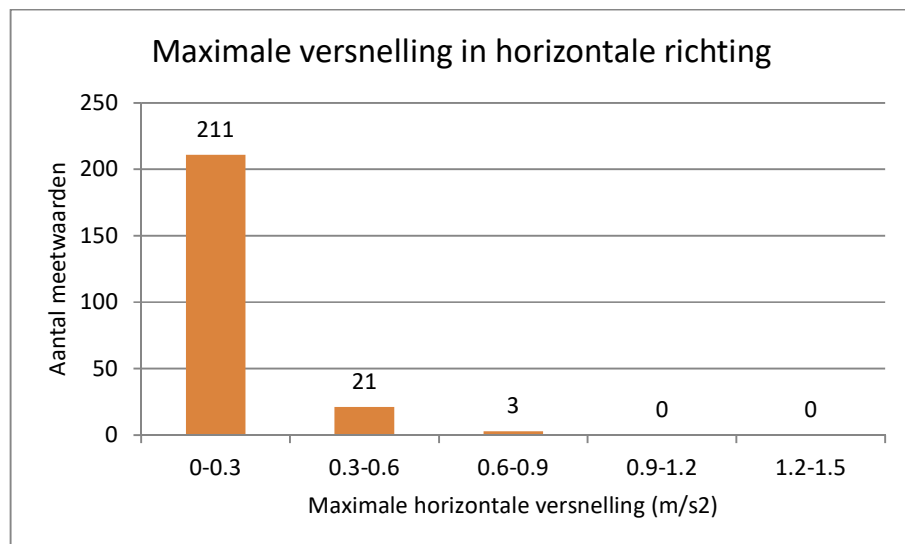
- De verdeling van de piekversnelling in de gebouwen in horizontale richting, voor elk van de vijf aardbevingen (figuur 4.1) en voor alle vijf de aardbevingen samen (figuur 4.2).
- De verdeling van de piekversnelling in de gebouwen in verticale richting, voor elk van de vijf aardbevingen (figuur 4.3) en voor alle vijf de aardbevingen samen (figuur 4.4).

Uit de figuren 4.1 - 4.4 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

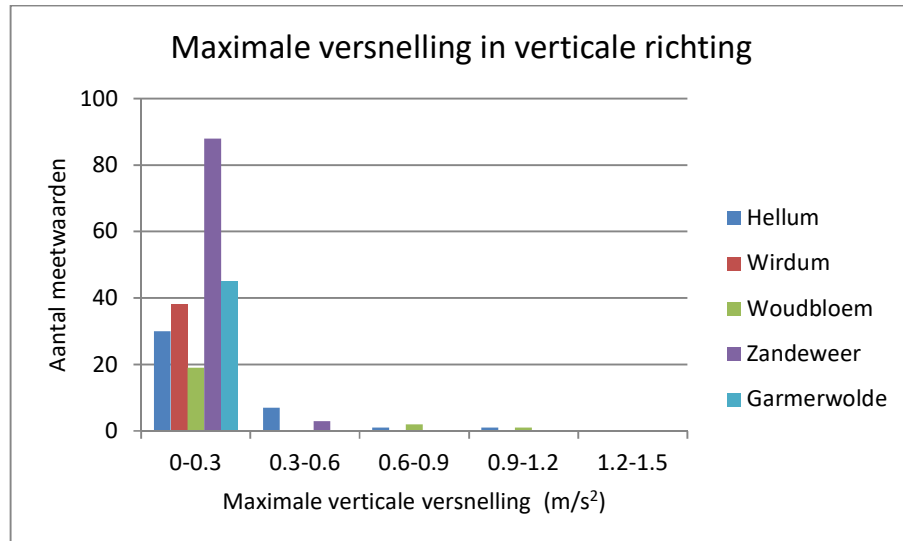
- Van alle door de vijf aardbevingen getriggerde gebouwen registreerde 90% van de sensoren een horizontale piekversnelling van maximaal $0,3 \text{ m/s}^2$. De overige 10% registreerde een horizontale piekversnelling van $0,3 - 0,6 \text{ m/s}^2$ (9%) en $0,6 - 0,9 \text{ m/s}^2$ (1%). De maximaal geregistreerde horizontale piekversnelling was $0,7 \text{ m/s}^2$.
- Van alle door de vijf aardbevingen getriggerde gebouwen registreerde 94% van de sensoren een verticale piekversnelling van maximaal $0,3 \text{ m/s}^2$. De overige 6% registreerde een verticale piekversnelling van $0,3 - 0,6 \text{ m/s}^2$ (4%), $0,9 - 1,2 \text{ m/s}^2$ (1%) en $1,2 - 1,5 \text{ m/s}^2$ (1%). De maximaal geregistreerde verticale piekversnelling was $1,2 \text{ m/s}^2$.



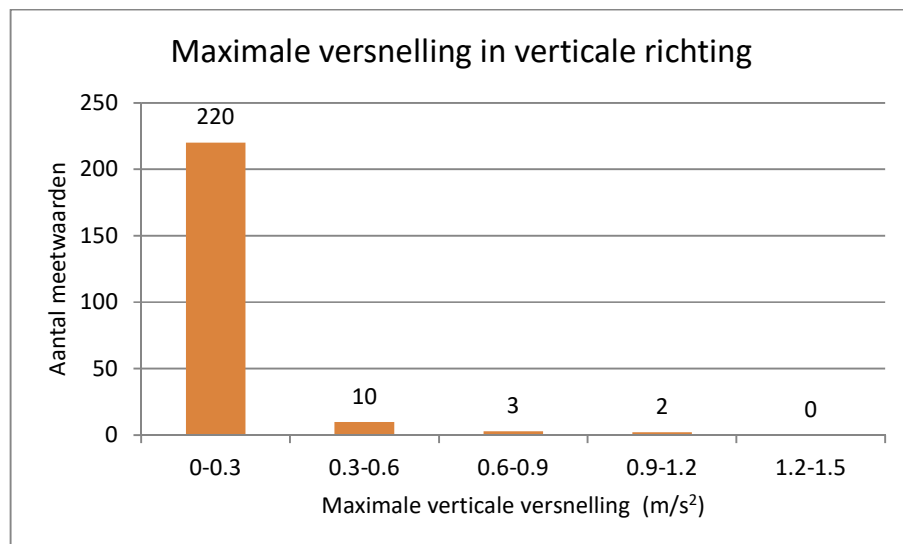
Figuur 4.1: *Piekversnelling (horizontaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor elk van de vijf geanalyseerde aardbevingen.*



Figuur 4.2: *Piekversnelling (horizontaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor de vijf geanalyseerde aardbevingen samen.*



Figuur 4.3: *Piekversnelling (verticaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor elk van de vijf geanalyseerde aardbevingen.*



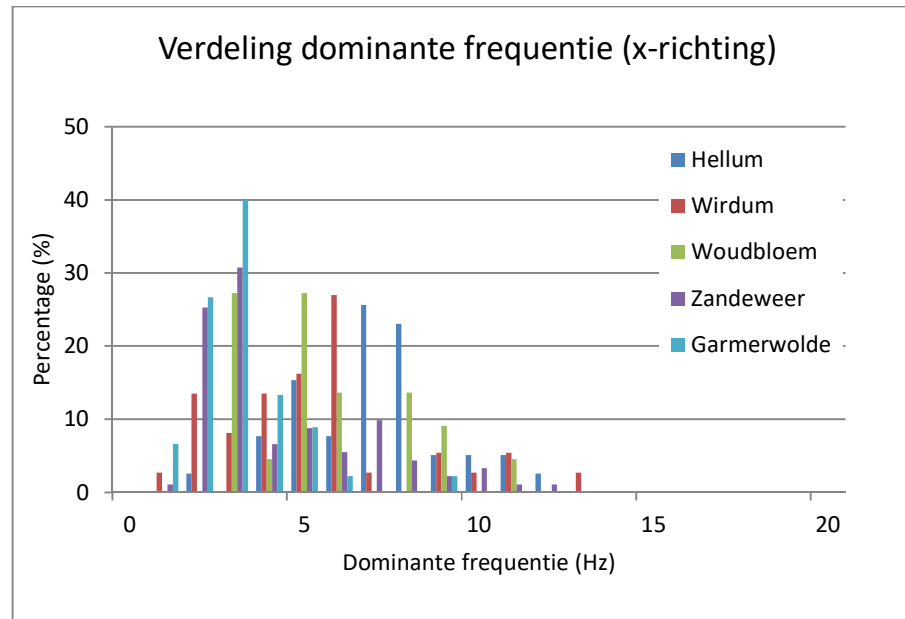
Figuur 4.4: *Piekversnelling (verticaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor de vijf geanalyseerde aardbevingen samen.*

4.1.2 Dominante frequenties

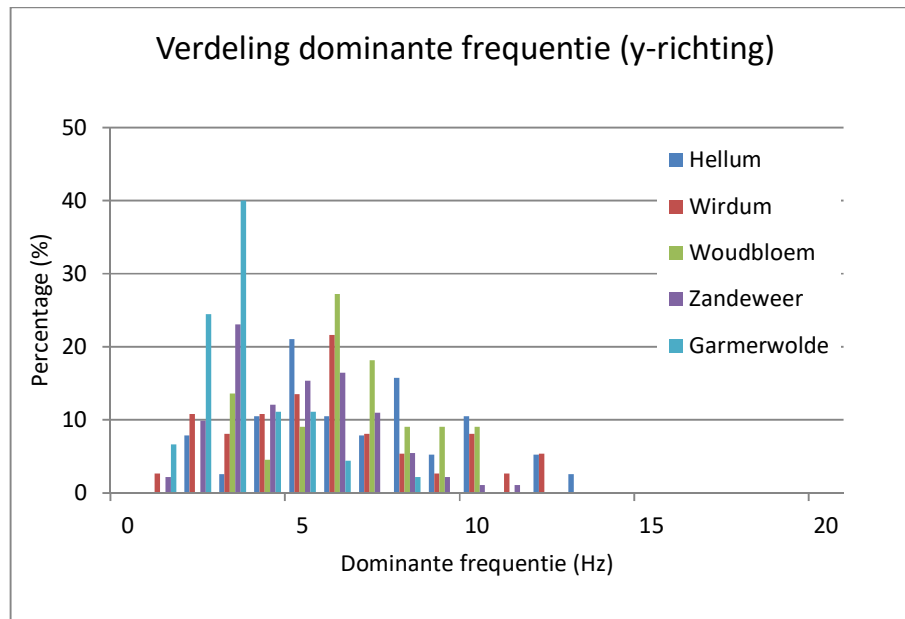
De verdeling van de dominante frequentie van de versnellingen is geanalyseerd om zo een vergelijking te kunnen maken van de dominante frequentie van de trillingen in de gebouwen op funderingsniveau met die van de bodemtrillingen. Bij de meeste sensoren is in de versnellingsmetingen geen significante frequentie-inhoud hoger dan 25 Hz waargenomen voor de x- en y-kanalen. Sommige sensorregistraties met piekversnellingen van 0,4 m/s² en hoger vertoonden een frequentie-inhoud tot 35-40 Hz voor de x- en y-kanalen (zie bijlage C voor een selectie van signalen). Voor de verticale versnellingen (het z-kanaal) is bij de meeste sensorregistraties geen significante frequentie-inhoud hoger dan 40 Hz waargenomen. Een paar sensoren registreerden een frequentie-inhoud tot 60 Hz in het verticale kanaal.

De dominante frequentie is de frequentie die het sterkst aanwezig is in de signalen, de frequentie waarbij de grootste piek optreedt in het spectrum (zie voorbeeldspectra in bijlage C). Voor de horizontale versnellingen blijft de dominante frequentie lager dan 15 Hz. Voor de verticale versnellingen (z-kanaal) lager dan 25Hz.

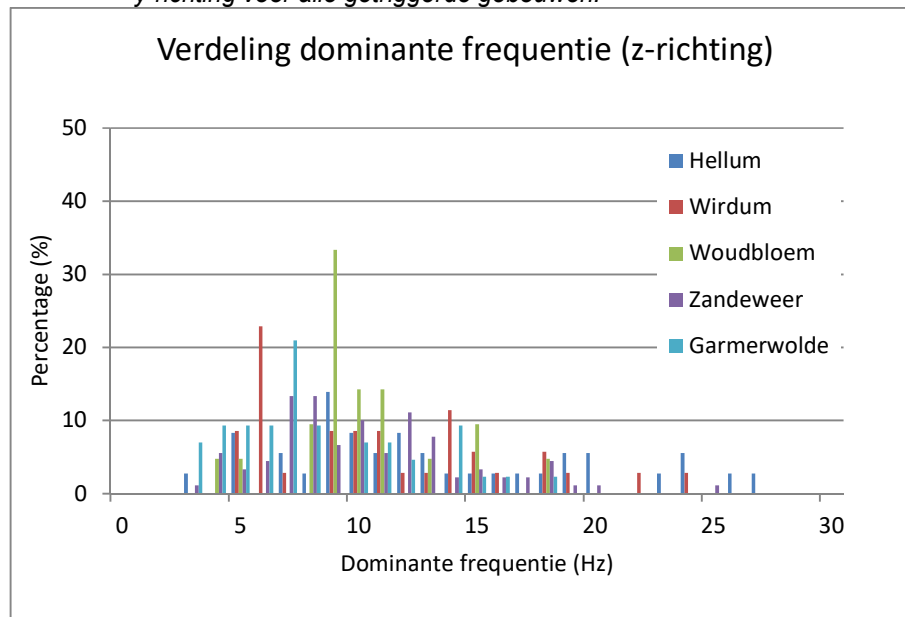
De dominante frequenties zijn weergegeven in de figuren 4.5 - 4.6. Voor de x- en y-kanalen zijn de dominante frequenties voor de versnelling gemiddeld 8 Hz met een 95% bovengrens van 12 Hz. Voor het z-kanaal is de gemiddelde dominante frequentie 13 Hz met een 95% bovengrens van 25 Hz.



Figuur 4.5: Verdeling van de dominante frequentie van de versnellingen; x-richting voor alle getriggerde gebouwen



Figuur 4.6: Verdeling van de dominante frequentie van de trillingsversnellingen; y-richting voor alle getriggerde gebouwen.



Figuur 4.7: Verdeling van de dominante frequentie van de versnellingen; z-richting voor alle getriggerde gebouwen.

4.2 Algemene informatie met betrekking tot snelheid

Bijlage D van dit rapport geeft een aantal voorbeelden van de signalen met de gemeten trillingsnelheid.

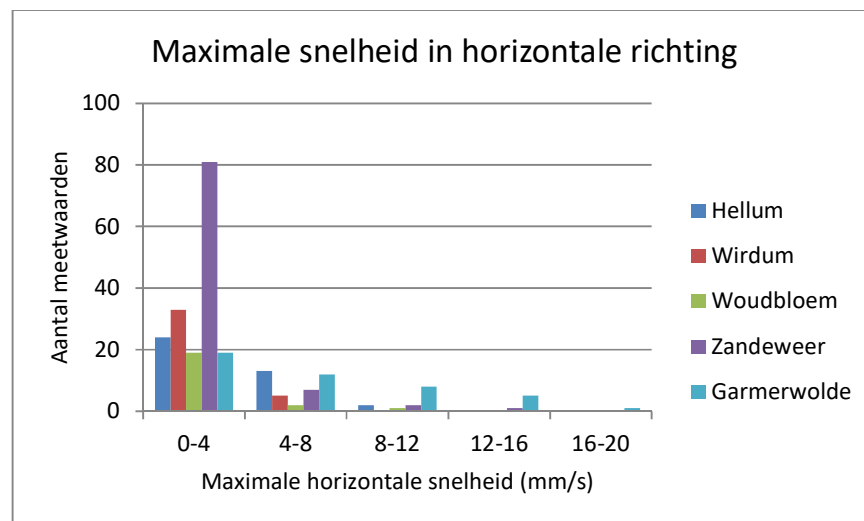
4.2.1 *Pieksnelheden*

De berekende trillingskenmerken met betrekking tot de snelheid van de vijf aardbevingen zijn samengevat in de figuren 4.8 - 4.11, met daarin de volgende informatie:

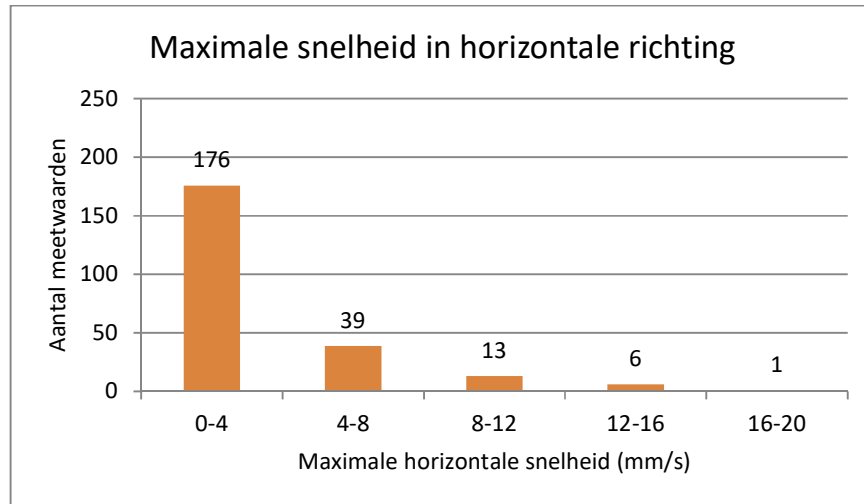
- De verdeling van de pieksnelheid in de gebouwen in horizontale richting, voor elk van de vijf aardbevingen (figuur 4.8) en voor alle vijf de aardbevingen samen (figuur 4.9).
- De verdeling van de pieksnelheid in de gebouwen in verticale richting, voor elk van de vijf aardbevingen (figuur 4.10) en voor alle vijf de aardbevingen samen (figuur 4.11).

Uit figuren 4.8 - 4.11 kan het volgende worden geconcludeerd:

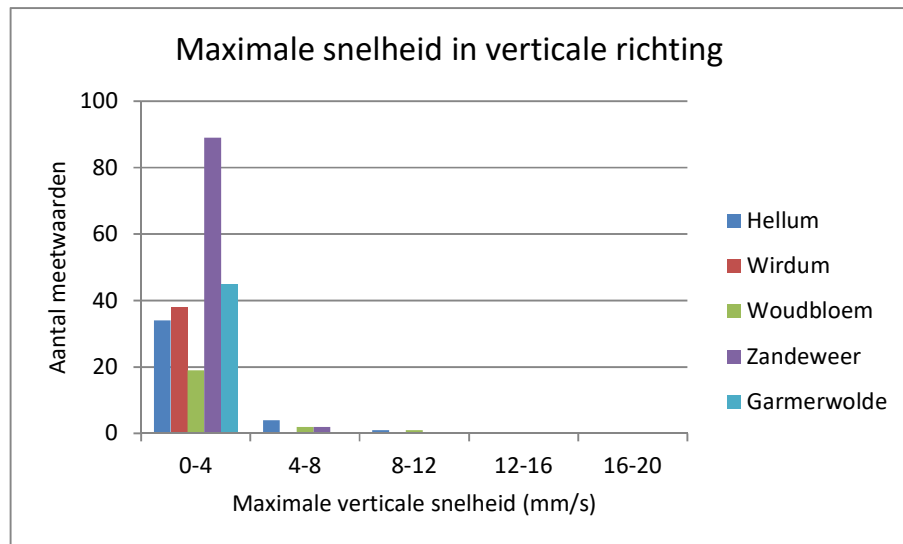
- Van alle door de vijf aardbevingen getriggerde gebouwen registreerde 75% van de sensoren een horizontale pieksnelheid van maximaal 4 mm/s. De maximaal geregistreerde horizontale pieksnelheid was 16,1 mm/s.
- Van alle door de vijf aardbevingen getriggerde gebouwen registreerde 96% van de sensoren een verticale pieksnelheid van maximaal 4 mm/s. De maximaal gemeten verticale pieksnelheid was 8,6 mm/s.



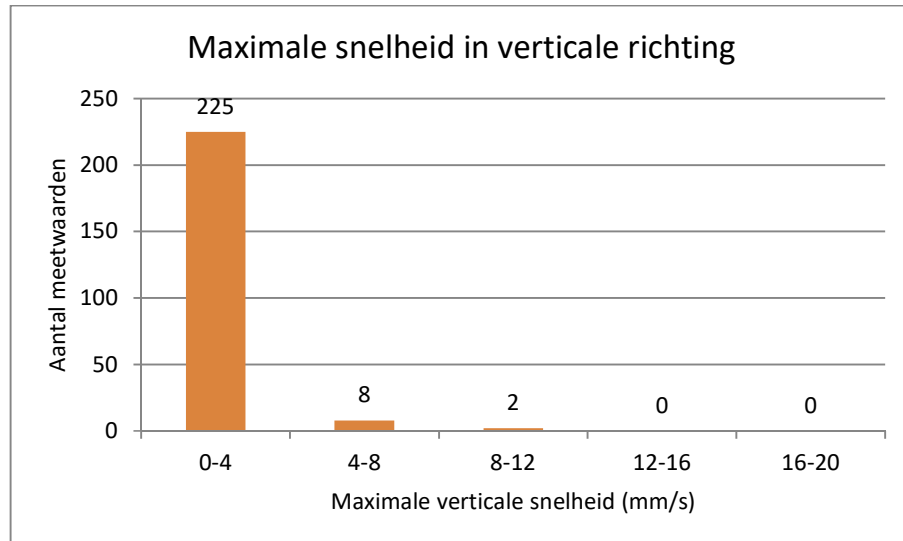
Figuur 4.8: *Pieksnelheid (horizontaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor elk van de vijf geanalyseerde aardbevingen.*



Figuur 4.9: *Pieksnelheid (horizontaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor de vijf geanalyseerde aardbevingen samen.*



Figuur 4.10: *Pieksnelheid (verticaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor elk van de vijf geanalyseerde aardbevingen.*

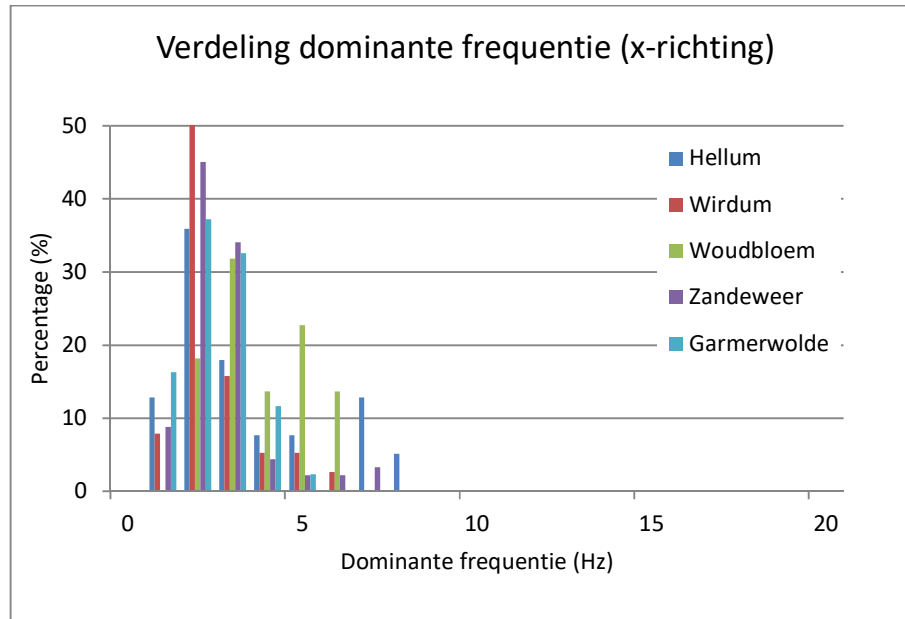


Figuur 4.11: Pieksnelheid (verticaal) van de trilling in de getriggerde gebouwen voor de vijf geanalyseerde aardbevingen samen.

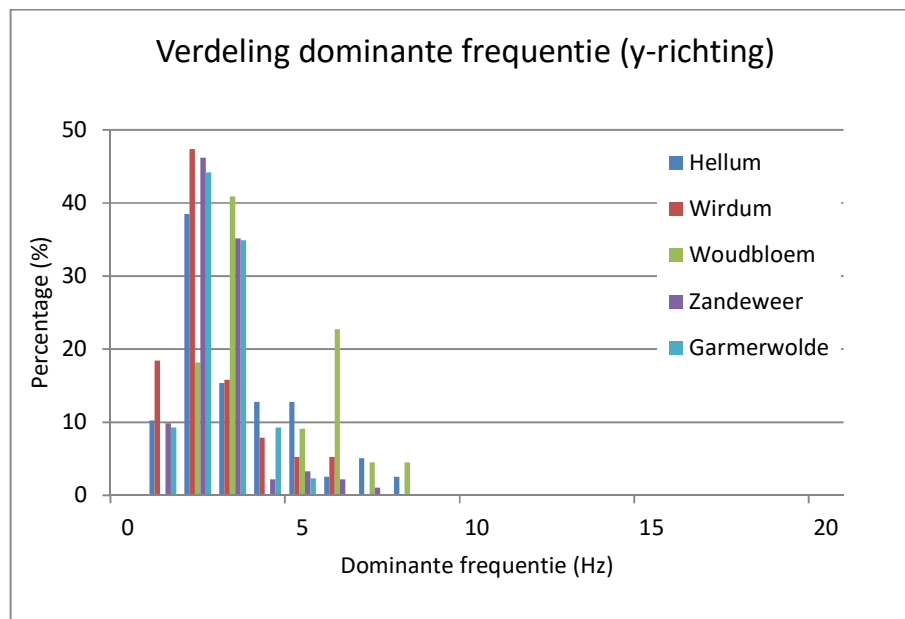
4.2.2 Dominante frequenties

De verdeling van de dominante frequentie van de trillingsnelheden is geanalyseerd. Zoals verwacht vertonen de frequentiespectra van de snelheden, ten opzichte van die van de versnellingen, een verschuiving van de inhoud naar de lagere frequenties zonder significante inhoud hoger dan 10 Hz voor de x- en y-kanalen en hoger dan 15 Hz voor het z-kanaal (zie bijlage D voor een selectie van signalen).

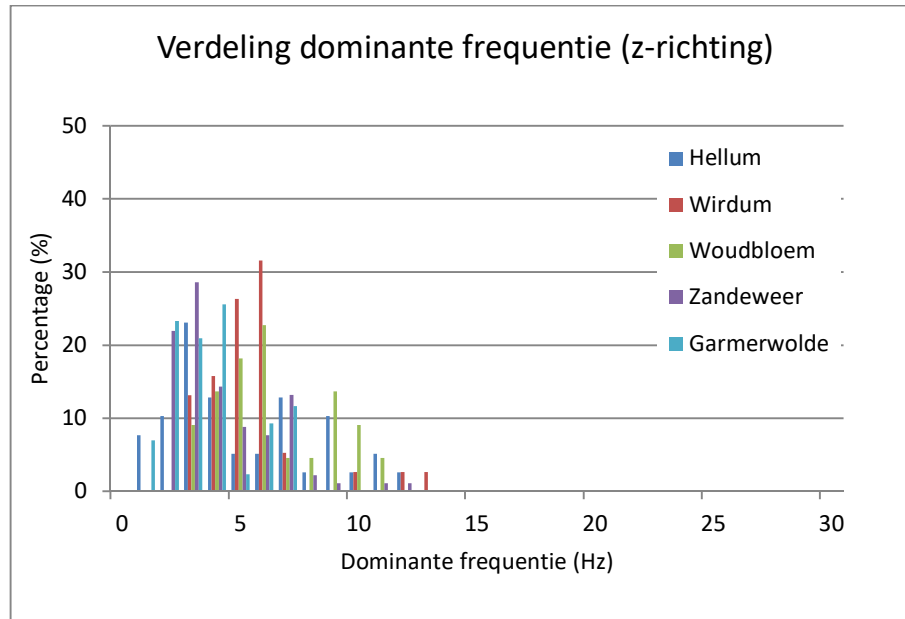
De dominante frequenties zijn weergegeven in figuren 4.12 - 4.14. Voor de x- en y-kanalen zijn de dominante frequenties voor snelheid gemiddeld 2,5 Hz. Voor het z-kanaal is de gemiddelde dominante frequentie 5 Hz.



Figuur 4.12: Verdeling van de dominante frequentie van de trillingsnelheid; x-richting voor alle getriggerde gebouwen.



Figuur 4.13: Verdeling van de dominante frequentie van de trillingsnelheid; y-richting voor alle getriggerde gebouwen.

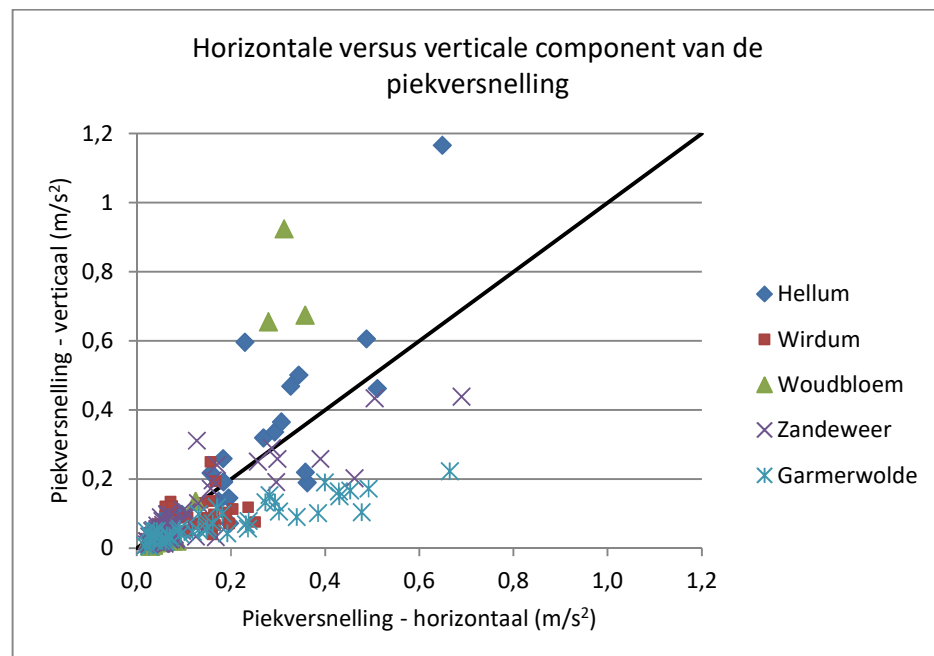


Figuur 4.14: Verdeling van de dominante frequentie van de trillingssnelheid; z-richting voor alle getriggerde gebouwen.

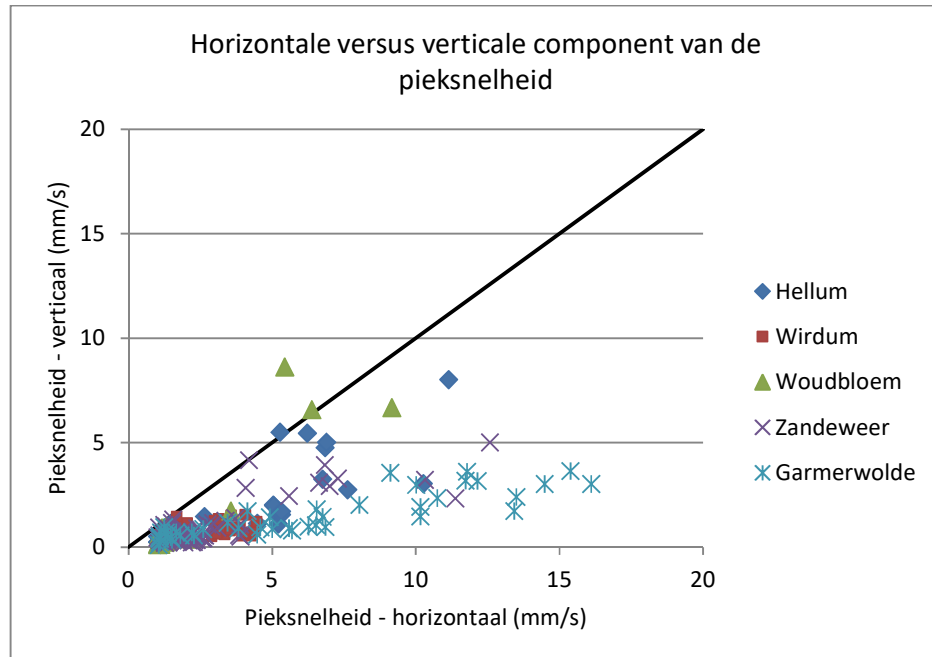
5 Analyse trillingskenmerken

5.1 Horizontale versus verticale component van de trillingen

De horizontale en de verticale component van de trilling van elk getriggerd gebouw zijn met elkaar vergeleken om te zien welke richting de sterkste trilling geeft. Dit is gedaan voor zowel de piekversnelling (figuur 5.1) als de pieksnelheid (figuur 5.2). Uit deze figuren blijkt dat bij ongeveer 70% van de gemeten trillingen, de horizontale component van de versnelling dominant is ten opzichte van de verticale component. Ten aanzien van de snelheid, is de horizontale component bijna altijd dominant ten opzichte van de verticale component.



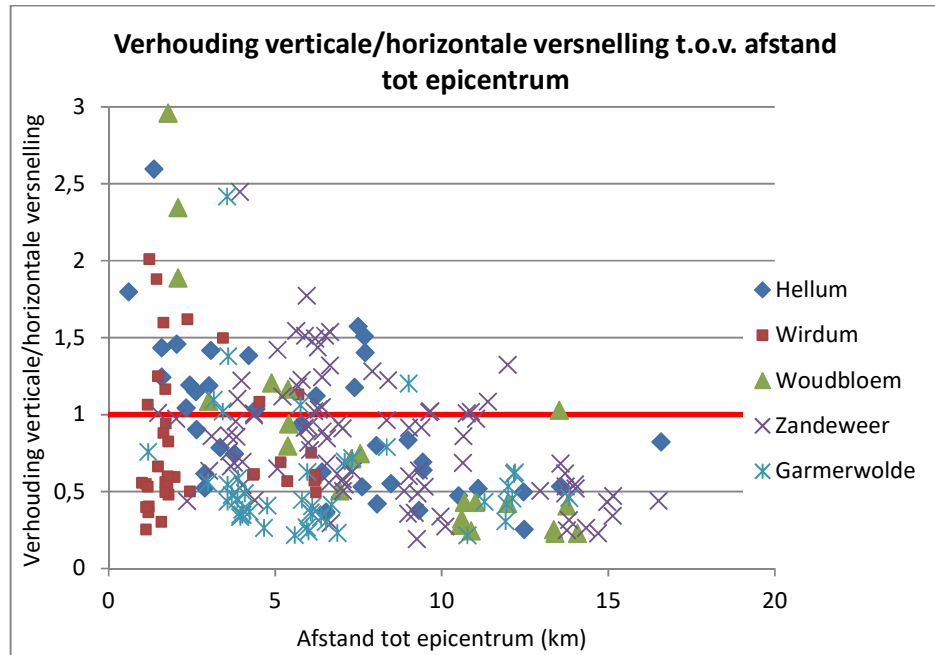
Figuur 5.1: Horizontale versus verticale component van de piekversnelling voor alle getriggerde gebouwen.



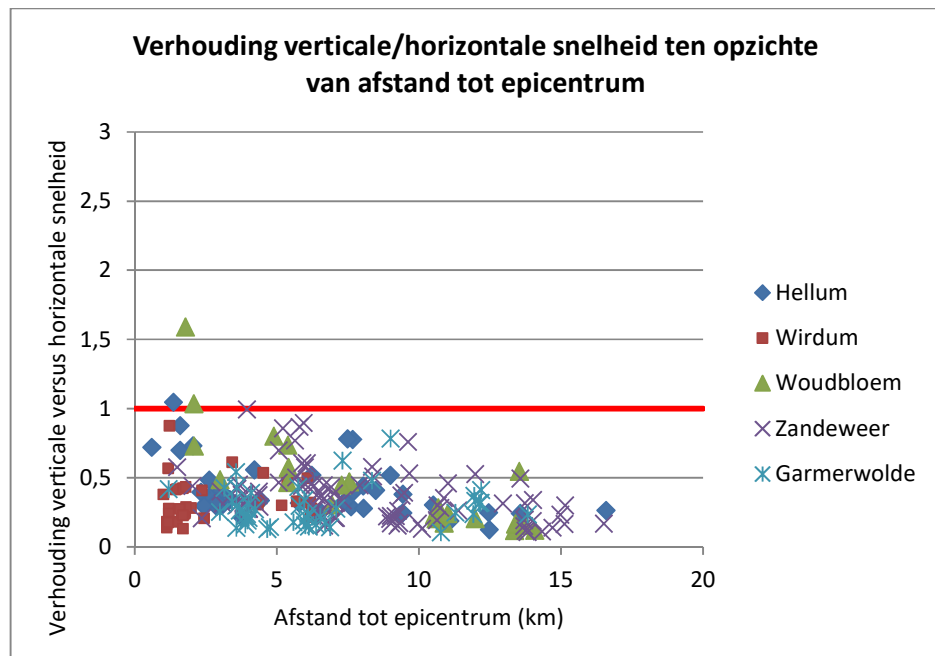
Figuur 5.2: Horizontale versus verticale component van de pieksnelheid voor alle getriggerde gebouwen.

Teneinde na te gaan of de afstand tot het epicentrum van invloed is op de verhouding van de horizontale ten opzichte van de verticale component, is in figuren 5.3 en 5.4 de verhouding tussen de componenten weergegeven in relatie tot de afstand tot het epicentrum. Dit is gedaan voor zowel de piekversnelling (figuur 5.3) als de pieksnelheid (figuur 5.4).

Uit deze figuren kan worden geconcludeerd dat de verticaal/horizontaal-verhouding dicht bij het epicentrum groter is en dat deze afneemt naarmate de afstand tot het epicentrum groter wordt.



Figuur 5.3: Verhouding van de verticale/horizontale piekversnelling ten opzichte van de afstand tot het epicentrum voor alle getriggerde gebouwen.

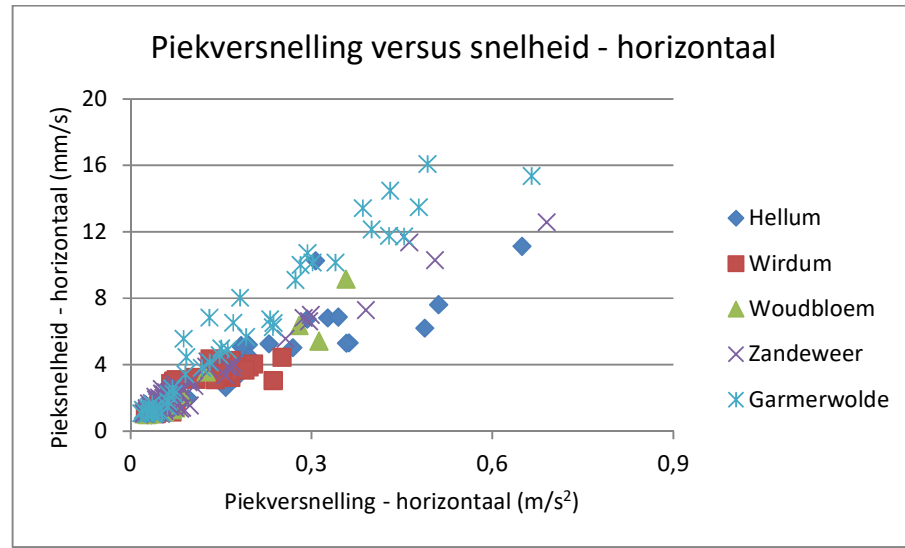


Figuur 5.4: Verhouding van de horizontale/verticale pieksnelheid ten opzichte van de afstand tot het epicentrum voor alle getriggerde gebouwen.

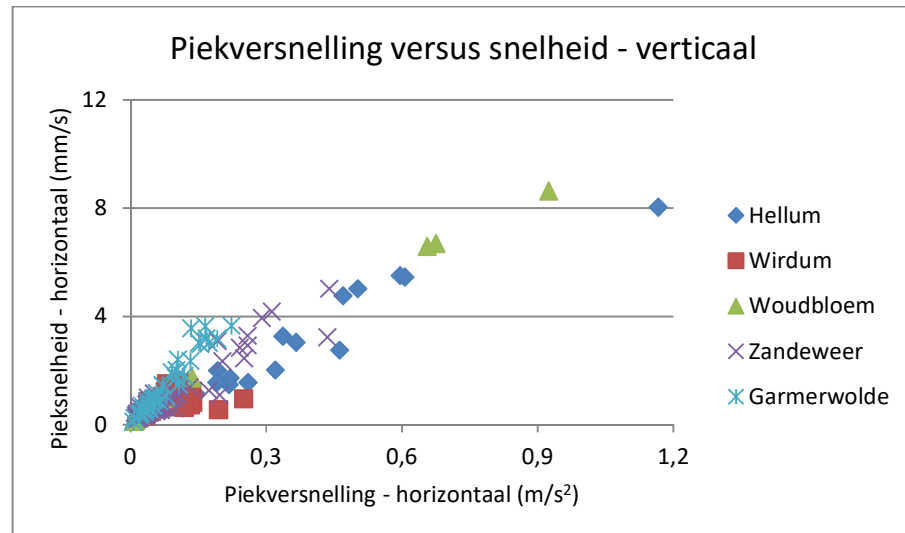
5.2 Piekversnelling versus pieksnelheid

De piekversnelling en de pieksnelheid zijn met elkaar vergeleken om het verband tussen deze twee kenmerken te vinden. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in de figuren 5.5 en 5.6 voor respectievelijk de horizontale en de verticale richting.

Deze figuren tonen een tamelijk lineair verband tussen de piekversnelling en de pieksnelheid voor de meeste gebouwen.



Figuur 5.5: *Piekversnelling versus de pieksnelheid (horizontaal) voor alle gebouwen getriggerd door de vijf geanalyseerde aardbevingen.*



Figuur 5.6: *Piekversnelling versus de pieksnelheid (verticaal) voor alle gebouwen getriggerd door de vijf geanalyseerde aardbevingen.*

6 Herhalingsopname schade

6.1 Algemeen

De woningen waarvoor de gemeten trillingsnelheid, tijdens een aardbeving, het triggerniveau van 1 mm/s heeft overschreden, zijn opnieuw bezocht voor het uitvoeren van een herhalingsopname. In totaal zijn 167 herhalingsopnames uitgevoerd als gevolg van de vijf aardbevingen. Het totale aantal herhalingsopnames is lager dan het totale aantal "event files" zoals beschreven in de hoofdstukken 4 en 5, om de volgende redenen:

- Alleen getriggerde woningen zijn geselecteerd voor een schadeanalyse. Andere getriggerde gebouwen, zoals gemeentehuizen, zijn buiten beschouwing gelaten voor de schadeanalyse.
- Sommige woningen hebben het triggerniveau twee keer overschreden in de periode tussen twee opnames, als gevolg van twee opeenvolgende aardbevingen.
- Bij enkele woningen is geen herhalingsopname uitgevoerd wegens bouwactiviteiten in de betreffende periode.
- Enkele woningen waren niet geselecteerd voor een opname omdat de trillingsgegevens voor deze woningen pas veel later beschikbaar waren als gevolg van het langdurig ontbreken van een internetverbinding.

De in totaal 167 herhalingsopnames zijn als volgt onderverdeeld:

- 145 individuele woningen waar een eerste herhalingsopname is uitgevoerd
- 21 van deze woningen waarbij ook een tweede herhalingsopname is uitgevoerd
- 1 van deze woningen waarbij ook een derde herhalingsopname is uitgevoerd.

6.2 Maatgevende trillingsnelheid

Om de schade in verband te kunnen brengen met een bepaald trillingsniveau is het noodzakelijk om te weten of de woningen ook zijn onderworpen aan trillingen die door andere bronnen zijn veroorzaakt. Voor de periode tussen twee opnames is daarom bij de betreffende woningen nagegaan of er ook andere triggers zijn geweest. Indien dit het geval was, zijn de eigenaren van de woningen gevraagd naar een mogelijke verklaring van deze triggers.

Voor sommige gebouwen was het trillingsniveau, dat door een andere bron was veroorzaakt, hoger dan het trillingsniveau dat was veroorzaakt door een aardbeving. In het geval van een lokale bron, zoals de bevestiging van een afdekkap op de sensor, zijn deze geregistreeerde trillingen buiten beschouwing gelaten. In het geval van een (externe) bron die waarschijnlijk heeft geleid tot een trilling van het gehele gebouw is deze trilling wel mee in rekening gebracht.

Een overzicht van de genoemde bronnen is te vinden in tabel 6.1, met daarbij voor elke bron of deze wel of niet is meegeteld.

Tabel 6.1: Triggers veroorzaakt door andere bronnen dan de aardbeving

Trigger (mm/s)	Bron	Meegeteld
1 - 4	Bouwactiviteiten in de omgeving	ja
1 - 6	Wegwerkzaamheden	ja
2	Verkeer (bvb. verkeersdrempel)	ja
2 - 8	Zware bouwactiviteiten, o.a. gebruik van zware boorapparatuur, sloopactiviteiten, vellen van boom	ja
7	Treinverkeer (goederenvervoer)	ja
1 - 10	Onbekend	ja
1 - 35	Lokale bouwactiviteiten dicht bij de locatie van de sensor, zoals vervangen van kabels, vervangen van kozijnen, installatie van een omvormer voor zonnepanelen, spouwmuurisolatie, reparatieactiviteiten	nee
2 - 8	Dichtslaande deuren; met schoenen tegen de muur schoppen dicht bij de sensor.	nee
10 - 80	Onbekend	nee
20 - 140	Bevestigen afdekkap sensor; stoot tegen sensor	nee

6.3 Geregistreerde scheuren

De in totaal 167 herhalingsopnames leverden de volgende informatie op:

- In de initiële/voorgaande opname werden in totaal 1364 scheuren geregistreerd. De herhalingsopnames hebben uitgewezen dat 16 van deze scheuren wijder en/of langer zijn geworden (ongeveer 1%).
- Het totale aantal nieuw geregistreerde scheuren is 579.
- De meeste nieuw geregistreerde scheuren waren relatief klein en kort en behoorden tot scheurwijdtecategorie A.

Het doel van de initiële opname was het registreren van grote scheuren, teneinde de schadeklasse (DS) van de woning te kunnen bepalen. Op dat moment was het niet de bedoeling een totale inventarisatie uit te voeren waarbij ook de kleinste scheuren worden meegenomen.

Tijdens de eerste herhalingsopnames was onduidelijkheid of scheuren, met name kleine scheuren, al aanwezig waren of veroorzaakt waren door de aardbeving. Om die reden is toen alsnog besloten ook kleine scheuren op te nemen. Als gevolg hiervan komen bij de eerste herhalingsopnames relatief meer scheuren voor dan bij de initiële opnames.

6.4 Reparaties

Bij 21 woningen zijn reparaties uitgevoerd in de periode tussen twee opnames. Bij gerepareerde scheuren is gecontroleerd of deze al dan niet opnieuw waren gescheurd. Ongeveer 2% van de gerepareerde scheuren was na de aardbeving opnieuw gescheurd.

7 Analyse herhalingsopnames

7.1 Initiële opnames

Op basis van de resultaten van de initiële opname zijn alle woningen ingedeeld in schadeklassen zoals beschreven in paragraaf 2.3. Tabel 7.1 geeft een overzicht van de verdeling van schadeklassen voor alle woningen in het monitoringsnetwerk per november 2015. Uit deze tabel volgt dat het grootste deel van de woningen in het monitoringsnetwerk bij de initiële opname al scheuren had in de buitengevels.

Tabel 7.1: Initiële schadeklasse van de huizen in het monitoringsnetwerk

Schadeklasse na initiële opname	
DS 0	15%
DS 1	60%
DS 2	24%
DS 3	1%

7.2 Schadecurven

Op basis van de foto's en resultaten van de herhalingsopname zijn de schadeklassen van de gebouwen na een aardbeving opnieuw ingedeeld volgens het volgende schema:

Gebouwen ingedeeld in DS 0 bij vorige opname

- DS 0→DS 0 = in DS 0 gebleven
- DS 0→DS 1 = schadeklasse toegenomen tot DS 1
- DS 0→DS 2 = schadeklasse toegenomen tot DS 2

Gebouwen ingedeeld in DS 1 bij vorige opname

- DS 1→DS 0 = gerepareerd tot DS 0 en in DS 0 gebleven
- DS 1→DS 1 = in DS 1 gebleven
- DS 1→DS 1' = in DS 1 gebleven, maar toename van het aantal en/of de lengte en/of de breedte van de scheuren
- DS 1→DS 2 = schadeklasse toegenomen tot DS 2

Gebouwen ingedeeld in DS 2

- DS 2→DS 1 = gerepareerd tot DS 1 en in DS 1 gebleven
- DS 2→DS 2 = in DS 2 gebleven
- DS 2→DS 2' = in DS 2 gebleven, maar toename van het aantal en/of de lengte en/of de breedte van de scheuren
- DS 2→DS 3 = schadeniveau toegenomen tot DS 3

Gebouwen ingedeeld in DS 3

- DS 3→DS 3 = in DS 3 gebleven
- DS 3→DS 3' = in DS 3 gebleven, maar toename van het aantal en/of de lengte en/of de breedte van de scheuren

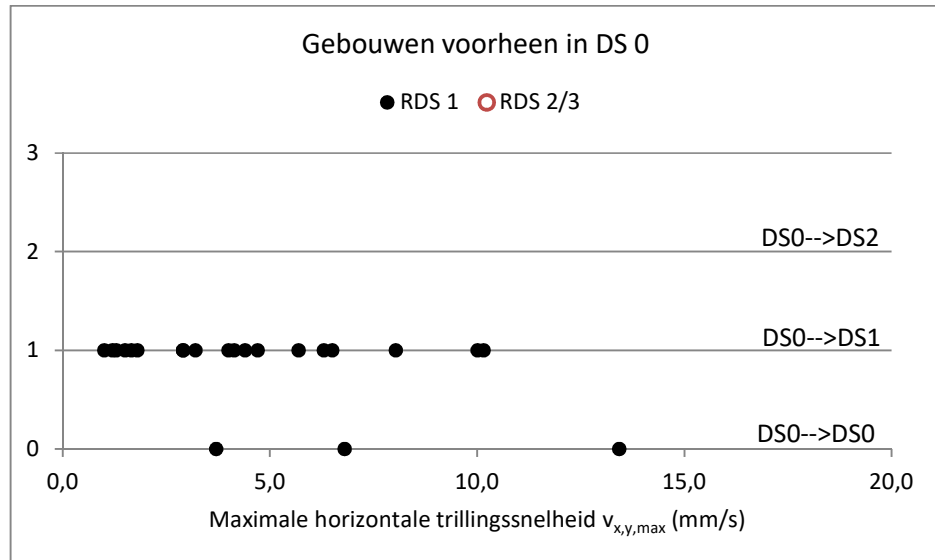
De resultaten van de indeling van de schadeklassen voor en na de aardbevingen zijn weergegeven in tabel 7.2.

Tabel 7.2: Verandering in schadeklasse (DS)

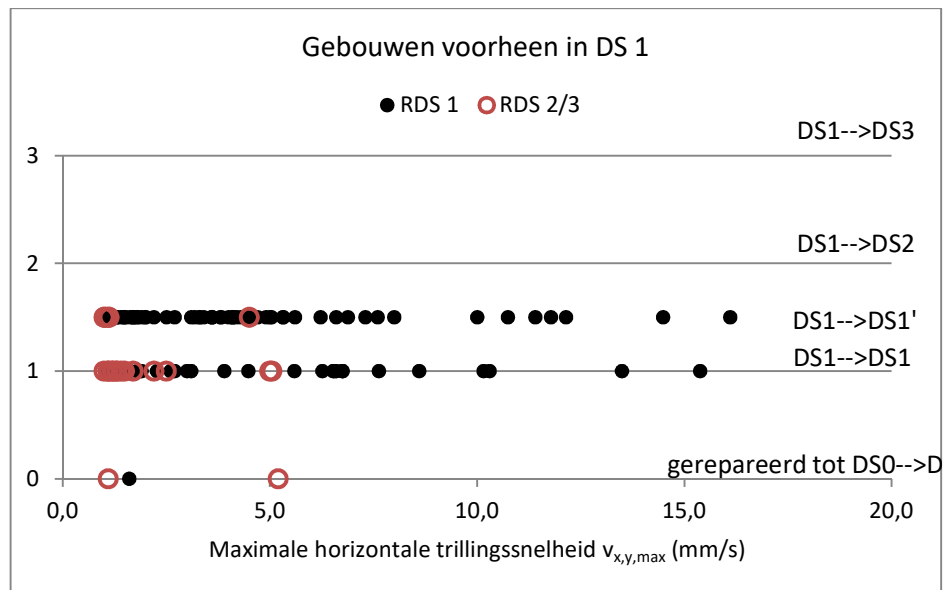
Voor	Na	Totaal
DS 0	DS 0	3
	DS 1	19
	DS 2	0
DS 1	DS 0	3
	DS 1	44
	DS 1'	70
	DS 2	0
	DS 3	0
DS 2	DS 1	3
	DS 2	2
	DS 2'	22
	DS 3	0
DS 3	DS 3	0
	DS 3'	1
Totaal		167

De resultaten van de wijzigingen in schadeklasse zijn weergegeven in figuren 7.1 - 7.3 voor de schadeklasse DS 0, DS 1 en DS 2. Categorie DS 3 bestaat uit één woning, dus daar is geen grafiek voor gemaakt.

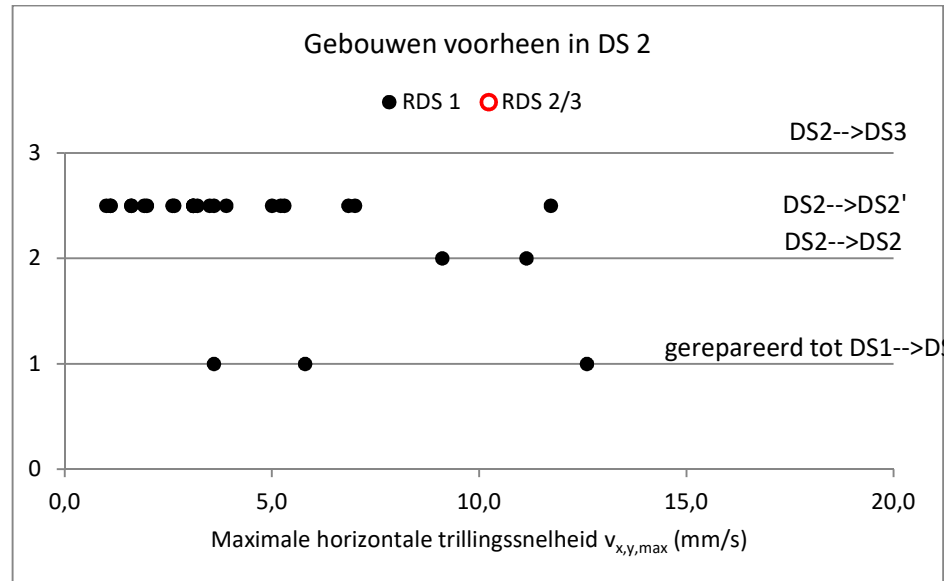
De horizontale as in de figuren 7.1 - 7.3 geeft de maximaal geregistreerde trillings-snelheid in horizontale richting in de periode tussen twee opnames. De verticale as geeft de schadeklasse weer na de herhalingsopname. Weer zijn er twee subsets gemaakt: één met resultaten van alleen de eerste herhalingsopname (RDS 1) en één met resultaten van de tweede en derde herhalingsopname samen (RDS 2/3).



Figuur 7.1: Schadeklasse voor woningen ingedeeld in DS 0 bij de laatste opname (RDS1 is de eerste herhalingsopname; RDS2/3 de tweede en derde).



Figuur 7.2: Schadeklasse voor woningen ingedeeld in DS 1 bij de laatste opname (RDS1 is de eerste herhalingsopname; RDS2/3 de tweede en derde).



Figuur 7.3: Schadeklasse voor woningen ingedeeld in DS 2 bij de laatste opname (RDS1 is de eerste herhalingsopname; RDS2/3 de tweede en derde).

7.3 Conclusies

Uit de resultaten die in de voorgaande paragraaf zijn beschreven kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De grafieken geven geen duidelijke relatie weer tussen het niveau van de trillingssnelheid en de toename van de schade.
- Alle tweede en derde herhalingsopnames hebben betrekking op woningen die eerder waren ingedeeld als DS 1. Tot nu toe zijn er geen tweede en derde herhalingsopnames geweest voor woningen in de andere categorieën.
- Voor de meeste woningen die waren ingedeeld in schadeklasse DS 0, dat wil zeggen waar geen scheuren geregistreerd waren, zijn één of meer nieuwe scheuren geregistreerd. Als gevolg daarvan vallen deze huizen in een hogere schadeklasse (DS 1). Alle opnames van woningen die initieel in DS 0 vielen, betreffen eerste herhalingsopnames. Zoals al vermeld in hoofdstuk 6, bleek een deel van de nieuw geregistreerde scheuren al aanwezig ten tijde van de initiële opname. Hierdoor kon niet worden vastgesteld of deze gebouwen oorspronkelijk al in DS 1 vielen of niet.
- Voor alle woningen in schadeklassen DS 1 en DS 2 geldt dat de aardbevingen niet geleid hebben tot een toename van de schadeklasse. Dat betekent dat eventueel niet geregistreerde scheuren bij de initiële of eerdere opnames geen invloed hebben op de eerdere indeling van de woningen in een schadeklasse.
- Bij 21 woningen zijn scheuren gerepareerd in de periode tussen twee opnames. Bij 3 woningen (allen in DS 1) waren deze reparaties dusdanig, dat er bij de herhalingsopname geen (openstaande) scheuren waargenomen konden worden. Als gevolg daarvan is de schadeklasse van deze drie woningen 'verbeterd' tot DS 0. Voor de andere woningen waren de reparaties niet omvangrijk genoeg om de schadeklasse van het gebouw te verlagen.

8 Conclusies

TNO heeft de signalen en de effecten van vijf aardbevingen tussen 30 september 2014 en 30 september 2015 (allemaal $M > 2,5$) op de gebouwen in het monitoringsnetwerk geanalyseerd. De analyse heeft geleid tot de volgende conclusies.

Gebouwtrillingen

1. Voor vijf aardbevingen zijn in totaal 235 'event files' geanalyseerd, waarvan 224 afkomstig van sensoren die waren geïnstalleerd in woningen en 11 van sensoren geïnstalleerd in 'overige gebouwen'. Een 'event file' wordt gegenereerd als de maximale trillingssnelheid van het gebouw op funderingsniveau hoger is dan de vooraf bepaalde trigger van 1 mm/s.
2. Met betrekking tot de maximale horizontale piekversnelling op funderingsniveau ($a_{x,y,max}$) is 90% van de metingen minder dan 0,3 mm/s². De maximaal gemeten horizontale piekversnelling was 0,7 m/s².
3. Met betrekking tot de maximale verticale piekversnelling op funderingsniveau ($a_{x,y,max}$) is 94% van de metingen minder dan 0,3 mm/s². De maximaal gemeten verticale piekversnelling was 1,2 m/s².
4. Met betrekking tot de maximale horizontale pieksnelheid op funderingsniveau ($v_{x,y,max}$) is 75% van de metingen minder dan 4 mm/s. De maximaal gemeten horizontale pieksnelheid was 16,1 mm/s.
5. Met betrekking tot de maximale verticale pieksnelheid op funderingsniveau ($v_{z,max}$) is 96% van de metingen minder dan 4 mm/s. De maximaal gemeten verticale pieksnelheid was 8,6 mm/s.
6. De dominante frequenties voor de versnelling zijn gemiddeld 8 Hz met een 95% bovengrens van 12 Hz voor de x- en y-kanalen. Voor het z-kanaal is de gemiddelde dominante frequentie 13 Hz en de 95% bovengrens is 25 Hz.
7. De analyse van de overdracht van de versnellingen van de bodem (KNMI-stations) naar de fundering van de getriggerde gebouwen (TNO-sensoren) heeft uitgewezen dat de afstand tussen de KNMI-stations en de dichtstbijzijnde TNO-sensoren nogal groot is, waardoor het niet mogelijk was betrouwbare overdrachtsfuncties voor de individuele gebouwen te berekenen.

Herhalingsopname schade

8. Voor de vijf aardbevingen zijn in totaal 167 herhalingsopnames uitgevoerd, waarvan 145 eerste herhalingsopnames, 21 tweede herhalingsopnames en 1 derde herhalingsopnames.
9. Het aantal scheuren dat wijder en/of langer is geworden, is ongeveer 1% van het totale aantal initieel geregistreerde scheuren.

10. Een aanzienlijk deel van de nieuw geregistreerde scheuren bij de herhalingsopnames was al aanwezig maar niet geregistreerd bij de initiële opname.
11. Bij 21 woningen zijn scheuren gerepareerd in de periode tussen twee opnames. Ongeveer 2% van de gerepareerde scheuren was na een aardbeving opnieuw gescheurd.
12. Voor de meeste woningen die waren ingedeeld in schadeklasse DS 0, dat wil zeggen waar geen scheuren geregistreerd waren, zijn één of meer nieuwe scheuren geregistreerd. Als gevolg daarvan vallen deze woningen in een hogere schadeklasse (DS 1). Een deel van de nieuw geregistreerde scheuren was al aanwezig ten tijde van de initiële opname. Hierdoor kon niet worden vastgesteld of deze gebouwen oorspronkelijk al in DS 1 vielen of niet.
13. Voor alle woningen die zijn ingedeeld in de schadeklasse DS 1 en DS 2 geldt dat de aardbevingen niet geleid hebben tot een hogere schadeklasse.

9 Referenties

- [01] TNO-rapport 2015 R10501 "Monitoring Network Building Vibrations"
- [02] SBR-richtlijn A: "Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen. Schade aan gebouwen, 2002"
- [03] SBR-richtlijn B: "Meet- en beoordelingsrichtlijn. Hinder voor personen in gebouwen, 2002"

10 Ondertekening

Naam en adres opdrachtgever:

Nederlandse Aardolie Maatschappij
Postbus 28000
9400 HH Assen

Handtekening:



Ir. H. Borsje



Ir. J.P. Pruiksma



Ir. S.A.J. de Richemont

Handtekening Research manager Structural Reliability a.i.:



Dr. ir. A.H.J.M. Vervuurt

11 Verklarende woordenlijst

Epicentrum en hypocentrum

De bron van een aardbeving is diep onder de grond. In het geval van het Groninger gasveld circa 3 km diep. Deze plaats in de grond wordt aangeduid als het hypocentrum.

Dezelfde plaats, maar dan loodrecht daarboven aan het aardoppervlak, wordt het epicentrum genoemd. Het epicentrum wordt regelmatig gekoppeld aan een plaatsnaam. De locatie van een beving wordt berekend met behulp van een aantal sensoren die in de ondergrond geplaatst zijn en verspreid liggen over het Groninger gasveld.

Magnitude

Een maat om de sterkte van de aardbeving aan te duiden. De mate waarin je dit voelt hangt af van verschillende factoren, waarbij de afstand tot het epicentrum de grootste invloed heeft.

Trillingen: richtingen (x, y, z)

Bij een beving ontstaan bij de bron allerlei soorten trillingen, die alle kanten op kunnen gaan. Sommige trillingen zijn te visualiseren als ware het golven. Denk bijvoorbeeld aan een steen die in het water wordt gegooid, waardoor golven ontstaan. Hoe groter de steen (grote magnitude) hoe hoger de golven (grote trillingen). De trillingen planten zich voort en worden steeds minder sterk (golven drijven weg van de plaats van de steen en worden steeds vlakker naarmate ze verder weg zijn).

De geïnstalleerde sensoren in de gebouwen meten de eigenschappen van de trillingen als ze bij het gebouw "aankomen" en geven de waarden hiervan door in 3 richtingen, op de grafieken te zien als x, y en z. De x- en y-richting zijn de horizontale componenten, in lengte- en breedterichting van het gebouw, en de z-richting de verticale component.

Trillingen: snelheid (v) en versnelling (a)

De snelheid wordt uitgedrukt met de letter "v" van het Engelse "velocity" en geeft aan hoeveel afstand een trilling aflegt in een bepaalde tijd. Vergelijk dit met de zee en de snelheid waarmee een bepaalde golf naar het strand komt. De snelheid wordt niet uitgedrukt in aantal kilometer per uur (km/u), zoals bij auto's, maar in aantal millimeter per seconde (mm/s).

De versnelling wordt uitgedrukt met de letter "a" van het Engelse "acceleration" en geeft aan of de snelheid van de trilling in de tijd verandert. Vergelijk dit met autorijden en het optrekken of afremmen. Auto's die van 0 naar 100 km/u in 3 seconden kunnen optrekken hebben een hoger acceleratievermogen dan auto's die hier 5 seconden over doen. Een plotse toename van de snelheid (hoge versnelling) betekent ook dat je meer in je stoel wordt gedrukt dan als je de snelheid langzaam opbouwt (lage versnelling).

De sensoren meten de versnelling van de trillingen in aantal meter per seconde kwadraat (m/s^2). Via een berekening wordt dan ook de snelheid van de trilling op dat moment en op die locatie bepaald. De grootst gemeten versnelling (a_{max}) en de grootst gemeten snelheid (v_{max}) worden vervolgens gebruikt in verdere analyses.

Trillingen: Frequentie (f)

Frequentie (f) is de maat voor hoe vaak iets gebeurt in de tijd. Voor trillingen is dit hoe vaak een maximum of minimum wordt bereikt in een seconde, uitgedrukt in Herz (Hz). De trillingen hebben niet één frequentie. Voor verdere analyses wordt daarom gebruik gemaakt van de frequentie die het meest is voor gekomen. Dit wordt de dominante frequentie (f_{dom}) genoemd.

Gebouwtrillingen en schade

Voor gebouwen geldt dat verschillende bronnen een gebouw in trilling kunnen brengen. Voorbeelden hiervan zijn aardbevingen, wind, verkeer en bouw- en sloopwerkzaamheden. Het effect van deze trillingen op het gebouw is niet alleen van de sterkte van de trilling afhankelijk, maar ook van eigenschappen van het gebouw zelf waaronder de hoogte, de opbouw (stijve of slappe constructie), de massa, enz.

Voor het onderzoek naar de trillingen en de overdracht van bodemtrilling naar gebouwtrilling geldt dat de sensoren bij voorkeur zo dicht mogelijk bij de fundering geplaatst zijn. Op die manier wordt zo min mogelijk invloed van het gebouw zelf meegenomen in de analyse en zouden in het ideale geval twee sensoren in dezelfde straat ongeveer hetzelfde moeten meten.

Voor het onderzoek naar de relatie tussen gebouwtrillingen en schade geldt dat de twee woningen in dezelfde straat wel degelijk verschillend kunnen reageren op de bodemtrilling waardoor de een veel schade en de ander geen schade ondervindt. Om dit te ondervangen zijn van de woningen enkele kenmerken verzameld, zoals type woning (bijvoorbeeld vrijstaand), type fundering en bouwjaar om zo de woningen in gebouwtypologieën in te kunnen delen.

Bijlagen

- A Gebouwtypen
- B Kaderanalyse gebouwtrillingen
- C Trillingssignalen - versnelling
- D Trillingssignalen - snelheid

A Gebouwtypen

Tabel A.1: Overzicht aantal geïnstalleerde sensoren per gebouwtipe (november 2015)

Gebouwtipe		Aantal	Fundering	Begane grond	Aantal
1	Rijtjeshuis - hoekhuis	15	--	--	--
		--	Palen	Beton	2
		--	Palen	Overig	3
		--	Geen palen	--	5
		--	Onbekend	--	5
2	Rijtjeshuis - tussenwoning	18	--	--	--
		--	Palen	Beton	5
		--	Geen palen	--	5
		--	Onbekend	--	8
3	Twee-onder-een-kap	40	--	--	--
		--	Palen	Beton	28
		--	Geen palen	--	10
		--	Onbekend	--	2
4/5/6	Vrijstaand <1940	98	--	--	--
4		--	Geen palen	Combinatie hout/beton	47
5		--	Geen palen	Hout	16
6		--	Geen palen	Beton	19
4/5/6		--	Onbekend	--	16
7	Vrijstaand 1941-1975	31	--	--	--
		--	Geen palen	--	22
		--	Palen	--	2
		--	Onbekend	--	7
8/9	Vrijstaand >1975	70	--	--	--
8		--	Palen	Beton	36
9		--	Geen palen	Beton	25
8/9		--	Geen palen	--	5
		--	Onbekend	--	4
Subtotaal	woningen	272			
0	Overige (geen woningen)	27			
Totaal	Alle gebouwen	299			

B Raamwerk analyse gebouwtrillingen

Algemeen

De gebouwsensoren meten versnellingen van de gebouwtrillingen op funderingsniveau. Op basis van deze gemeten versnellingen berekenen de sensoren rechtstreeks de trillingssnelheid en deze wordt gebruikt om te bepalen of de vooraf vastgestelde trigger, een trillingssnelheid van 1 mm/s, is overschreden. Als de vooraf vastgestelde trigger is overschreden, verzendt de sensor de oorspronkelijk gemeten trillingsversnellingen naar het Vibration Data Center (VDC). Deze oorspronkelijk gemeten versnellingen worden gebruikt voor de analyse van de gebouwtrillingen.

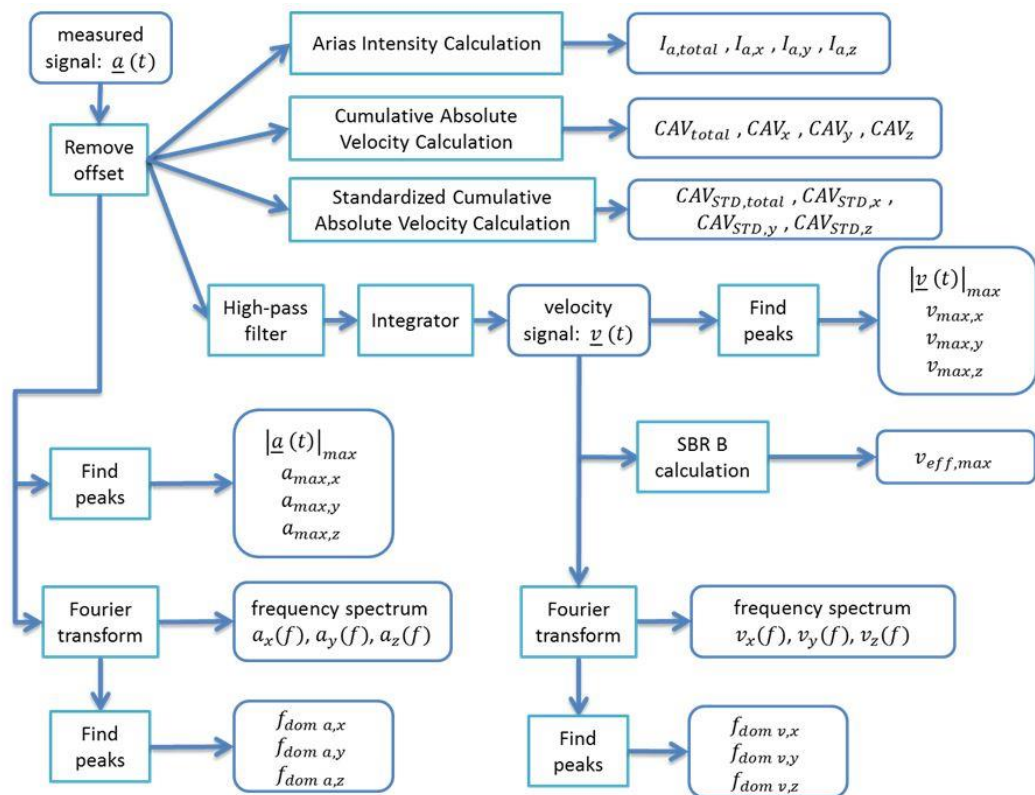
Trillingskenmerken

Voor elk gebouw is het door de gebouwsensor gemeten versnellings signaal als volgt geanalyseerd (figuur B.1):

- Er worden twee tijddomeinsignalen berekend:
 - Het onbewerkte gemeten versnellings signaal $a(t)$ wordt gebruikt na eliminatie van de offset.
 - Na filtering wordt het signaal geïntegreerd in een snelheidssignaal $v(t)$.
- Het frequentiespectrum wordt berekend voor de versnellings- en snelheidssignalen.
- Individuele signaalkenmerken worden berekend voor elk van de drie signaalrichtingen per sensor (twee in horizontale richting (x en y) en één in verticale richting (z)):
 - Versnelling $[a]$; deze waarde wordt gebruikt in internationale aardbevingsrichtlijnen en is van belang voor constructieve berekeningen. De berekende waarden zijn: $a_{x, \max}$, $a_{y, \max}$, $a_{z, \max}$ en $a_{x,y, \max}$ (= piekversnelling in horizontale richting).
 - Snelheid $[v]$; deze waarde wordt gebruikt in de Nederlandse richtlijnen (SBR ref [02]) voor relaties tussen gebouwtrillingen en de waarschijnlijkheid van schade. De berekende waarden zijn: $v_{x, \max}$, $v_{y, \max}$, $v_{z, \max}$ en $v_{x,y, \max}$ (= pieksnelheid in horizontale richting).
 - Effectieve snelheid $[v_{\text{eff,max}}]$; deze waarde wordt vooral gebruikt om een verband uit te drukken tussen de trilling en de hinder voor mensen (ref [03]).
 - Dominante frequentie van versnelling $[f_{a, \text{dom}}]$ en snelheid $[f_{v, \text{dom}}]$; deze waarden zijn van belang voor de overdracht van de bodemtrillingen op de gebouwtrillingen.
 - Het vectoriële maximum van de versnelling ($|a(t)|_{\max}$) en de snelheid ($|v(t)|_{\max}$) worden berekend ($|a(t)| = \sqrt{(a_x(t))^2 + (a_y(t))^2 + (a_z(t))^2}$). Dit zijn absolute waarden van de versnelling en de snelheid, onafhankelijk van de richting van de sensor.
- De Arias-intensiteit. Voor het x-kanaal volgt dit uit $I_{A,x} = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a_x(t)^2 dt$ waarbij T de lengte van het tijdssignaal is. De y- en z-kanalen worden op dezelfde manier berekend.
- De totale Arias-intensiteit. Deze volgt uit $I_{A, \text{totaal}} = I_{A,x} + I_{A,y} + I_{A,z}$.

- De cumulatieve absolute snelheid (CAV). Voor het x-kanaal volgt deze uit: $CAV_x = \int_0^T |a_x(t)| dt$ en voor de y- en z-kanalen werkt het hetzelfde.
- De totale cumulatieve absolute snelheid. Deze volgt uit $CAV_{total} = CAV_x + CAV_y + CAV_z$.
- De gestandaardiseerde cumulatieve absolute snelheid CAV_{STD} . Deze wordt op dezelfde manier berekend als de CAV, maar hier wordt het signaal verdeeld in secties van 1 seconde en wordt een sectie alleen meegeteld als er in die sectie een moment is waarop de absolute versnelling boven een bepaalde drempel uitkomt. Die drempel is op dit moment vastgesteld op 0,001g. Dit zorgt ervoor dat de CAV_{STD} na de gebeurtenis niet meer kan oplopen, wat bij de CAV wel kan gebeuren.

De berekening van de Arias-intensiteit, CAV en CAV_{STD} wordt toegepast op het ruwe versnellings signaal na eliminatie van de offset. Er is geen filtering toegepast. Tests wijzen uit dat de resultaten minder dan 1% verschillen voor de huidige gebeurtenissen. Grotere gebeurtenissen hebben waarschijnlijk een lagere frequentie-inhoud die mogelijk deels wordt beïnvloed door het filter, vandaar dat ervoor is gekozen de berekeningen uit te voeren op het ongefilterde signaal.



Figuur B.1: Stroomdiagram voor analyse van signaalkenmerken.

Overdrachtsfuncties

Er zijn drie hoofdbronnen van informatie in de keten van het epicentrum van de aardbeving tot de blootgestelde gebouwen, namelijk:

- (i) de magnitude en locatie van de aardbeving
- (ii) de signaalkenmerken in het vrije veld bij de KNMI-meetpunten
- (iii) de signaalkenmerken op funderingsniveau in de gebouwen.

De eerste twee bronnen zijn de verantwoordelijkheid van het KNMI. Het KNMI heeft vrije-veldsensoren geïnstalleerd in een raster van 6 km binnen het gebied van het monitoringsnetwerk, om de kenmerken in het vrije veld te meten. Het verband tussen de trillingssignaalkenmerken op de vrije-veldpunten van het KNMI (ii) en die die worden gemeten in het gebouwfunderingen (iii) zal worden berekend als onderdeel van het monitoringsnetwerk voor gebouwtrillingen. Voor elk gebouw worden de vrije-veldgegevens van het KNMI op het KNMI-meetpunt dat het dichtst bij het gebouw is en de gemeten funderingssignalen gebruikt om de overdrachtsfunctie van de bodemtrillingen op de gebouwtrillingen op funderingsniveau te berekenen.

Voor elk getriggerd gebouw is de dichtstbijzijnde vrije-veldsensor van het KNMI geselecteerd. Het signaal van deze vrije-veldsensor is geanalyseerd op dezelfde manier als het signaal van de gebouwsensoren.

Aangezien de horizontale trillingscomponenten van de vrije-veldsensoren zijn gegeven in de richting van het epicentrum en loodrecht op die richting, kunnen deze waarden niet rechtstreeks worden vergeleken met de horizontale componenten van de gebouwsensoren. De horizontale componenten van de vrije-veldsensoren moeten worden geroteerd naar de x- en y-richting van de individuele gebouwen.

De overdracht van bodemtrillingen op gebouwtrillingen wordt bepaald voor elk van de individuele signaalkenmerken als een overdrachtsfactor: de verhouding tussen de vergelijkbare afzonderlijke cijfers. Dit wordt gedaan voor alle drie de meetrichtingen.

De overdrachtsfactor voor de pieksnelheid kan bijvoorbeeld als volgt worden bepaald:

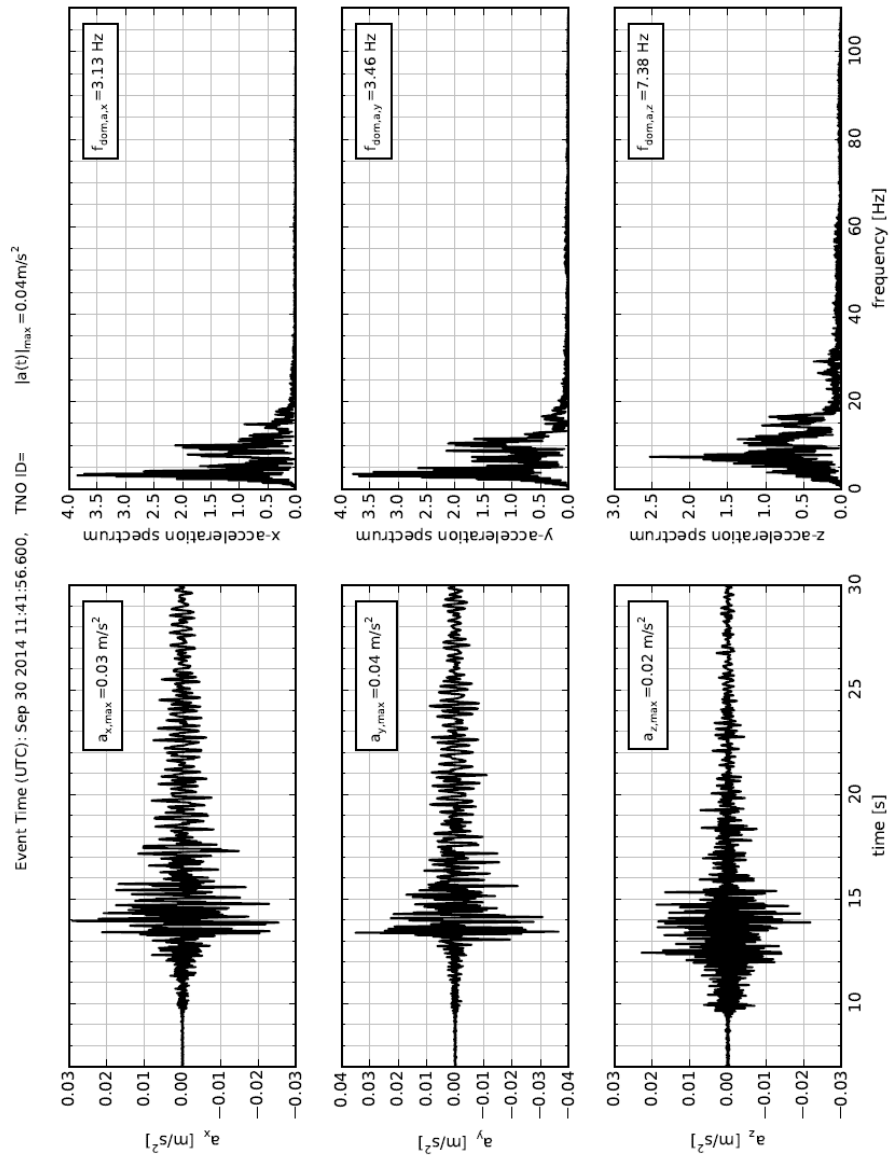
- Piekbodemsnelheid in drie richtingen ($i=1,2,3$): $v_{max,bodem,i}$
- Piekfunderingssnelheid in drie richtingen ($i=1,2,3$): $v_{max,fundering,i}$
- Overdrachtsfactor in drie richtingen ($i=1,2,3$): T_i

$$T_{v_{max,i}} = \frac{v_{max,fundering,i}}{v_{max,bodem,i}}$$

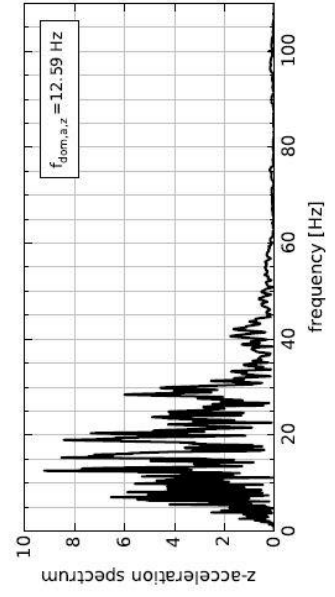
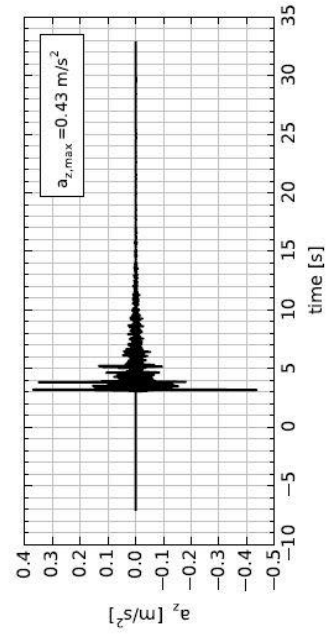
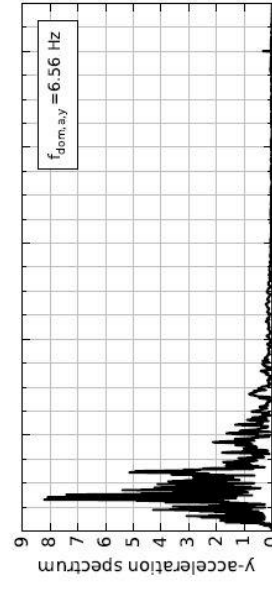
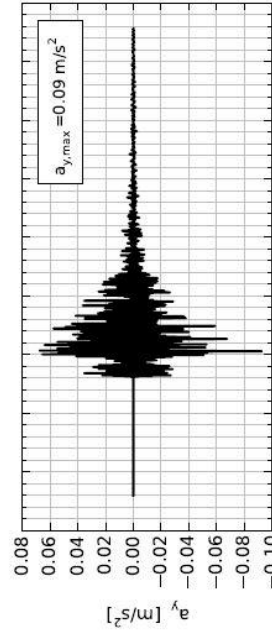
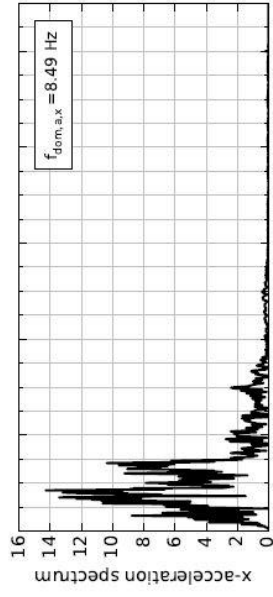
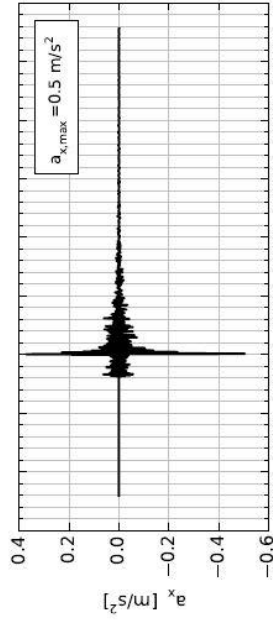
C Trillingssignalen - versnelling

Deze bijlage geeft een voorbeeld van de gemeten versnellingssignalen. Voor drie verschillende gebouwen, met verschillende niveaus van versnelling, tijdens verschillende aardbevingen, zijn de volgende grafieken gegeven:

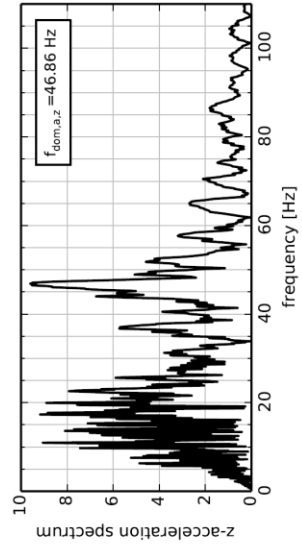
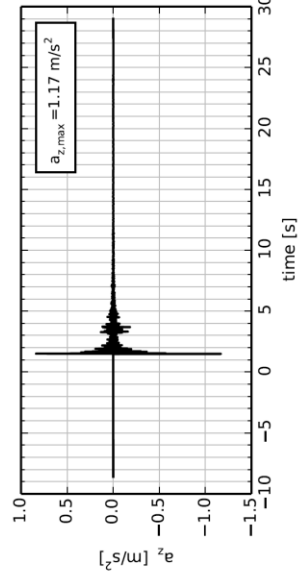
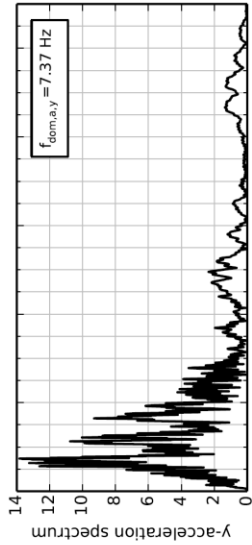
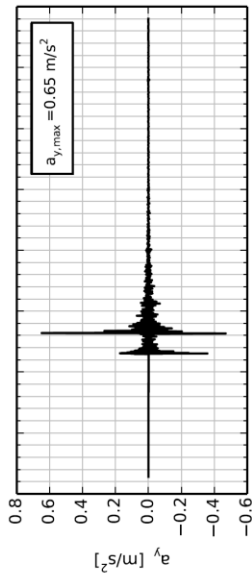
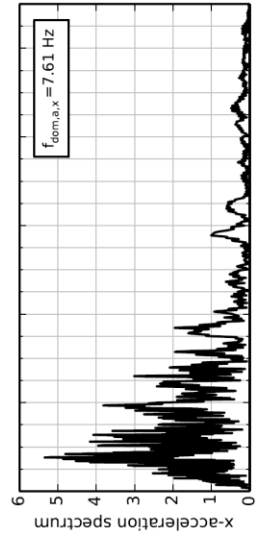
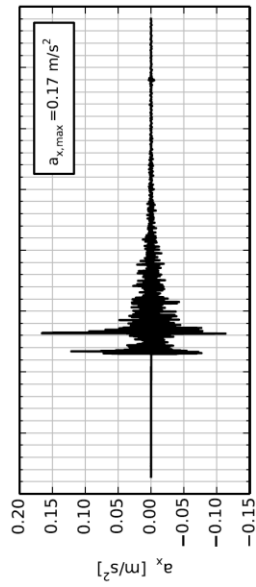
- Gemeten versnelling (a_x , a_y , a_z)
- Verdeling van de frequentie ($f_{\text{dom},a,x}$, $f_{\text{dom},a,y}$, $f_{\text{dom},a,z}$)



Event Time (UTC): Nov 05 2014 01:12:32.599, TNO ID=, $|a(t)|_{\max} = 0.5 \text{ m/s}^2$



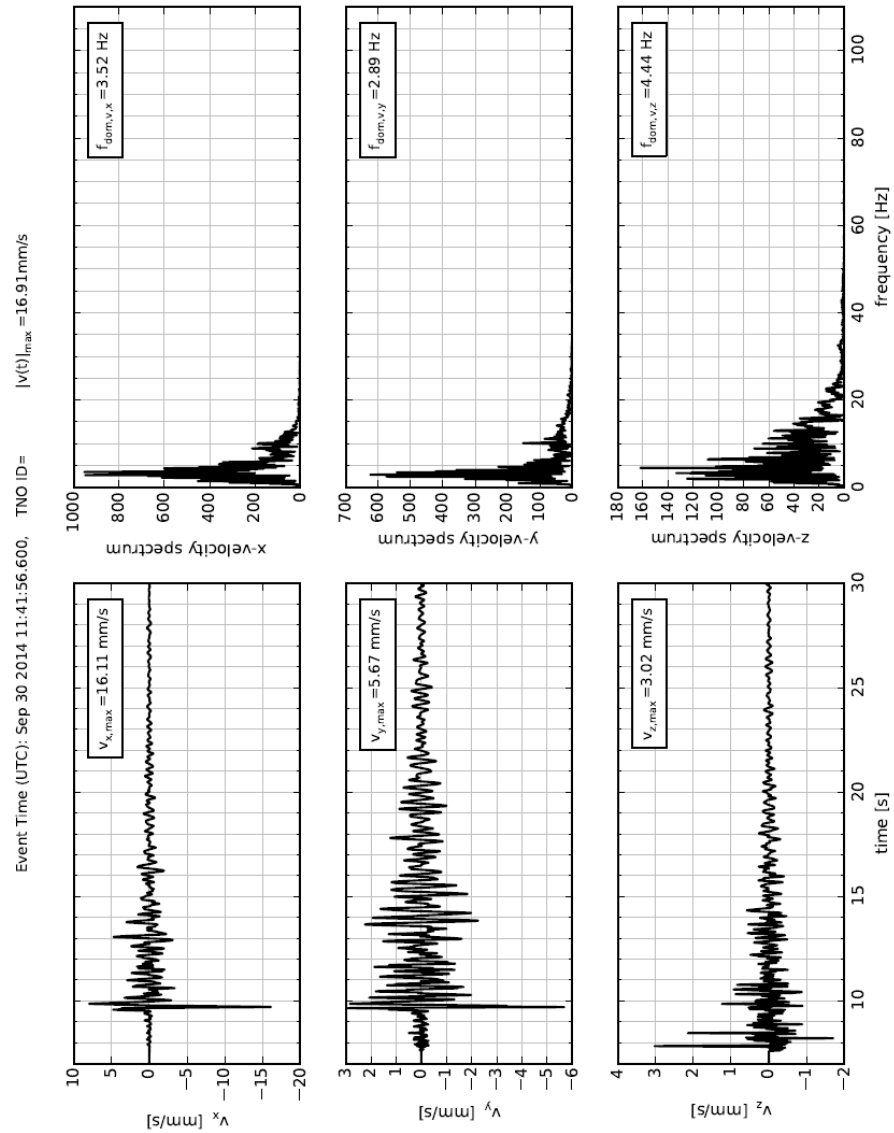
Event Time (UTC): Sep 30 2015 18:05:36.799, TNO ID=: $|a(t)|_{\max} = 1.17 \text{ m/s}^2$



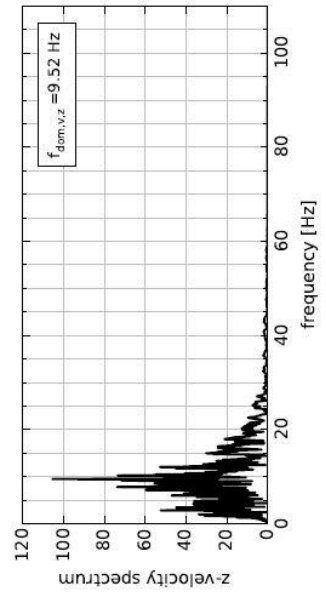
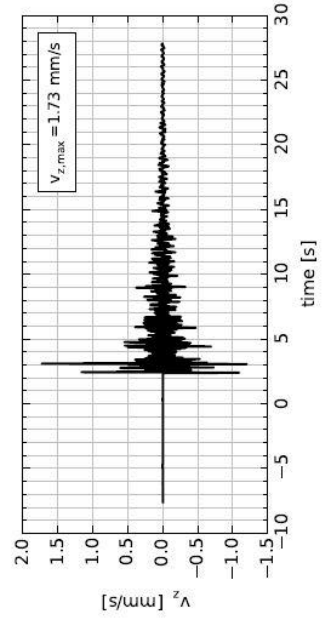
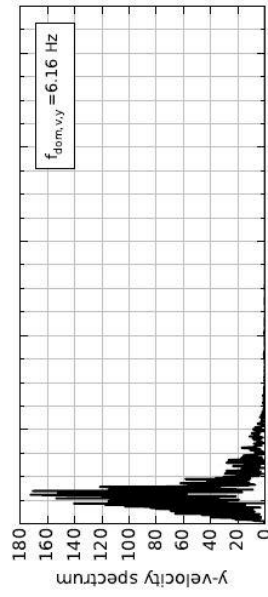
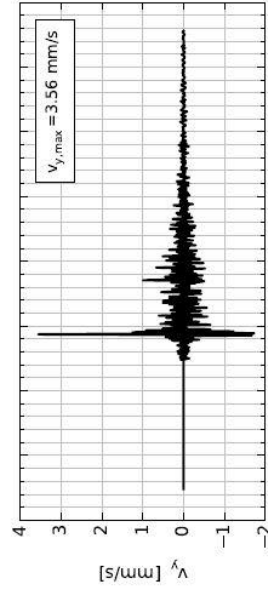
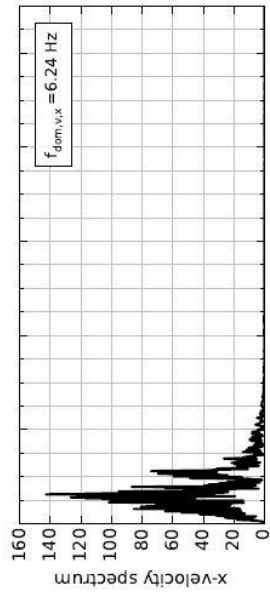
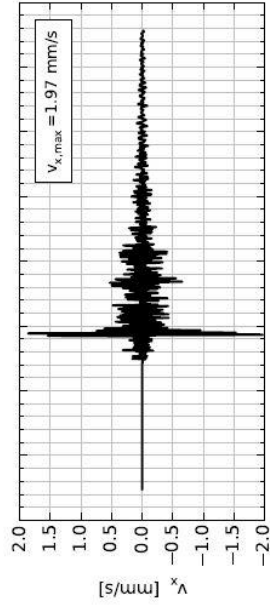
D Trillingssignalen - snelheid

Deze bijlage geeft een voorbeeld van de gemeten snelheidssignalen. Voor drie verschillende gebouwen, met verschillende niveaus van versnelling, tijdens verschillende aardbevingen, zijn de volgende grafieken gegeven:

- Gemeten snelheid (v_x , v_y , v_z)
- Verdeling van de frequentie ($f_{\text{dom},v,x}$, $f_{\text{dom},v,y}$, $f_{\text{dom},v,z}$)



Event Time (UTC): Dec 30 2014 02:37:35.399, TNO ID= |v(t)|_{max} = 3.89 mm/s



Event Time (UTC): Jan 06 2015 06:55:32.399, TNO ID=: |v(t)|_{max} = 1.4 mm/s

