



NAM

Speciaal Rapport over de aardbeving bij Zeerijp op 14 november 2025

Datum 26 november 2025

Auteur



Contents

1	Samenvatting.....	4
2	Introductie.....	5
3	Reservoirdruk in het noorden van het Groningen-gasveld.....	6
4	Seismiciteit in de periode voor de Zeerijp aardbeving.....	7
4.1	Trendparameters	7
4.2	Vergelijking aantal aardbevingen per jaar met voorspelling	8
4.3	Magnitude van de aardbevingen	8
5	Geofysische en geologische analyse van de aardbeving.....	10
5.1	Bepaling van het hypocentrum.....	10
5.2	Locatie van het hypocentrum ten opzichte van breuken	10
5.3	Het reservoir rond het hypocentrum.....	14
5.4	Het bronmechanisme	14
5.5	De gesteentelagen boven het hypocentrum	14
6	Analyse van de metingen door het seismisch monitoringsnetwerk	16
6.1	De registraties van de Zeerijp aardbeving	16
6.2	Amplitudes van PGA en PGV	16
6.3	Vergelijking met eerdere aardbevingen en de GMPE.....	19
6.4	Duur van de aardbeving.....	21
6.5	Site-effects voor station G140	23
7	Belangrijkste conclusies	24
8	Verdere onderzoeken.....	25
	Referenties	26
	Appendix A – Vaststellen van het epicentrum van de aardbeving door NORSAR (Volker Oye en Nadege Langet).....	27
	Appendix B – Vaststellen van het bronmechanisme van de aardbeving door NORSAR (Volker Oye en Nadege Langet)	31
	Appendix C – Analyse van de metingen door het seismisch monitoringsnetwerk door Michail Ntinalexis en Julian Bommer.....	34

1 Samenvatting

Om 16 minuten over één uur in de ochtend van 14 november 2025 vond een aardbeving met een magnitude 3,4 plaats nabij het dorp Zeerijp. NAM heeft SodM hiervan op de hoogte gesteld en binnen 48 uur een brief met een eerste wetenschappelijke duiding gedeeld met de minister van KGG en de Inspecteur-generaal der mijnen van SodM. Binnen 2 weken na de aardbeving moet NAM een Speciale Rapportage met de minister en SodM delen. Dit is deze rapportage.

De seismiciteit na sluiting van het Groningen-gasveld wordt voornamelijk gedreven door de voortdurende drukvereffening in het reservoir tussen het noorden van het veld, waar de reservoirdruk nog hoger is, en het zuiden van het veld waar de reservoirdruk lager is. Ook kunnen, ondanks dat de kans erop voortdurend daalt, nog steeds aardbevingen met een magnitude groter dan 3,0 optreden.

Door KNMI is het epicentrum van de aardbeving bepaald. In opdracht van NAM heeft NORSAR dit onafhankelijk geverifieerd en bevestigd. NORSAR heeft daarnaast ook de diepte van de aardbevingsbron bepaald op 3 km. Het hypocentrum van de aardbeving ligt op een bestaande breuk in het reservoir. Nabij deze breuk heeft ook op 8 januari 2018 een aardbeving met een magnitude 3,4 plaatsgevonden.

Ondanks een hoge piek grondversnelling gemeten bij een seismisch monitoringsstation gelegen op zeer korte afstand van het epicentrum, tonen de metingen van de groundbewegingen door deze recente Zeerijp aardbeving grote overeenkomsten met die gemeten tijdens eerdere aardbevingen met eenzelfde magnitude. Ook passen ze goed bij de voorspelling door het empirisch groundbewegingsmodel (GMPE) voor Groningen.

Binnen twee weken kunnen maar beperkte studies worden uitgevoerd en afgerond. De resultaten in deze rapportage zijn daarom voorlopig en zullen worden aangevuld met verdere studies.

2 Introductie

In de nacht van donderdag 13 november op vrijdag 14 november 2025 werd Groningen opgeschud door een aardbeving bij Zeerijp. De aardbeving vond plaats om 16 minuten over één uur in de ochtend en had een kracht van 3,4 op de schaal van Richter. Deze aardbeving werd gevolgd door een twee naschokken. De eerste naschok was om 39 minuten na 6 uur in de ochtend op dezelfde dag met een magnitude van 2,1 en de tweede om 13 minuten over twee in de middag van 19 november met een magnitude van 1,0.

Door de aardbeving werden de signaalparameter-magnitude en signaalparameter-grondversnelling, zoals vastgelegd in de 'Wijziging van de Mijnbouwregeling in verband met de beëindiging van de gaswinning uit het Groningenveld' (Staatscourant, 2025) overschreden. Om halfacht in de ochtend van 14 november 2025 vond het eerste telefonische overleg plaats tussen NAM en de toezichthouder. In overeenstemming met artikelen 1.3a.3 en 1.3a.4 lid 1a van deze Mijnbouwregeling heeft NAM de toezichthouder, SodM, op de hoogte gesteld van de overschrijding van deze twee signaalparameters door deze aardbeving.

Een analyse van de door het seismisch monitoringsnetwerk gemeten grondbewegingen rond het epicentrum van de aardbeving en een geofysische analyse zijn onmiddellijk na dit overleg gestart. De eerste resultaten van deze analyses zijn met de Inspecteur-generaal der mijnen van SodM en de minister van Klimaat en Groene Groei gedeeld in een 48-uurs brief, die in overeenstemming met de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.2 en artikel 1.3a.4., op zaterdag 15 november om 1 uur in de middag is verstuurd (NAM (van Haaster), 2025b en NAM (van Haaster), 2025c).

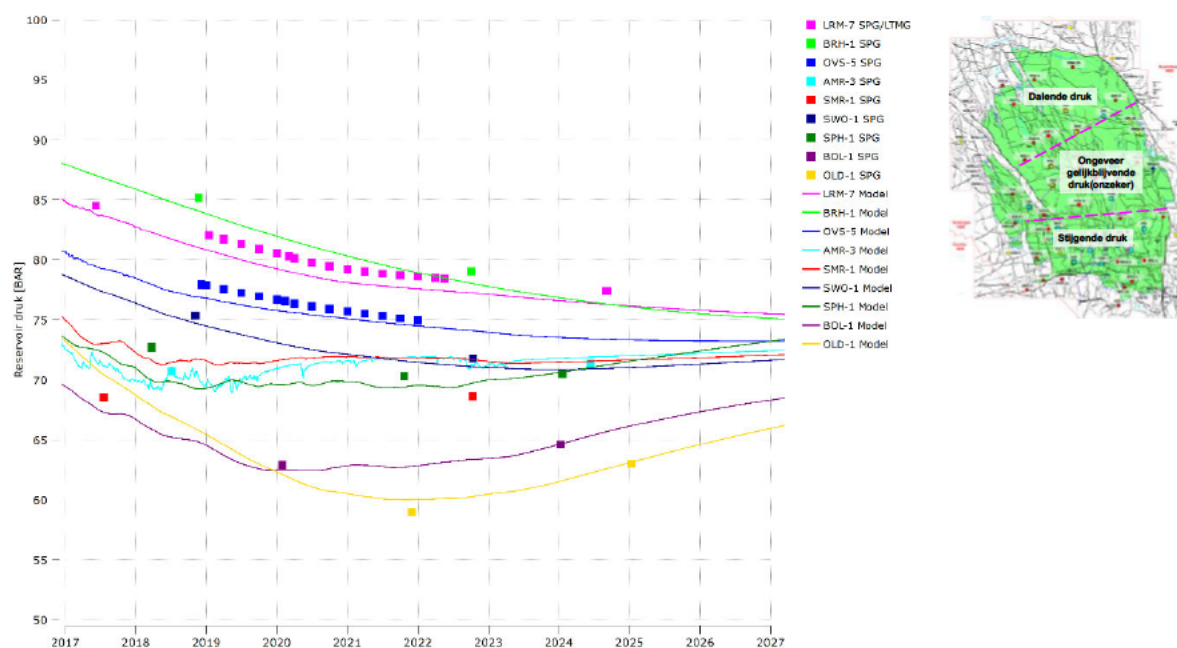
De Mijnbouwregeling schrijft daarnaast in artikel 1.3a.3 lid 3 en artikel 1.3a.4 lid 2 ook voor dat NAM binnen twee weken een Speciale Rapportage deelt met de minister en de inspecteur-generaal der mijnen. Dit document is deze Speciale Rapportage.

In het hoofdstuk 3 bespreken we waarom twee jaar na stopzetting van de gaswinning uit het Groningen-gasveld er nog steeds aardbevingen optreden in Groningen. Daarna gaan we, om context te geven, verder in op de seismiciteit in de periode vóór de recente Zeerijp aardbeving. Hoofdstuk 5 bevat een analyse van de aardbeving met nadruk op de ondergrond. We bespreken de locatie van de bron van de aardbeving, de breuk waar de aardbeving op plaatsvond en hoe deze heeft bewogen. De metingen van de grondbeweging gemeten door het seismisch monitoringsnetwerk geopereerd door het KNMI worden geanalyseerd in hoofdstuk 6. Tenslotte, worden in hoofdstuk 7 de belangrijkste conclusies herhaald.

Binnen twee weken kan geen volledige analyse van de aardbeving worden gedaan. De resultaten gepresenteerd in deze Speciale Rapportage zijn daarom nog onvolledig en zullen mogelijk worden aangevuld met de resultaten van verder onderzoek in de komende maanden. Hoofdstuk 8 geeft een overzicht van de onderzoeken die zullen worden uitgevoerd.

3 Reservoirdruk in het noorden van het Groningen-gasveld

De aardbevingen die plaatsvonden na sluiting van het Groningen-gasveld zijn voornamelijk het gevolg van de vereffening van de drukverschillen in het reservoir tussen verschillende regio's in het gasveld. Initieel produceerde NAM het Groningen-gasveld op zo'n manier dat de drukverschillen tussen de verschillende delen in het gasveld minimaal waren. Maar met het eerst minimaliseren van de productie uit de vijf productieclusters rond Loppersum op aanwijzing van de minister en later insluiten ervan bleef de druk in het noordelijk deel van het gasveld hoog, terwijl de voortdurende productie uit andere delen van het veld daar een verdere daling van de druk veroorzaakte. Tijdens het nemen van het besluit rond de productie uit de vijf clusters heeft NAM hierop gewezen en de periode na sluiting van het gasveld met nog voortdurende seismiteit geduid als de 'remweg'.



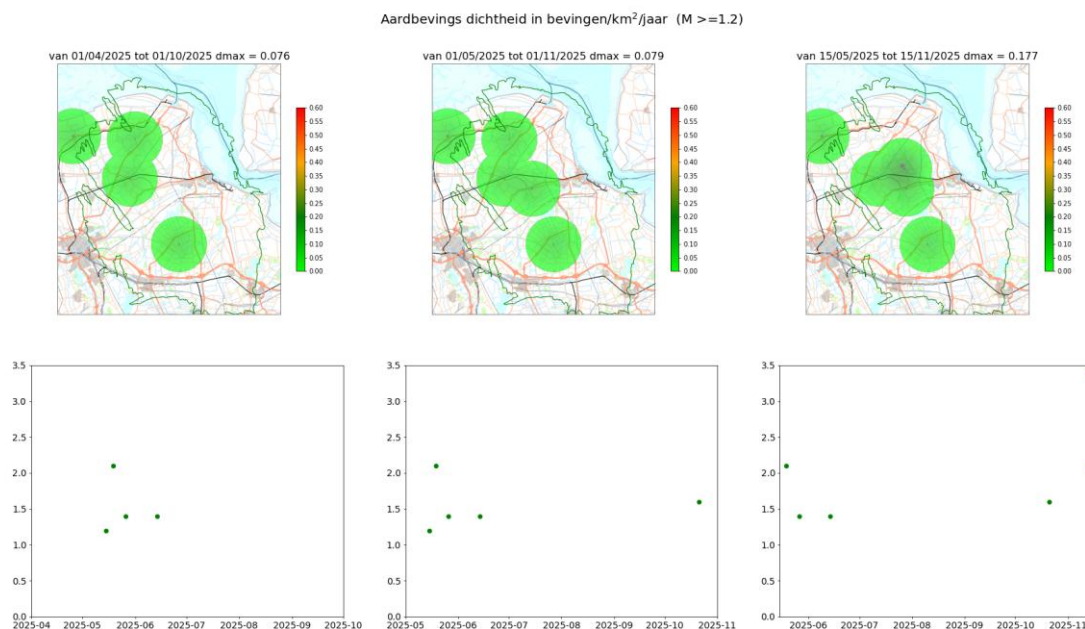
Figuur 3.1 Ontwikkeling van de reservoirdruk in het Groningen-gasveld. Links: De vierkante markers geven druk metingen weer en de getrokken lijnen de druk voorspelling door het model van het gasveld. Rechts: Kaart van het Groningen-gasveld met daarin indicatief aangegeven de gebieden waar de reservoirdruk daalt en stijgt door de drukvereffening.

Figuur 3.1 toont de ontwikkeling van de reservoirdruk van het Groningen-gasveld in de afgelopen jaren. De druk stijgt sinds 2022 in het zuiden van het gasveld (locaties OLD en BOL) en daalt in het noorden van het gasveld (locaties LRM, BRH en OVS). De druk in het reservoir wordt door NAM gemonitord door met regelmaat drukmetingen, Static Pressure Gradient Survey (SPG-Survey), te doen en deze te rapporteren aan de toezichthouder (NAM (Landman), 2025d). Dit is vastgelegd in afspraken met de toezichthouder (NAM (Geurtsen, Landman en Ketelaar), 2020a en NAM, 2020b). Afwijkende en belangrijke drukmetingen worden onmiddellijk met SodM gedeeld. Begin volgend jaar zal NAM de drukmetingen gedaan in 2025 en een analyse hiervan rapporteren aan SodM.

4 Seismiciteit in de periode voor de Zeerijp aardbeving

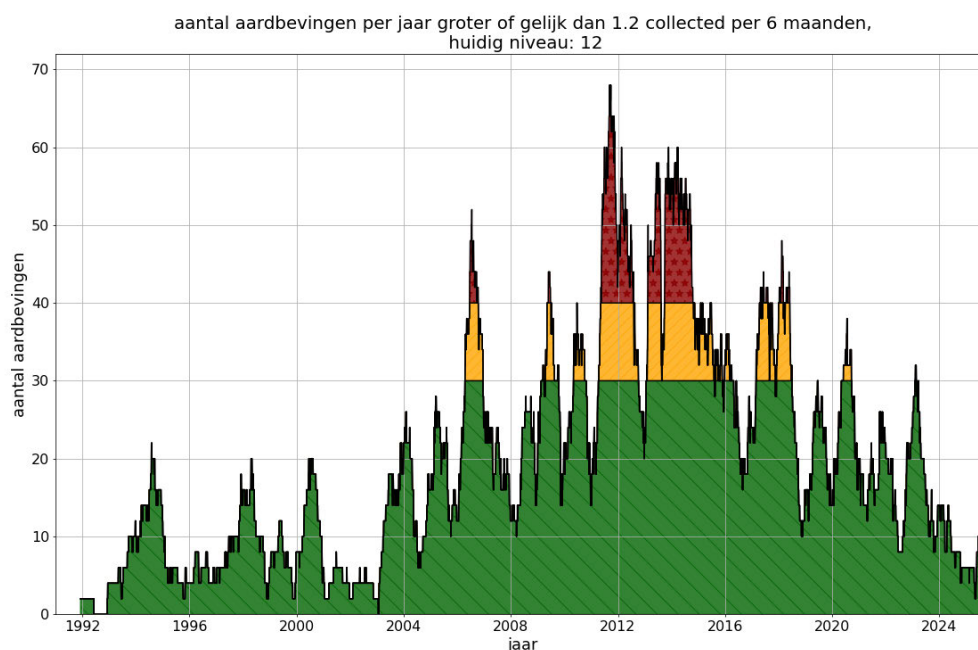
4.1 Trendparameters

De trendparameters-aardbevingsdichtheid en trendparameter-aantal aardbevingen per jaar tonen geen overschrijding. Hieronder vindt u een afbeelding met de meest actuele aardbevingsdichtheid (Fig. 4.1).



Figuur 4.1 Bovenste panelen: Aardbevingsdichtheid berekend zoals bepaald in de monitoringsstrategie voor het Groningen-gasveld op (links) 1 oktober 2025, (midden) 1 november 2025 en (rechts) 15 november 2025. Onderste panelen: Magnitude van aardbevingen in de zes maanden voorafgaand aan deze drie datums.

Hieronder vindt u een afbeelding met de bijgewerkte trend in het jaarlijks aantal aardbevingen in Groningen (Fig. 4.2).

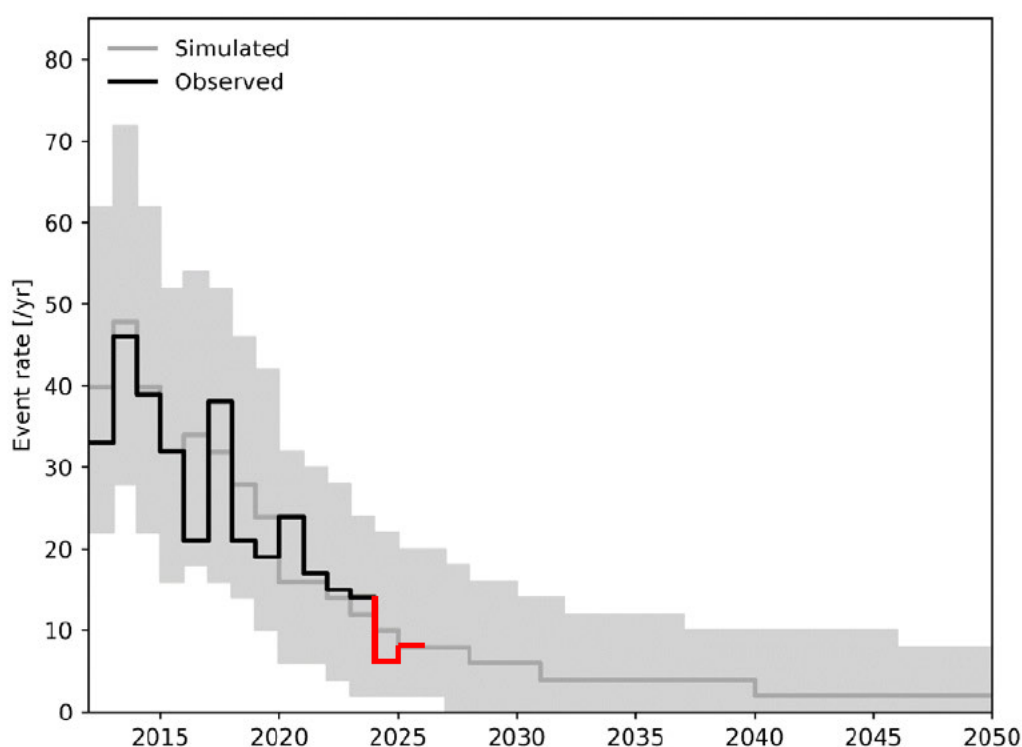


Figuur 4.2 Aardbevingen per jaar berekend zoals bepaald in de monitoringsstrategie voor het Groningen-gasveld.

Door deze twee aardbevingen bij Zeerijp is de hoogste aardbevingsdichtheid in het gasveld opgelopen van 0,079 naar 0,177 aardbevingen/(km² * jaar) en het aantal aardbevingen van 10 naar 12 aardbevingen/jaar. Deze waarden liggen onder de rapportagegrenzen van respectievelijk 0,30 aardbevingen/(km² * jaar) en 30 aardbevingen/jaar.

4.2 Vergelijking aantal aardbevingen per jaar met voorspelling

Het aantal aardbevingen dat jaarlijks wordt geregistreerd met een magnitude boven de magnitude van compleetheid ($M_c \geq 1,2$) komt goed overeen met de voorspelling door de HRA. Deze vergelijking wordt elk halfjaar gemaakt en gedeeld met SodM in de periodieke rapportage seismiteit Groningen (NAM (van Elk), 2024, NAM (van Elk), 2025a en NAM (van Elk), 2025e), die elk halfjaar wordt gedeeld met SodM en de minister (Fig. 4.2). Ook het aantal aardbevingen in 2025 komt goed overeen met de voorspelling door de HRA. Met 12 aardbevingen per jaar is dit hoger dan de verwachting, maar valt ruim binnen de onzekerheidsband.



Figuur 4.2 Door HRA berekend (grijze lijn en grijze band) en de door het monitoringsnetwerk geopereerd door KNMI waargenomen aantal aardbevingen (zwarte lijn) per jaar met elkaar vergeleken.

4.3 Magnitude van de aardbevingen

Vóór de Zeerijp aardbeving op 14 november 2025 was de ondergrond in Groningen relatief rustig. In de drie jaren voor deze aardbeving is er geen aardbeving opgetreden met een magnitude groter dan of gelijk aan 2,3. Voor een deel kan dit verklaard worden door de afname van het aantal aardbevingen per jaar, na stopzetting van de productie uit het Groningen-gasveld. In deze drie jaar zijn er wel zeven aardbevingen geweest met een magnitude tussen de 2,0 en 2,2 en dertig aardbevingen met een magnitude groter dan 1,2 (de magnitude van compleetheid en de monitoringsgrens).

Om te duiden hoe uitzonderlijk dit is kijken we daarom niet naar de duur van een bepaalde periode, maar of er eerder al een langere reeks aardbevingen is geweest met een magnitude kleiner dan of gelijk aan 2,3. Het blijkt dat sinds de uitbreiding van het monitoringsnetwerk in 2014 er maar éénmaal eerder een reeks langer dan de reeks voorafgaand aan de Zeerijp aardbeving is opgetreden. Dat is de reeks van aardbevingen met een magnitude kleiner dan of gelijk aan 2,2 na de Froombosch aardbeving

op 25 februari 2016 (magnitude 2,4) tot de aardbeving bij Slochteren op 27 mei 2017 (magnitude 2,6). Deze reeks was 32 aardbevingen lang.

De HRA geeft ook de kans op een aardbeving met een magnitude die een bepaalde magnitude overschrijdt. Dit is weergegeven in de onderstaande tabel.

Jaar	P(M≥2,5)	P(M≥3,0)	P(M≥3,6)	P(M>=4,0)	P(M>=4,5)	P(M>=5,0)
2025	39,38%	14,25%	2,69%	0,55%	0,06%	0,01%
2026	36,83%	13,13%	2,46%	0,50%	0,05%	0,01%
2027	34,19%	12,03%	2,18%	0,44%	0,04%	0,01%
2028	31,94%	11,19%	2,07%	0,44%	0,05%	0,00%
2029	29,62%	10,23%	1,86%	0,39%	0,04%	0,00%
2030	27,70%	9,39%	1,70%	0,35%	0,03%	0,00%
2031	25,03%	8,45%	1,53%	0,31%	0,03%	0,00%
2032	23,17%	7,73%	1,41%	0,29%	0,03%	0,00%
2033	21,80%	7,23%	1,28%	0,26%	0,03%	0,00%

Tabel 4.1 De door de HRA berekende jaarlijkse kans op een aardbeving met een magnitude gelijk aan of groter dan de aangegeven magnitude.

De tabel geeft aan dat in 2025 de kans op een aardbeving met een magnitude groter dan of gelijk aan 2,5 bijna 40% is, terwijl de kans op een aardbeving met een magnitude groter dan of gelijk aan de Huizinge aardbeving bijna 3 % is. De kans op een aardbeving met de magnitude gelijk aan of groter dan de Zeerijp aardbeving van 14 november 2025 ligt tussen de 5 en 7 %. De kop van het krantenartikel 'Wetenschap verrast: 'Geen enkel model had zo'n grote aardbeving voorspeld' ' (NRC (Voogt), 2025) is dan ook onjuist.

5 Geofysische en geologische analyse van de aardbeving

5.1 Bepaling van het hypocentrum

Gebaseerd op de metingen door het seismisch monitoringsnetwerk heeft KNMI het epicentrum van de aardbeving bepaald (RD: E 247352,7, N 596622,6). NAM heeft NORSAR gevraagd om een onafhankelijke analyse te doen om het epicentrum van de Zeerijp aardbeving vast te stellen gebaseerd, op de meetgegevens van het seismische monitoringsnetwerk. Dit als validatie van de analyse al eerder uitgevoerd door KNMI.

Hiervoor worden twee methodes gebruikt. Een methode maakt alleen gebruik van de aankomsttijden van de P-golven terwijl de andere methode zowel de aankomst van de P-golven als de S-golven gebruikt. In hoofdstuk 6 komen we nog terug op P-golven en S-golven.

	Easting	Northing	Diepte [m]	Afstand tot KNMI [m]
KNMI	247352.7	596622.6	3000	-
NORSAR (P-golven)	247600	596800	3000	305
NORSAR (P- & S-golven)	247600	597000	3000	451

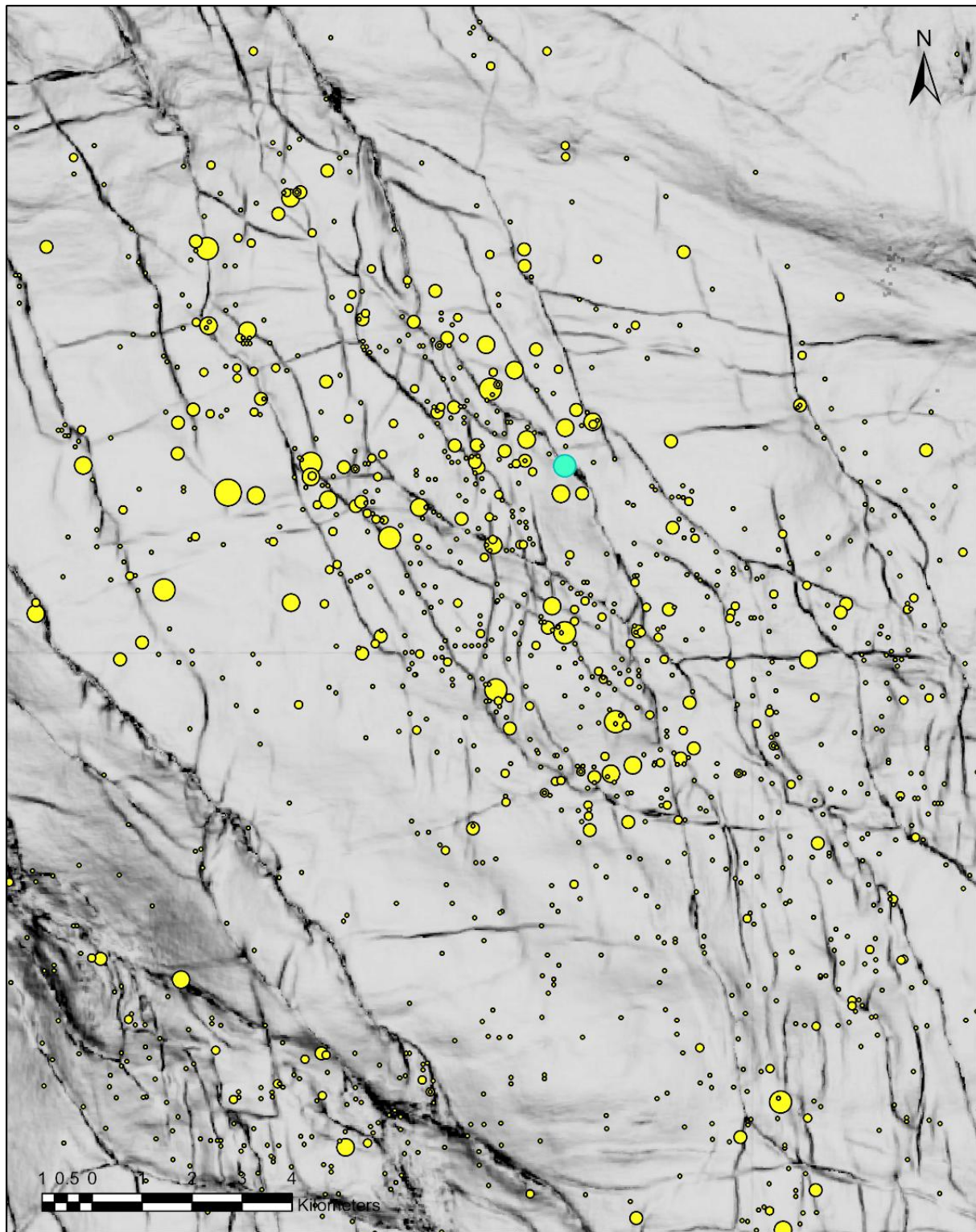
Tabel 5.1 Locatie van het epicentrum van de Zeerijp aardbeving op 14 november 2025 bepaald door KNMI en NORSAR.

Voor beide methoden is de afstand van het door NORSAR berekende epicentrum tot het door KNMI bepaalde epicentrum erg klein. Dit bevestigt de door KNMI bepaalde locatie van de aardbevingsbron. In de methode gebruikt door NORSAR wordt ook de diepte van de aardbevingsbron bepaald. De beste inschatting van deze diepte is 3,000 m.

In appendix A van deze Speciale Rapportage is een voorlopige analyse door NORSAR opgenomen. In hoofdstuk 8 wordt verder ingegaan op het verdere onderzoek dat NORSAR in opdracht van NAM zal uitvoeren.

5.2 Locatie van het hypocentrum ten opzichte van breuken

Op de onderstaande kaarten van de breuken in het Groningen-gasveld zijn de epicentra van de aardbevingen weergegeven. De kaart in figuur 5.1 laat zien dat de Zeerijp aardbeving op een van de grote breuken rond Loppersum heeft plaatsgevonden. Bijna 2 km naar het noorden-westen heeft op 8 januari 2018 rond deze breuk ook al een aardbeving met magnitude 3,4 plaatsgevonden (NAM (den Bezemer en van Elk), 2018). Ook de bron van de naschok enkele uren na de aardbeving ligt dicht bij deze breuk, ongeveer 500 m ten zuidoosten van de hoofdschok. Figuur 5.2 toont een kleiner gebied rond de recente aardbevingen bij Zeerijp. We hebben de Zeerijp aardbeving van 14 november 2025 ook weergegeven op de dip-map representatie van de breuken in het reservoir (Fig. 5.3).



Geïnduceerde
aardbevingen
(KNMI)

Magnitude

• $M < 1.5$

• $1.5 \leq M \leq 2$

• $2 < M \leq 2.5$

• $2.5 < M \leq 3$

• $3 < M \leq 3.5$

• $3.5 < M \leq 4$

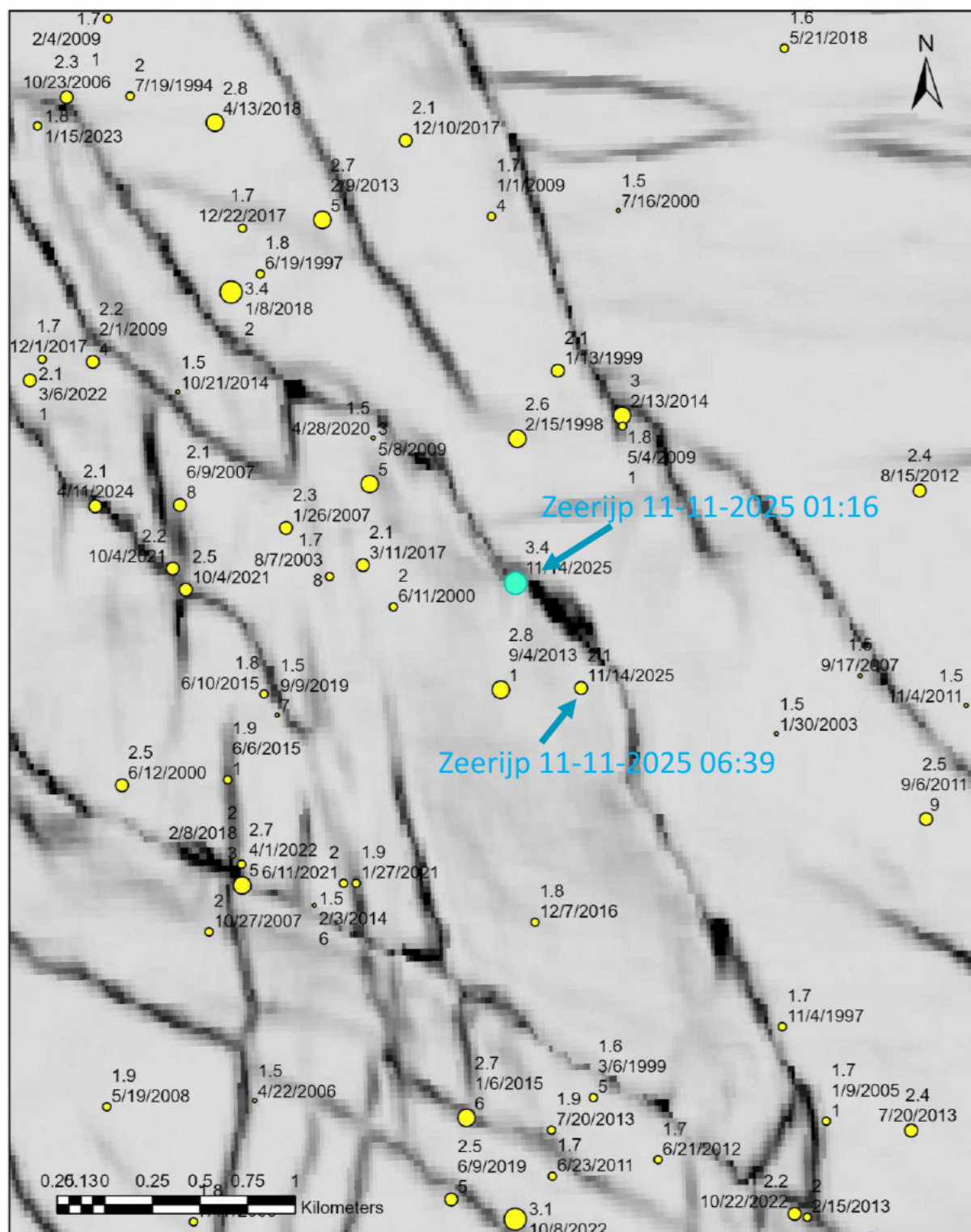
Base Zechstein
semblance

Value

High : 127

Low : -144

Figuur 5.1 Kaart van het Groningen-gasveld met breuken (semblance map) met daarop aangegeven (als gele stip) de epicentra van aardbevingen. De Zeerijp aardbeving van 14 november 2025 is aangegeven als een blauwe stip.



Geïnduceerde
aardbevingen
(KNMI)

Magnitude

• M < 1.5

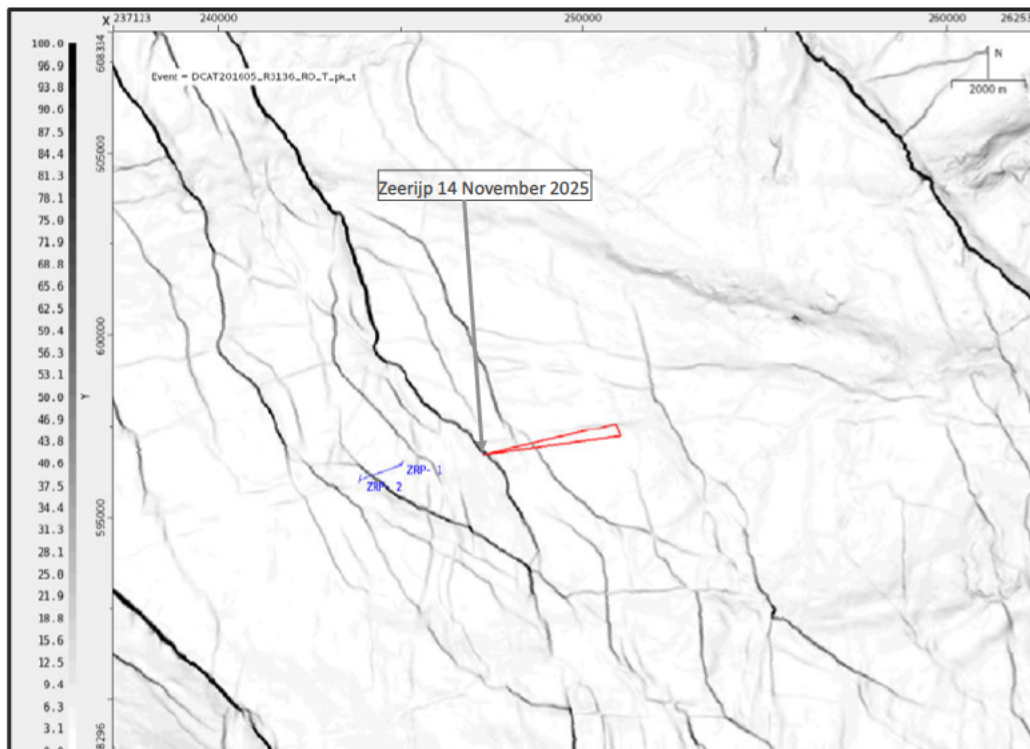
- 1.5 <= M <= 2
- 2 < M <= 2.5
- 2.5 < M <= 3
- 3 < M <= 3.5

Base Zechstein
semblance

Value

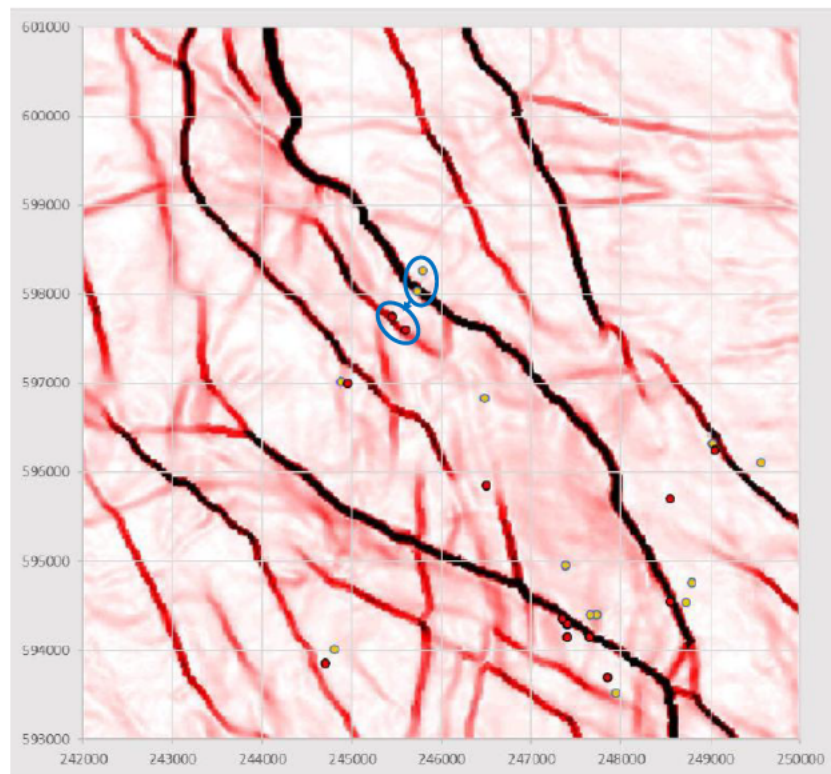
High : 127
Low : -144

Figuur 5.2 Kaart van het gebied rond Loppersum met breuken (semblance map) met daarop aangegeven (als gele stip) de epicentra van aardbevingen. De Zeerijp aardbeving van 14 november 2025 is aangegeven als een blauwe stip.



Figuur 5.3 Kaart van het gebied rond Loppersum met breuken (Time Dip map van de top van het Rotliegend) met daarop aangegeven het epicentrum van de Zeerijp aardbeving van 14 november 2025.

Een analyse van de epicentra van aardbevingen in dit deel van het veld uitgevoerd onmiddellijk na de Zeerijp aardbeving op 8 januari 2018, toont dat een meer uitgebreide analyse die gebruik maakt van Full-Waveform Inversion methode soms leidt tot beperkte aanpassingen in de epicentra (Fig. 5.4).

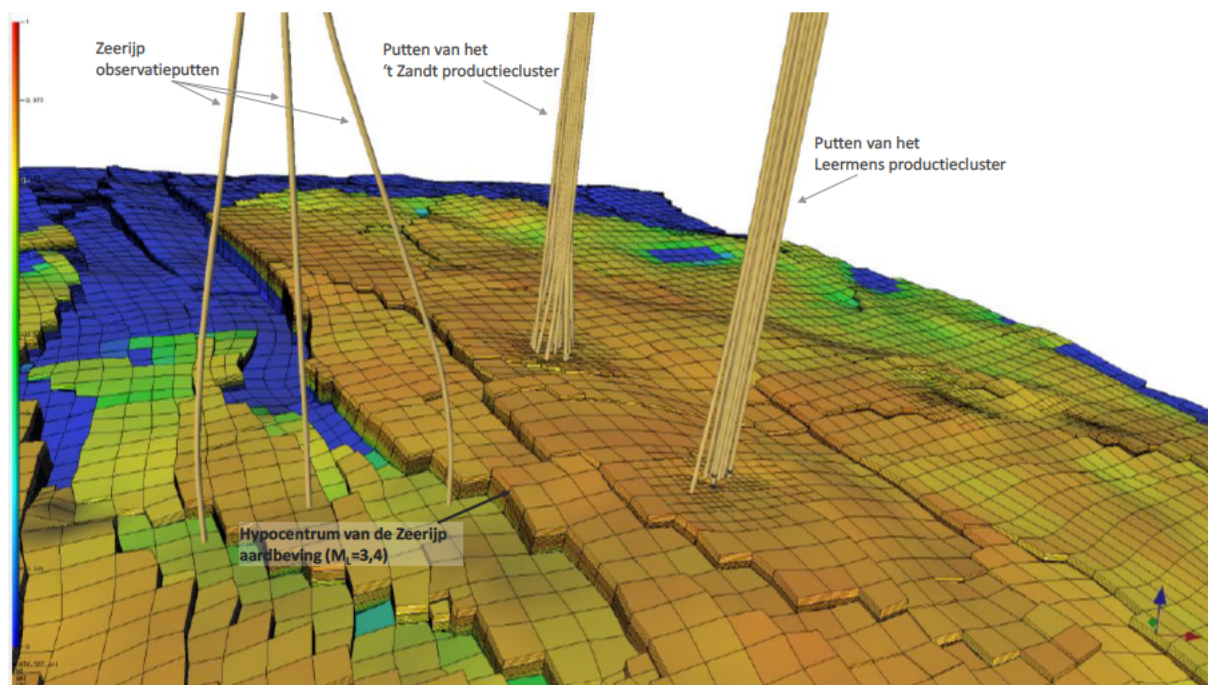


Figuur 5.4 Dit is figuur 20 uit de Speciale Rapportage voor de Zeerijp (2018) aardbeving (NAM (den Bezemer en van Elk), 2018). Het toont de beperkte relocatie van het epicentrum van deze aardbeving door gebruikt te maken van de FWI-methode.

Door de FWI-methode werd het epicentrum van de Zeerijp aardbeving in januari 2018 geplaatst op een kleinere breuk ten zuiden van de grote breuk. NORSAR zal in opdracht van NAM ook voor de Zeerijp aardbeving in november 2025 een plaatsbepaling van het epicentrum met de FWI-methode uitvoeren (hoofdstuk 8).

5.3 Het reservoir rond het hypocentrum

Rond de locatie van de Zeerijp aardbeving op 14 november 2025 ligt de top van het reservoir ten oosten van de breuk (upthrown side) op ongeveer 2950 m diepte en is het reservoir 215 m dik. De dichtstbijzijnde putten bij het hypocentrum van de Zeerijp aardbeving zijn de putten van het Leermens-productiecluster (Fig. 5.5). Bij het Leermens-cluster ten oosten van het hypocentrum ligt de top van het reservoir op 2.800 m diepte en is het reservoir 210 m dik. Het gas-water contact ligt in dit gebied op 2.980 m diepte. De gas column is bij het hypocentrum van de aardbeving dus zo'n 180 meter hoog aan de ene kant van de breuk (de oostelijke kant) en 30 m hoog aan de andere kant (westelijke kant). De gemeten compactie in de fibre-optische kabel in de observatieput ZRP-3A geeft aan dat de druk ook daalt in het watervoerende reservoir onder het gasvoerende reservoir.



Figuur 5.5 Het model van het Groningen-gasveld rond Zeerijp. De top van het reservoir is weergegeven met de putten van de nabijgelegen productieclusters en de Zeerijp observatieputten. De kleur blauw geeft aan dat het reservoir watervoerend is en de kleur oranje geeft aan dat het gasvoerend is.

5.4 Het bronmechanisme

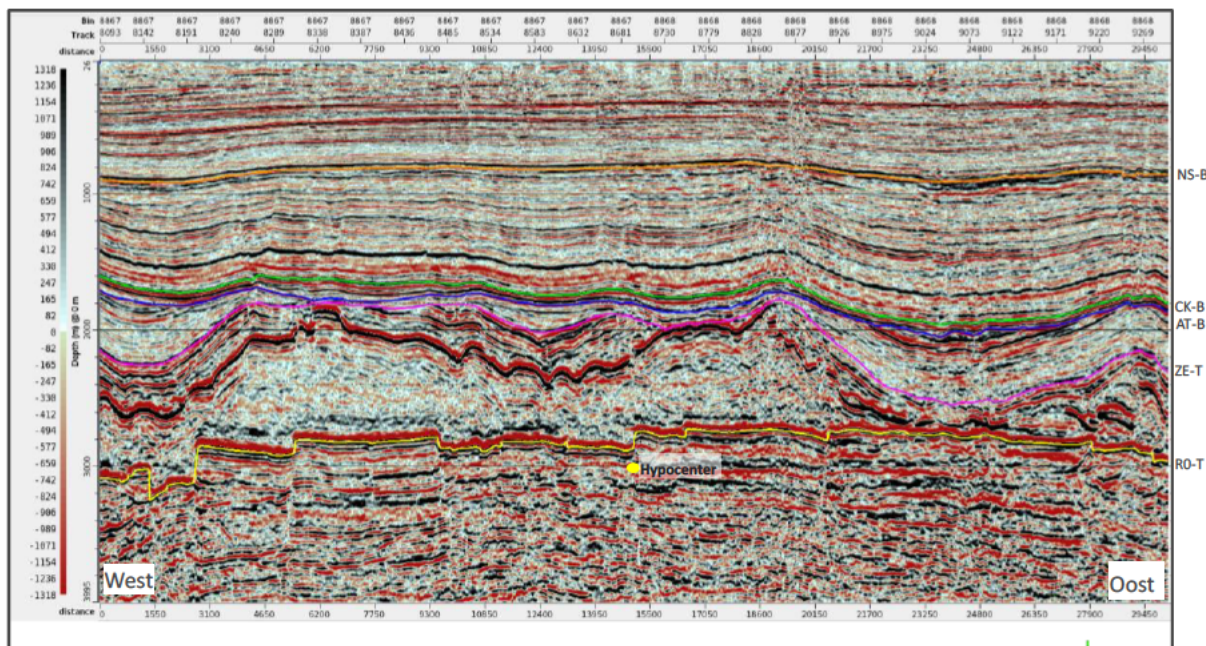
Naast de bepaling van het hypocentrum van de Zeerijp aardbeving heeft NORSAR ook een eerste voorlopige analyse gedaan van het bronmechanisme. Hiervoor werd alleen de polariteit van de P-golven gebruikt. De analyse geeft aan dat de breukbeweging overeenkomt met normal-faulting in de Noord-Zuid richting. Dit komt goed overeen met het lokale spanningsveld in het gesteente. In appendix B wordt een verdere verklaring van de methode en de resultaten gegeven.

5.5 De gesteentelagen boven het hypocentrum

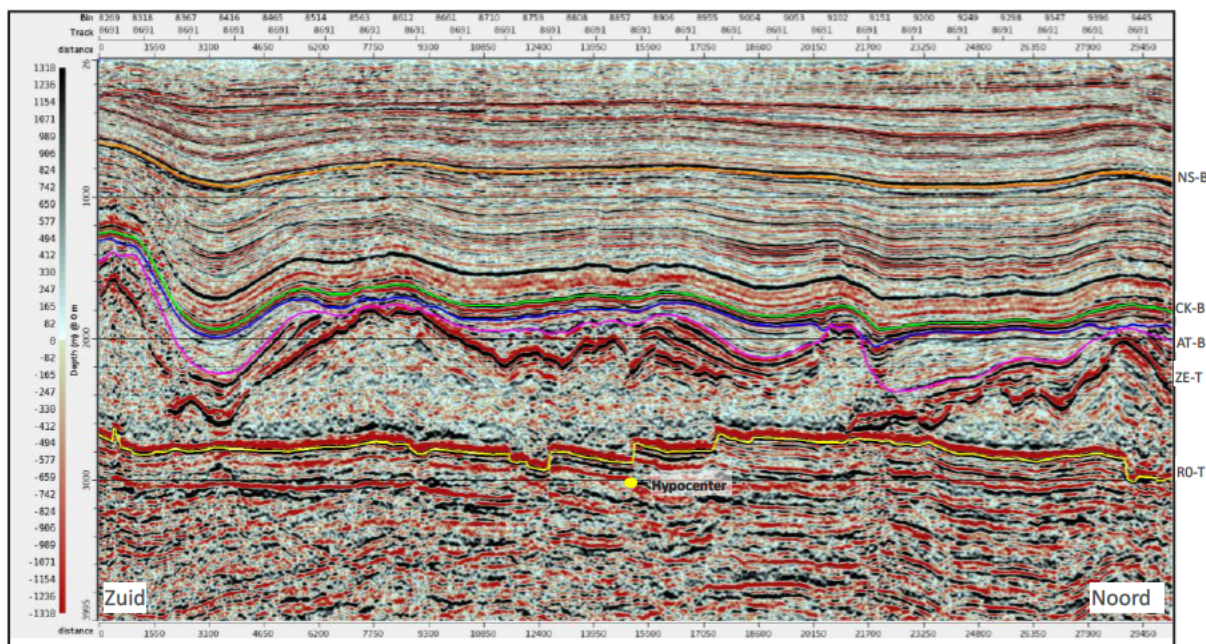
Tot nu toe hebben we in dit hoofdstuk alleen naar de aardbevingsbron en de onmiddellijke omgeving ervan gekeken. Echter de aardbevingsgolven bewegen door de bovenliggende gesteentelagen van de bron naar het maaiveld toe. De onderstaande figuren (Fig. 5.6 en 5.7) tonen seismische cross-sections

door het hypocentrum van de aardbeving. Deze verticale doorsnedes door het gesteente tonen de aardlagen waar de aardbevingsgolf doorheen beweegt voor deze het maaiveld bereikt.

In geel is de top van het reservoir aangegeven (de Rotliegend zandsteen, RO-T). Daarboven ligt de Zechstein zoutlaag. Deze varieert over het Groningen-gasveld in dikte. De top van de Zechstein (ZE-T) varieert daardoor in diepte. Echter rond het hypocentrum is deze van constante dikte tussen de 800 m en 1000 m. Boven de Zechstein liggen de Krijt-formatie en de Noordzee-formatie. Er zijn in dit gebied geen duidelijke uitzonderlijke geologische structuren boven de aardbevingsbron.



Figuur 5.6 Seismische doorsnede van west naar oost door het Groningen-gasveld rond het hypocentrum van de Zeerijp aardbeving.

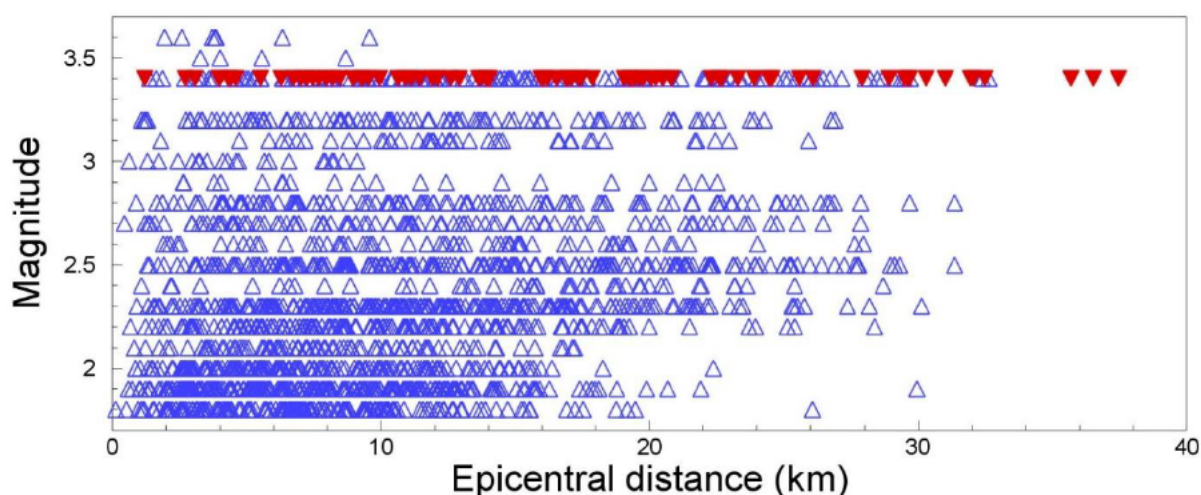


Figuur 5.7 Seismische doorsnede van zuid naar noord door het Groningen-gasveld rond het hypocentrum van de Zeerijp aardbeving.

6 Analyse van de metingen door het seismisch monitoringsnetwerk

6.1 De registraties van de Zeerijp aardbeving

In totaal zijn 90 drie-componenten opnames van de Zeerijp aardbeving door het KNMI-monitoringsnetwerk verkregen. Figuur 6.1 toont de 81 bruikbare opnames samen met de opnames gebruikt voor de ontwikkeling van het meest recente empirische grondbewegingsmodel in 2021. In de hoofdtekst worden alleen we de meest opmerkelijke aspecten van de grondbeweging door de recente Zeerijp aardbeving toegelicht. Een uitgebreidere analyse van de registraties van de grondbeweging is opgenomen in appendix C.



Figuur 6.1 De registraties van de aardbevingen in de database voor Groningen (blauwe driehoeken) en de registraties van de Zeerijp aardbevingen op 14 november 2025 (rode driehoeken) weergegeven voor magnitude en afstand van het epicentrum.

Opvallend is dat er van deze aardbeving bruikbare registraties zijn gemaakt op grotere afstand. Hierdoor is de afstand waarop bruikbare registraties zijn gemaakt met bijna 5 km toegenomen.

6.2 Amplitudes van PGA en PGV

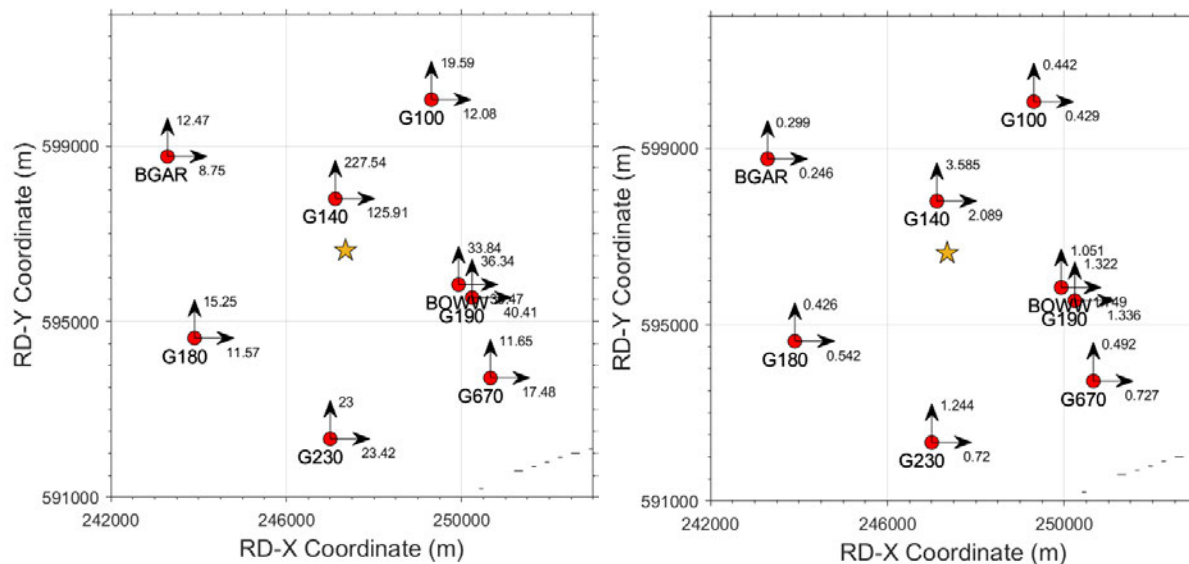
Een vergelijking van de PGV en PGA voor de Zeerijp aardbeving met de eerdere aardbevingen laat zien dat deze hier consistent mee zijn. Opvallend is wel dat de Zeerijp aardbeving een hogere amplitude voor PGA en PGV heeft geregistreerd dan die bij eerdere aardbevingen is waargenomen. In tabel 6.1 worden deze waarden voor PGV en PGA vergeleken met de hoogste waarden bij eerdere aardbevingen.

Aardbeving		M _L	Station	Afstand (km)		PGA		PGV (mm/s)
Naam	Datum			R _{epi}	R _{hyp}	(cm/s ²)	(g)	
Huizinge	16-08-2012	3.6	MID1	1.95	3.58	81.5	0.083	34.62
Zeerijp	08-01-2018	3.4	BGAR	2.68	3.95	108.7	0.111	32.12
Zeerijp	14-11-2025	3.4	G140	1.20	3.23	227.5	0.232	35.85

Tabel 6.1 Waarden voor PGA en PGV voor de drie hoogste amplitude registraties in Groningen.

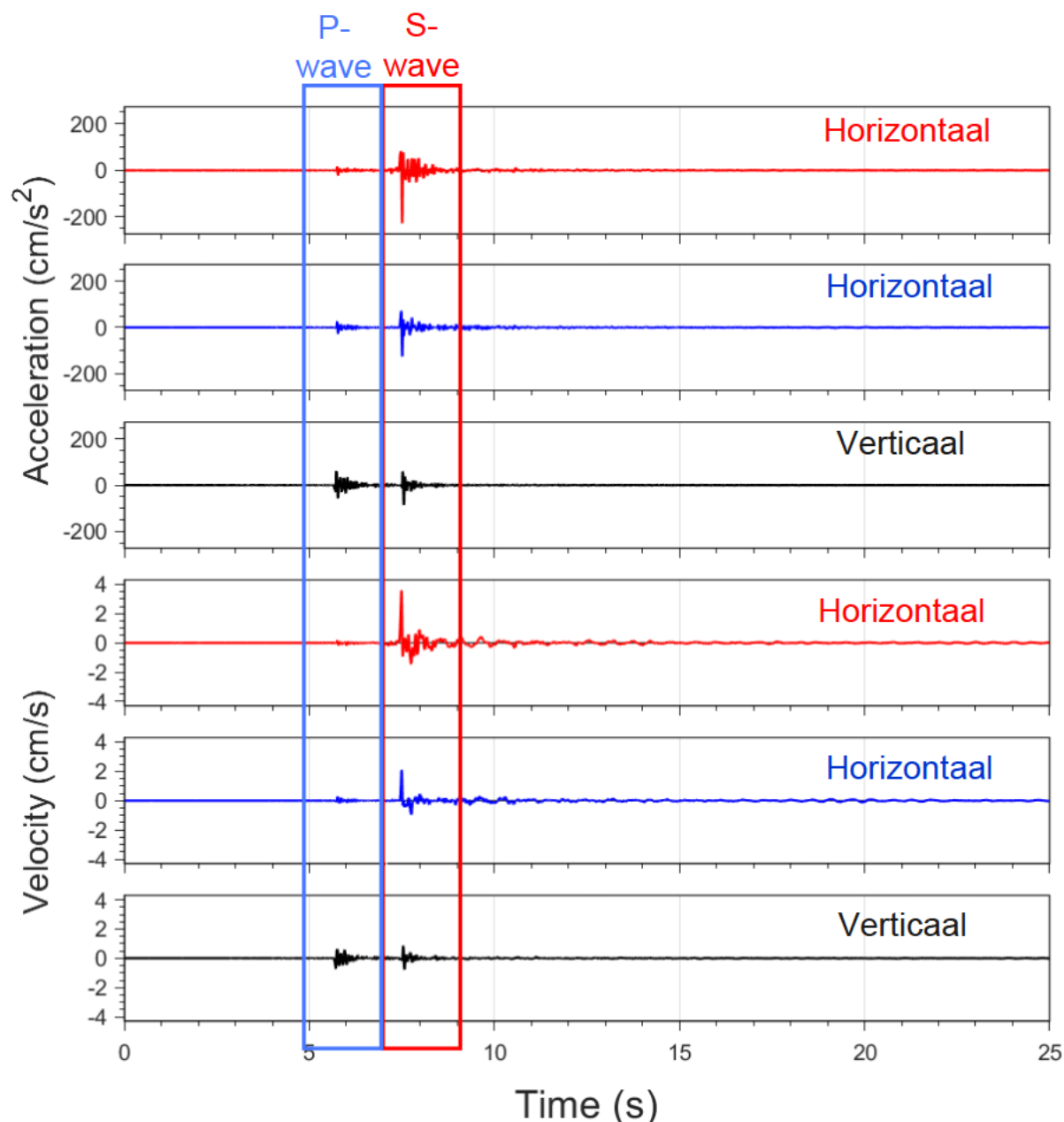
De hoogste waarde voor PGA van de Zeerijp aardbevingen is meer dan twee keer zo groot als de eerdere hoogste waarde, terwijl de hoogste waarde voor PGV slechts 3,6% groter is. Deze hoogste

amplitudes voor PGV en PGA zijn geregistreerd door monitoringsstation G140, dat op een kortere afstand tot het epicentrum (1,2 km) lag dan de stations waar de eerder de hoogste amplitudes waren gemeten (Fig. 6.2). Ook is opmerkelijk dat de amplitude van zowel PGV als PGA veel lager zijn voor metingen door de zeven omringende stations, die hier op een afstand van 4 tot 6 km afstand van liggen.



Figuur 6.2 Links: Horizontale componenten of PGA (cm/s²) geregistreerd dicht bij het epicentrum van de Zeerijp aardbeving in november 2025. Rechts: Horizontale componenten of PGV (cm/s) geregistreerd dicht bij het epicentrum van de Zeerijp aardbeving in november 2025.

De onderstaande figuur (Fig. 6.3) toont de registraties van de snelheid en de versnelling gemeten door monitoringsstation G140 gelegen het dichtste bij het epicentrum van de Zeerijp aardbeving. Duidelijk zijn de aankomsten van de P-golven te zien in de verticale grondbeweging. Korte tijd later (rond de 1,8 s later) komen ook de S-golven aan op deze locatie. Deze geven voornamelijk een horizontale grondbeweging.



Figuur 6.3 Grondbeweging door de Zeerijp 2025 aardbeving gemeten door station G140. Dit station is het dichtst gelegen bij het epicentrum van de aardbeving.

Een inwoner van Zeerijp heeft de groundbeweging in zijn huis, veroorzaakt door deze aardbeving, vastgelegd met een camera (Fig. 6.4). Het huis staat dicht bij het epicentrum van de Zeerijp aardbeving (gebaseerd op de bepaling door KNMI is de afstand ongeveer 850 m). Deze beelden zijn publiek beschikbaar op het internet (RTVNoord, 2025 en NOS, 2025). Duidelijk is de aankomst van de P-golven te zien (tijd op het camera beeld 2025-11-14 01:16:42) en enkele seconden later de aankomst van de S-golven (tijd op het camera beeld 2025-11-14 01:16:44). Bij de beelden is ook geluid te horen. Op beide momenten is ook duidelijk een knal te horen. Eerdere beelden van een aardbeving in Groningen, zoals de opname in de supermarkt tijdens de Huizinge 2012 aardbeving, hadden geen geluid.

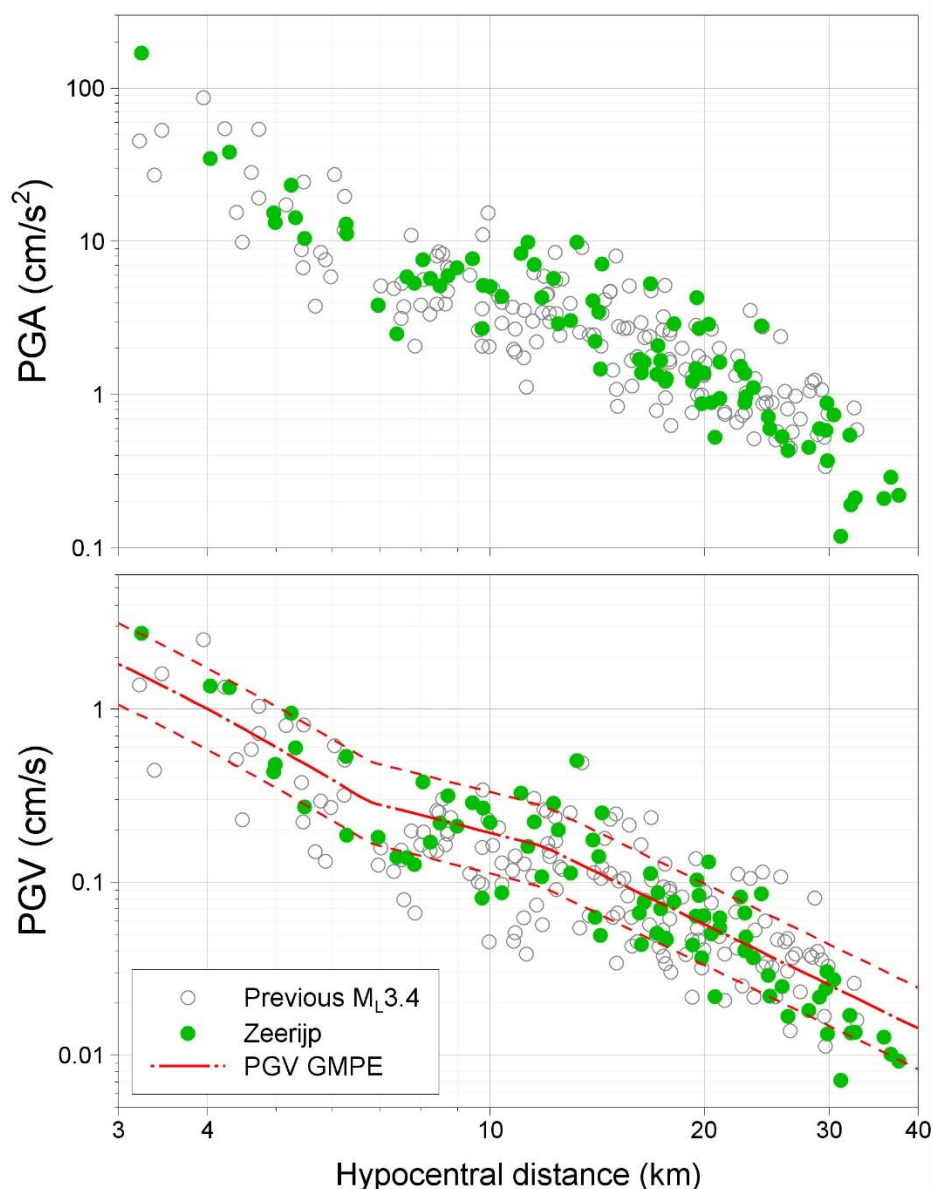


Figuur 6.4 Een camera legt de aardbeving van Zeerijp op 14 november 2025 vast in het huis van Jasper Jacobs in Zeerijp.

Ook op andere plaatsen in de wereld zoals de Verenigde Staten, Frankrijk en Finland, hebben ondiepe aardbevingen met een relatief lage magnitude hoorbare knallen veroorzaakt. Bij een geothermie project in Helsinki (Lamb et al., 2021) werden over een periode van 11-dagen 266 aardbevingen geregistreerd, waarvan er 39 hoorbare knallen gaven. De magnitude van deze aardbevingen lagen tussen de -0,07 en 1,87, terwijl de diepte varieerde van 4,8 tot 6,5 km.

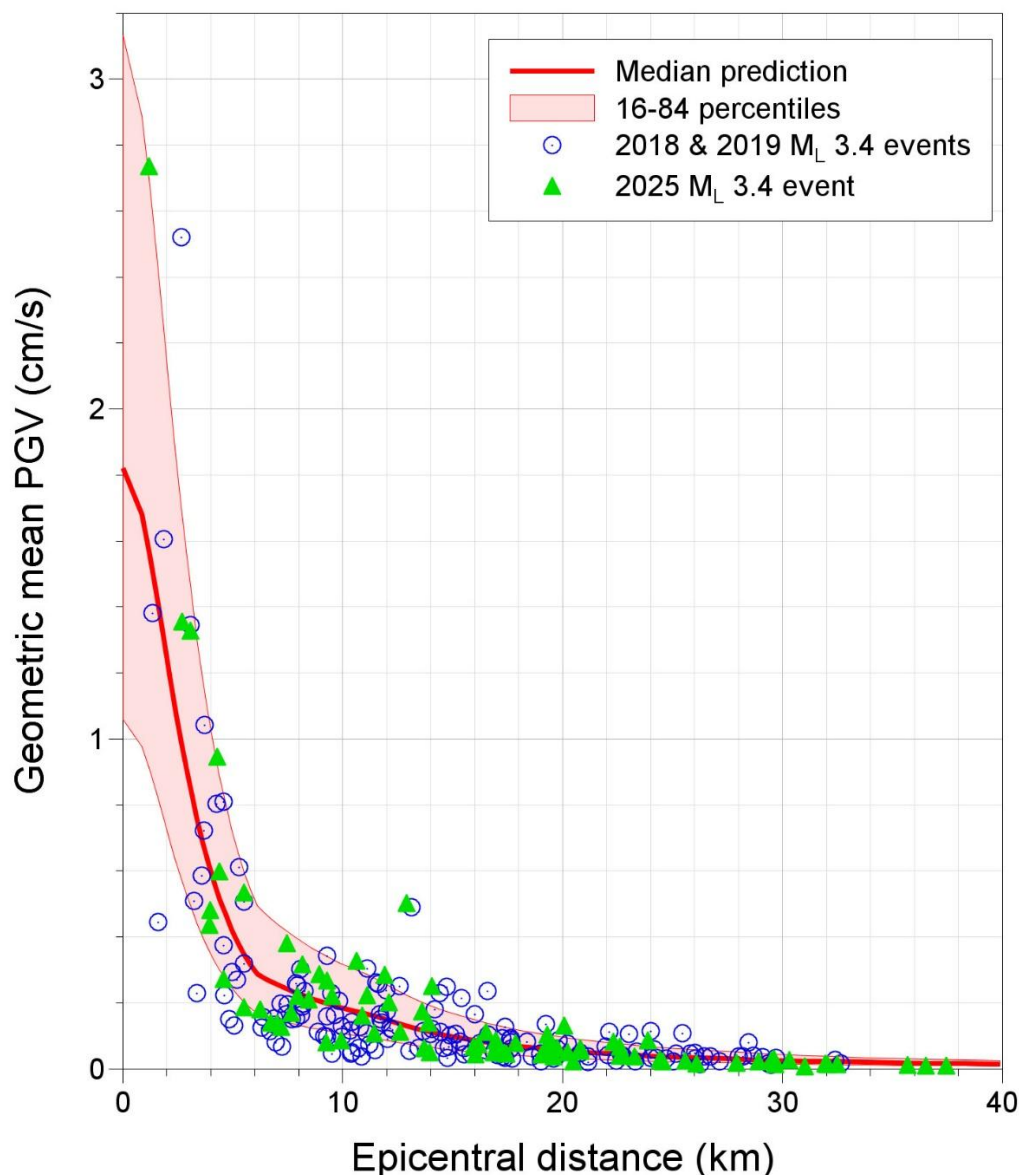
6.3 Vergelijking met eerdere aardbevingen en de GMPE

In appendix C wordt een uitgebreide analyse van de registraties van de Zeerijp aardbeving, en in het bijzonder die gemaakt door station G140, gepresenteerd met als doel te onderzoeken of de nieuwe maxima voor PGA en PGV alleen opvallend zijn voor dit station of dat de Zeerijp aardbeving zelf afwijkt van eerdere aardbevingen in Groningen. Deze analyse laat zien dat de PGA en PGV-waarden gemeten voor de Zeerijp aardbeving consistent zijn met eerdere metingen, met uitzondering van de PGA en PGV-waarden gemeten door station G140. Echter dit komt door de korte afstand van dit station tot het epicentrum van deze aardbeving. Vooral een vergelijking van de registratie van de recente Zeerijp aardbeving met die van eerdere aardbevingen met een magnitude 3,4 laat dit zien (Fig. 6.5).



Figuur 6.5 Geometrisch gemiddelde van de PGA (bovenste paneel) en PGV (onderste paneel) afgezet tegen afstand tot het hypocentre voor de de Zeerijp aardbeving (groene cirkels) en de andere aardbevingen met een magnitude 3,4 (open cirkels).

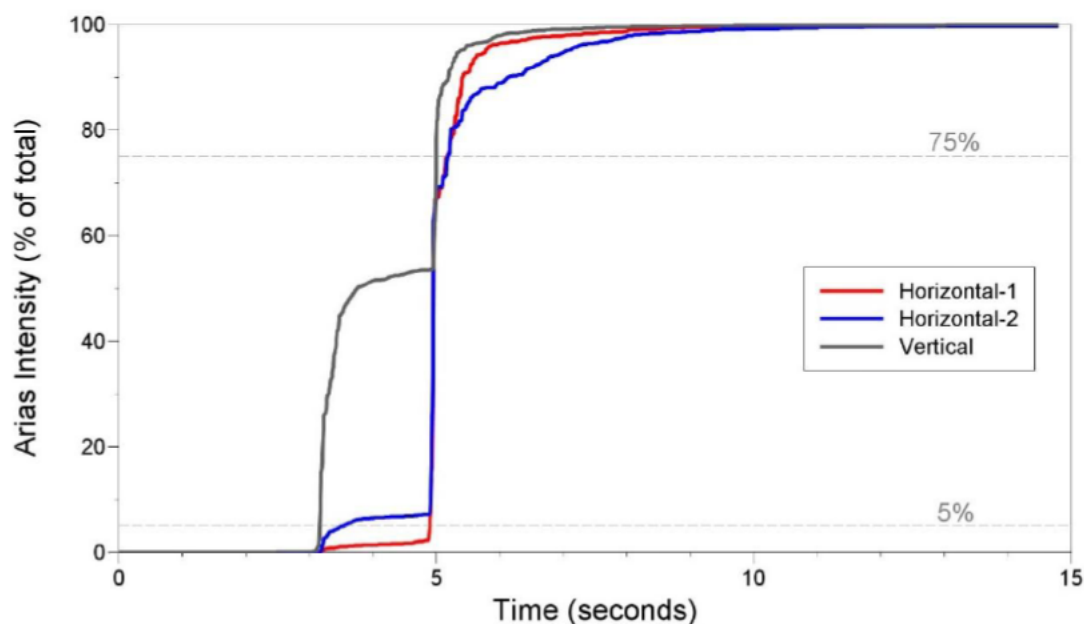
Een uitgebreide analyse van de residuals van de gemeten PGA (opgenomen in appendix C) bevestigt het beeld dat de groundbewegingen tijdens de Zeerijp aardbeving consistent zijn met die tijdens eerdere aardbevingen in Groningen en met het groundbewegingsmodel. Voor de residual analysis voor PGV kan gebruik worden gemaakt van de meest recente empirische GMPE voor Groningen (Bommer et al, 2021). Voor PGA is geen GMPE voor Groningen beschikbaar en wordt in deze analyse de GMPE ontwikkeld voor aardbevingen in California gebruikt (Atkinson, 2015). De analyse laat zien dat gemiddeld de PGV-waarden voor de Zeerijp aardbeving iets lager zijn dan die voor eerdere aardbevingen in Groningen met dezelfde magnitude. Gemiddeld zijn de PGV-waarden gemeten voor de Zeerijp aardbeving iets lager dan de voorspelling door de empirische GMPE van het gemiddelde niveau over de aardbevingen met eenzelfde magnitude.



Figuur 6.6 Gemeten geometrisch gemiddelde PGV-waarde voor aardbevingen met een magnitude 3,4 met de voorspelde waarde (gemiddelde en onzekerheidsband) weergegeven tegen de afstand tot het epicentrum. Voor de PGV is een lineaire in plaats van een logaritmische schaal gebruikt.

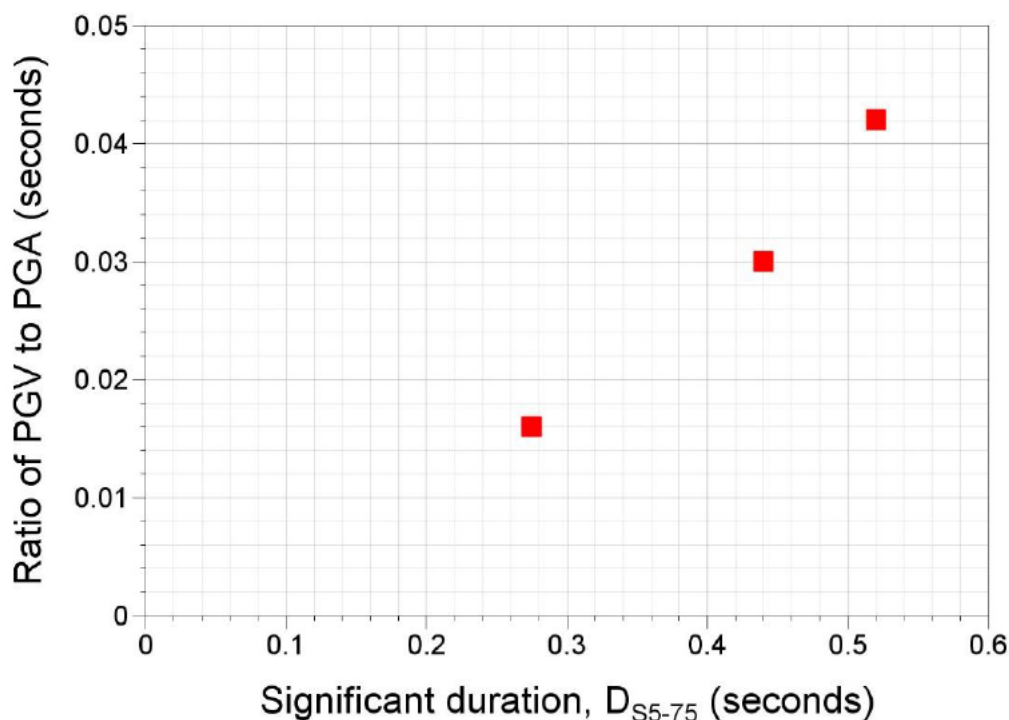
6.4 Duur van de aardbeving

De meest gebruikte maat voor de duur van een aardbeving is gebaseerd op de Arias-intensiteit. Het is de tijd waarin deze intensiteit toeneemt van 5% tot 75% van de totale intensiteit. Deze wordt de significante duur genoemd en aangegeven met D_{s5-75} . Voor de horizontale component (H1) van PGA gemeten door station G140 was deze slechts 0,275 s (Fig. 6.7).



Figuur 6.7 Verloop van de Arias-intensiteit tijdens de Zeerijp (2025) aardbeving.

Dit verklaart waarom terwijl de amplitude van de PGA uitzonderlijk hoog is, en de amplitude van de PGV dicht ligt bij de PGV-amplitude voor eerdere aardbevingen met eenzelfde magnitude. Er is een duidelijke correlatie tussen de duur en de PGV/PGA-ratio (Fig. 6.8).



Figuur 6.8 Ratio van PGV over PGA (s) uitgezet tegen de significante duur voor de Zeerijp (2025), Zeerijp (2018) en Huizinge 2012 aardbevingen (van links naar rechts).

6.5 Site-effects voor station G140

In hoofdstuk 5.5 hebben we gekeken naar de aardlagen tussen de bron van de aardbeving en het maaiveld. Daaruit bleek dat in het gebied van de aardbeving de diepe ondergrond vergelijkbaar is met de andere delen van het Groningen-gasveld.

Echter dit heeft geen betrekking op de ondiepe ondergrond rond station G140. Daarom is ook de ondiepe ondergrond rond dit station bestudeerd en de invloed hiervan op de grondbeweging vergeleken met die voor andere stations. Het is gebruikelijk om de lokale ondiepe ondergrond te beschrijven met een parameter, V_{s30} , de time-gemiddelde S-golf snelheid over de laatste 30 m vanaf het maaiveld. Vergelijking hiervan met die van andere stations laat zien dat de V_{s30} van station G140, het 15^{de} station is in de ranking van laagst naar hogere waarde. Ook als we de plaatsgebonden versterking (site-specific amplification) voor dit station, berekend als onderdeel van het grondbewegingsmodel GMM-V7 gebruikt in de HRA, vergelijken met dat voor andere stations blijkt dat de invloed van de ondiepe ondergrond voor dit station niet opmerkelijk is.

7 Belangrijkste conclusies

Op 14 november 2025 vond een aardbeving plaats bij Zeerijp met een magnitude 3,4. Deze werd gevolgd door twee naschokken met een magnitude 2,1 op 14 november en 1,0 op 19 november. Deze aardbeving volgde na een periode van relatieve rust waar gedurende een periode van drie jaar er geen aardbeving is opgetreden met een magnitude gelijk aan of groter dan 2,3. De seismiciteit na de sluiting van het Groningen-gasveld is het gevolg van de voortdurende drukvereffening in het gasreservoir.

Het epicentrum van de aardbeving was door KNMI bepaald te liggen bij het dorp Zeerijp. In opdracht van NAM is dit gevalideerd door NORSAR. De aardbeving vond plaats op een grote breuk waar dichtbij ook op 8 januari 2018 al een aardbeving met een magnitude 3,4 had plaatsgevonden. Ook de naschok vond plaats op deze breuk.

In dit rapport presenteren we ook een voorlopige analyses van de grondbewegingsregistraties van de deze aardbeving met een magnitude van 3,4 die op 14 november 2025 plaatsvond nabij het dorp Zeerijp. De analyses tonen aan dat de geregistreeerde bewegingen, zowel wat betreft PGA als PGV, consistent zijn met die van eerdere aardbevingen in Groningen. Met name de PGV-waarden komen overeen met de voorspellingen van het empirische model afgeleid van de Groningen-database, hoewel ze inderdaad iets onder het gemiddelde liggen voor een aardbeving van deze magnitude.

De grootste PGA, gemeten op slechts 1,2 km van het epicentrum, is echter veel groter dan alle eerder geregistreeerde pieken. Een punt dat benadrukt moet worden, is dat deze nieuwe maximale PGA gepaard gaat met een extreem korte duur, waardoor de PGV-waarde van dezelfde registratie, ondanks dat het de nieuwe maximale PGV-waarde is die in Groningen is geregistreerd, vrijwel identiek is aan de vorige maximale waarde. De grote toename van de maximale geregistreeerde PGA-amplitude vertaalde zich dus in een zeer kleine toename van de maximale PGV. Deze observatie is belangrijk, aangezien PGV algemeen wordt erkend als een veel betere indicator voor schadepotentieel dan PGA. Bovendien komt de betreffende PGV-waarde volledig overeen met de voorspellingen van de bestaande PGV GMPE en zou daarom niet leiden tot noemenswaardige wijzigingen in de modellen.

De opnames bevestigen zowel dat bewegingen met relatief hoge amplitudes kunnen worden gegenereerd in de buurt van de epicentra van de grotere aardbevingen (zij het met een zeer korte duur) als dat de amplitudes van de grondbewegingen zeer snel afnemen naarmate de afstand tot het epicentrum toeneemt.

8 Verdere onderzoeken

Deze rapportage bevat het wetenschappelijk werk dat in de eerste twee weken na de Zeerijp aardbeving op 14 november 2025 is uitgevoerd. Het geeft een goed beeld van deze aardbeving. Echter binnen twee weken kan geen volledig en uitputtend wetenschappelijk onderzoek naar deze aardbeving worden voltooid. Er zijn na twee weken dus nog wetenschappelijke studies die moeten worden uitgevoerd of afgerond. Hieronder geven we een kort overzicht van deze activiteiten:

- Voortgaande surveillance van de reservoirdruk in met name het noordelijk deel van het Groningen-gasveld. Drukmetingen genomen in 2025 zullen worden beschreven en geanalyseerd in een rapportage voor SodM, die begin 2026 gereed zal zijn.
- In opdracht van NAM, zal NORSAR een Full waveform moment tensor inversion (FW MTI) uitvoeren voor de Zeerijp 2025 aardbeving. Dit is een verdere aanvulling op de snelle operationele analyse van het hypocentrum en het bronmechanisme die al door NORSAR is uitgevoerd en gerapporteerd in appendices A en B van deze rapportage. Verwacht wordt dat deze analyse nog meer zekerheid geeft over de locatie van het epicentrum van de aardbeving en vooral ook onzekerheid in de diepte van de aardbevingsbron zal kunnen verminderen.
- De aardbeving en de naschok vormen mogelijk een goed kind-ouder paar voor een 'empirische Green's functie analyse'. Al eerder is deze methode succesvol gebruikt om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de scheurvorming op de breuk tijdens de aardbeving (Oates et al., 2020 and Oates et al., 2024). Gezien de goede azimuthale spreiding van de seismische monitoringsstations rond het epicentrum van de Zeerijp aardbeving, verwachten we dat ook voor deze aardbeving met deze methode inzichten zullen kunnen worden verworven.

Referenties

1. Atkinson, G. M. (2015). Ground-motion prediction equation for small-to-moderate events at short hypocentral distances, with application to induced-seismicity hazards. *Bulletin of the Seismological Society of America* 105(2A), 981-992.
2. Bommer, J. J., P. J. Stafford, & M. Ntinalexis (2021). Empirical Equations for the Prediction of Peak Ground Velocity due to Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field, 10 October 2021, 35 pp.
3. Kühn, D., Heimann, S., Isken, M. P., Ruigrok, E. and Dost, B. (2020). Probabilistic Moment Tensor Inversion for Hydrocarbon-Induced Seismicity in the Groningen Gas Field, The Netherlands, Part 1: Testing. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2020;; 110 (5): 2095–2111. doi: <https://doi.org/10.1785/0120200099>
4. Lamb, O. D., Lees, J. M., Malin, P. E., & Saarno, T. (2021). Audible acoustics from low-magnitude fluid-induced earthquakes in Finland. *Scientific reports*, 11(1), 19206.
5. Langet, N., Goertz-Allmann, B., Oye, V., Bauer, R. A., Williams-Stroud, S., Dichiarante, S. A. and Greenberg, S.E. (2020). Joint Focal Mechanism Inversion Using Downhole and Surface Monitoring at the Decatur, Illinois, CO2 Injection Site. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2020; 110 (5): 2168–2187. doi: <https://doi.org/10.1785/0120200075>
6. NAM (den Bezemer en van Elk), 2018. Special Report on the Zeerijp Earthquake – 8th January 2018, NAM-rapport januari 2028.
7. NAM (Geurtsen, Landman en Ketelaar), 2020a. Groningen abandonment - Surveillance requirement, NAM-rapport september 2020.
8. NAM, 2020b. Monitoring Strategy Groningenveld, NAM-rapport september 2020.
9. NAM (van Elk), 2024f. Periodieke rapportage seismiteit Groningen gasveld mei 2024, NAM-rapport, juni 2024.
10. NAM (van Elk), 2025da Periodieke rapportage seismiteit Groningen gasveld kalender jaar 2024, NAM-rapport, januari 2025.
11. NAM (van Haaster), 2025b. Melding conform Uitvoeringsregeling beëindiging van de gaswinning uit het Groningenveld 1.3a.3 en 1.3a.4, brief aan SodM-IGM ir. Th. F. Kockelkoren, 15 november 2025, <https://www.sodm.nl/documenten/2025/11/19/melding-nam-na-aardbeving-zeerijp>
12. NAM (van Haaster), 2025c. Melding conform Uitvoeringsregeling beëindiging van de gaswinning uit het Groningenveld 1.3a.3 en 1.3a.4, brief aan minister van Klimaat en Groene Groei drs. S. Th. M. Hermans, 15 november 2025.
13. NAM (Landman), 2025d. Evaluatie Monitoring Strategie Groningenveld, 2025, NAM-rapport, februari 2025.
14. NAM (van Elk), 2025e. Periodieke rapportage seismiteit Groningen gasveld eerste helft kalender jaar 2025, juli 2025.
15. NOS, 2025. Aardbeving met kracht van 3,4 in Groningen, een van de zwaarste ooit, NOS Webpagina Editie: 14 november 2025, <https://nos.nl/artikel/2590385-aardbeving-met-kracht-van-3-4-in-groningen-een-van-de-zwaarste-ooit>
16. NRC (Felix Voogt), 2025. Wetenschap verrast: ‘Geen enkel model had zo’n grote aardbeving voorspeld’, NRC Editie: 14 november 2025.
17. Oates, S., Tomic, J., Zurek, B., Piesold, T., Van Dedem, E., 2020, Empirical Green’s Function analysis of some induced earthquake pairs from the Groningen gas field, NAM report august 2020, <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/62fc2a6b-2671-4558-901e-e603886480a2>
18. Oates, S., Schmitz, J., Zurek, B., Piesold, T., & van Dedem, E. (2024). Empirical Green’s function analysis of some induced earthquake pairs from the Groningen gas field. *Journal of Seismology*, 28(3), 579-613.
19. RTVNoord, 2025. Video: Zo zag de aardbeving van afgelopen nacht er uit, RTVNoord webpagina Editie: 14 november 2025, <https://www.rtvnoord.nl/politiek/RX-368/video-zo-zag-de-aardbeving-van-afgelopen-nacht-er-uit>
20. Staatscourant, 2025. Regeling van de Minister van Klimaat en Groene Groei van 23 september 2025, nr. WJZ/101254315, houdende wijziging van de Mijnbouwregeling en de Uitvoeringsregeling Gaswet in verband met de beëindiging van de gaswinning uit het Groningenveld, minister van KGG, 30 september 2025, <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2025-32913.pdf>.

Appendix A – Vaststellen van het epicentrum van de aardbeving door NORSAR (Volker Oye en Nadege Langet)



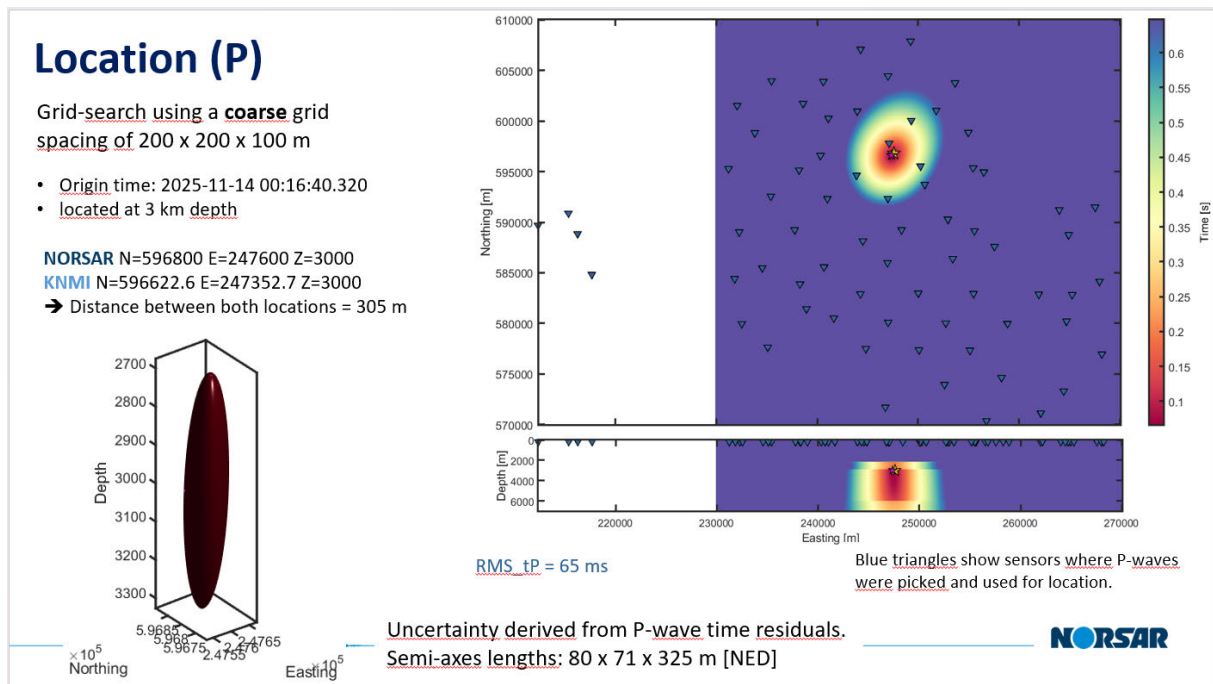
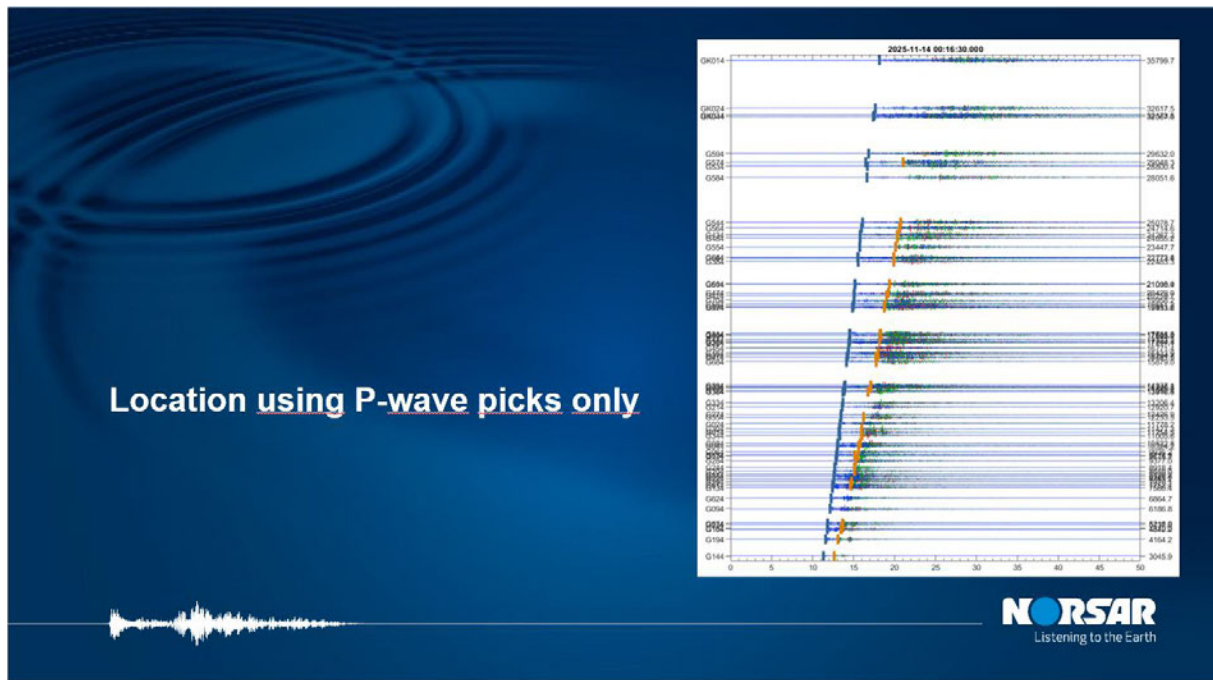
Executive summary

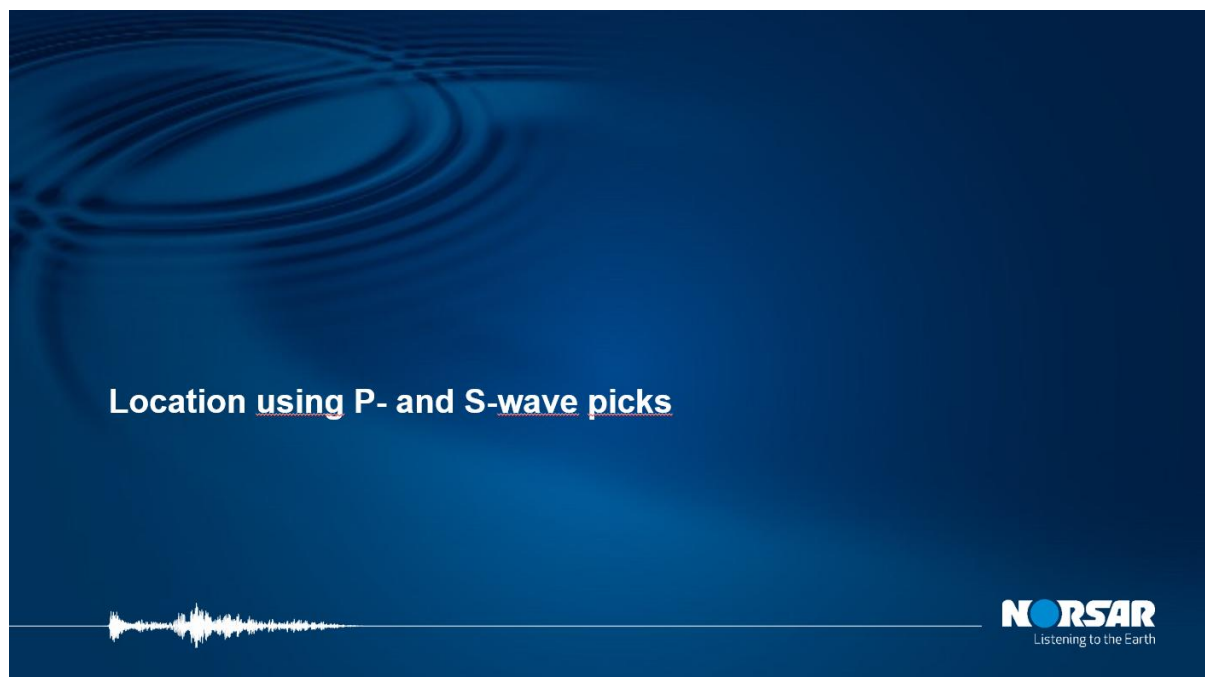
Location of the Zeerijp earthquake from 2025-11-14 00:16:40.

We conduct an independent relocation of the earthquake based on the original waveform data that are shared through the FDSN webservices from KNMI. We use the Northern Netherlands 1D velocity model and a modified 1D velocity model that was used for previous studies in the Groningen field. We pick P- and S-wave phases and apply location estimates using only P, combination of P and S wave picks to derive epicentral and hypocentre locations. We compute a full grid search showing at the same time the time residuals for the location.

- Location using only P-wave picks and both P- and S-wave picks are in full agreement with KNMI published location, at a depth of 3 km. We did not fix the event depth, the best location is actually at 3 km depth.
- In Appendix, we also briefly estimated focal mechanism estimated from P-wave first motion polarities only, suggesting normal faulting in N-S direction, compatible with known predominant stress field.







Location (P+S)

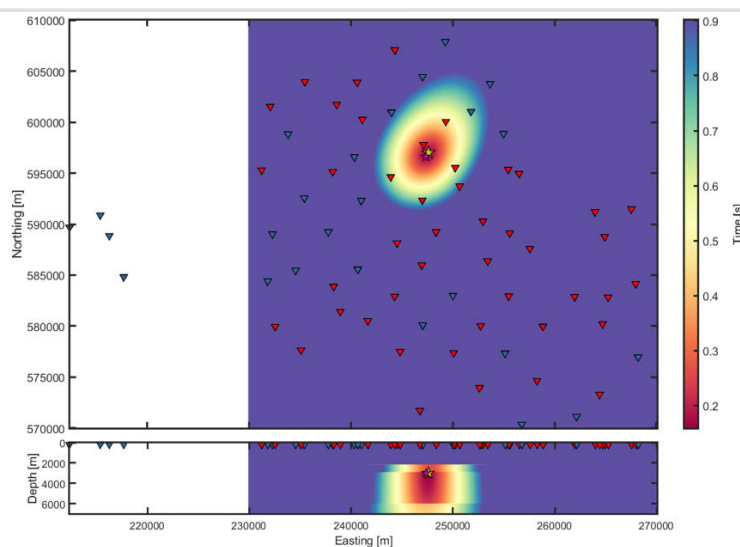
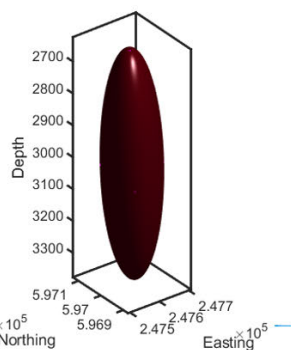
Grid-search using a **coarse** grid spacing of 200 x 200 x 100 m

- Origin time: 2025-11-14 00:16:40.320

NORSAR N=597000 E=247600 Z=3000

KNMI N=596622.6 E=247352.7 Z=3000

→ Distance between both locations = 451 m



RMS tP = 54 ms

RMS tS = 204 ms

Red triangles show sensors where P- and S-waves were picked and used, show blue triangles P-waves only.

Uncertainty derived from P- and S-wave time residuals.

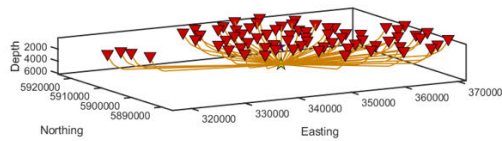
Semi-axes lengths: 124 x 107 x 377 m [NED]

NORSAR

Appendix B – Vaststellen van het bronmechanisme van de aardbeving door NORSAR (Volker Oye en Nadege Langet)



Source mechanism



Take-off angles computed from our location using 1D model

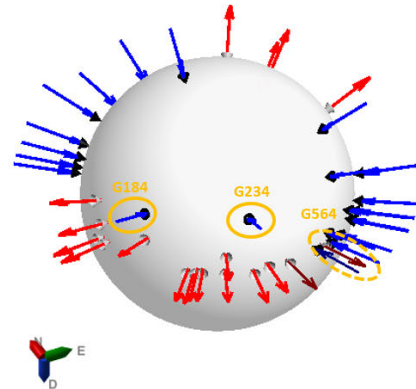
Fitting of best mechanism (next slides):

- Grid-search over strike, dip and rake fault angles (5° grid spacing).
- Minimisation of the number of polarity misfits.

More details in Langet et al., BSSA, 2020



Manually picked P-wave polarities (unfiltered data)

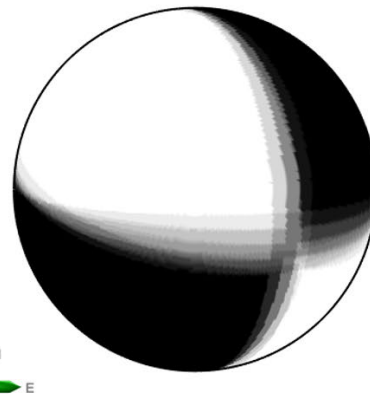
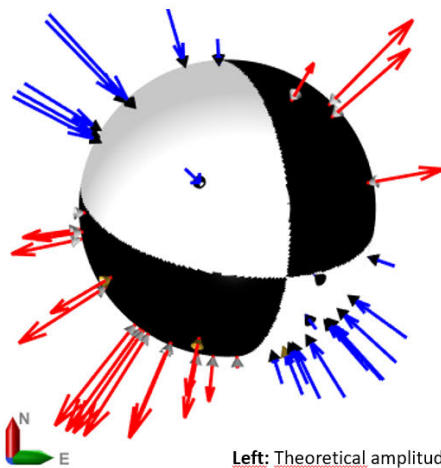


- Some of the picked polarities do not fit with a reasonable focal mechanism solution (surrounded in orange):
- Re-checking the waveforms, they show clear polarity and no ambiguity of their sign.
- 'Brownish' arrows show observations that are assigned with a low quality polarity pick.

Source mechanism

Strike= 175° , Dip= 65° , Rake= -30° (normal)

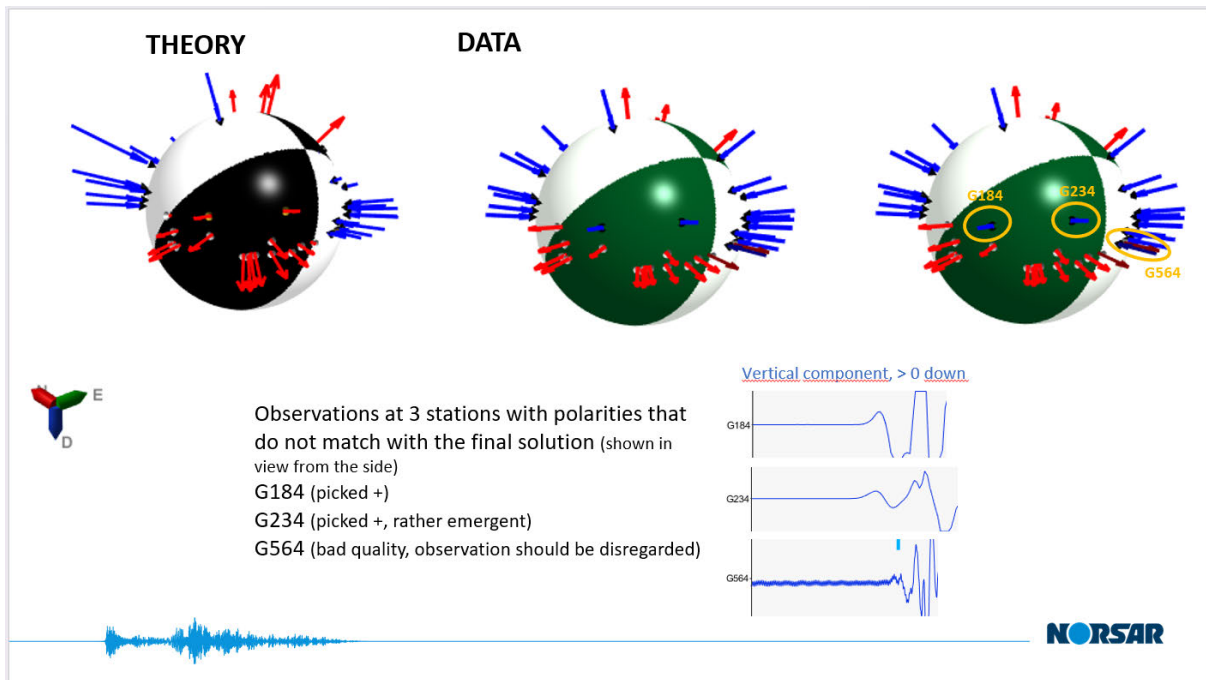
(upper hemisphere)



Left: Theoretical amplitude and polarity corresponding to the best fitting solution
Right: Several solutions that fit the data in a similar quality (no of polarity flips).



NORSAR



References

- Daniela Kühn, Sebastian Heimann, Marius P. Isken, Elmer Ruigrok, Bernard Dost; Probabilistic Moment Tensor Inversion for Hydrocarbon-Induced Seismicity in the Groningen Gas Field, The Netherlands, Part 1: Testing. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2020;; 110 (5): 2095–2111. doi: <https://doi.org/10.1785/0120200099>
- Nadège Langet, Bettina Goertz-Allmann, Volker Oye, Robert A. Bauer, Sherilyn Williams-Stroud, Anna Maria Dichiarante, Sallie E. Greenberg; Joint Focal Mechanism Inversion Using Downhole and Surface Monitoring at the Decatur, Illinois, CO2 Injection Site. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2020;; 110 (5): 2168–2187. doi: <https://doi.org/10.1785/0120200075>

Appendix C – Analyse van de metingen door het seismisch monitoringsnetwerk door Michail Ntinalexis en Julian Bommer

A Preliminary Analysis of the Surface Ground-Motion Recording of the Zeerijp M_L 3.4 Earthquake of 14 November 2025

26 November 2025

Julian J Bommer, Michail Ntinalexis

Introduction

On Friday 14 November 2025, at 00:16 UTC (1:16 am local time), an earthquake of local magnitude (M_L) of 3.4 occurred near the village of Zeerijp, in the northern part of the Groningen field (Figure 1). The WGS84 epicentral coordinates provided by the online platform of the KNMI (1993) are N53.35°, E6.78°, which corresponds to 247352, 596622 in the RD coordinate system (Figure 1). The focal depth assigned by KNMI is 3 km, the average depth of the gas-bearing sandstone where the Groningen earthquakes occur. A second event, of magnitude M_L 2.1, occurred a few hours later at 05:39 UTC a few hundred metres to the south-east. The epicentre of this aftershock is also shown in Figure 1. This current report, however, focuses exclusively on the recordings from the M_L 3.4 main shock.

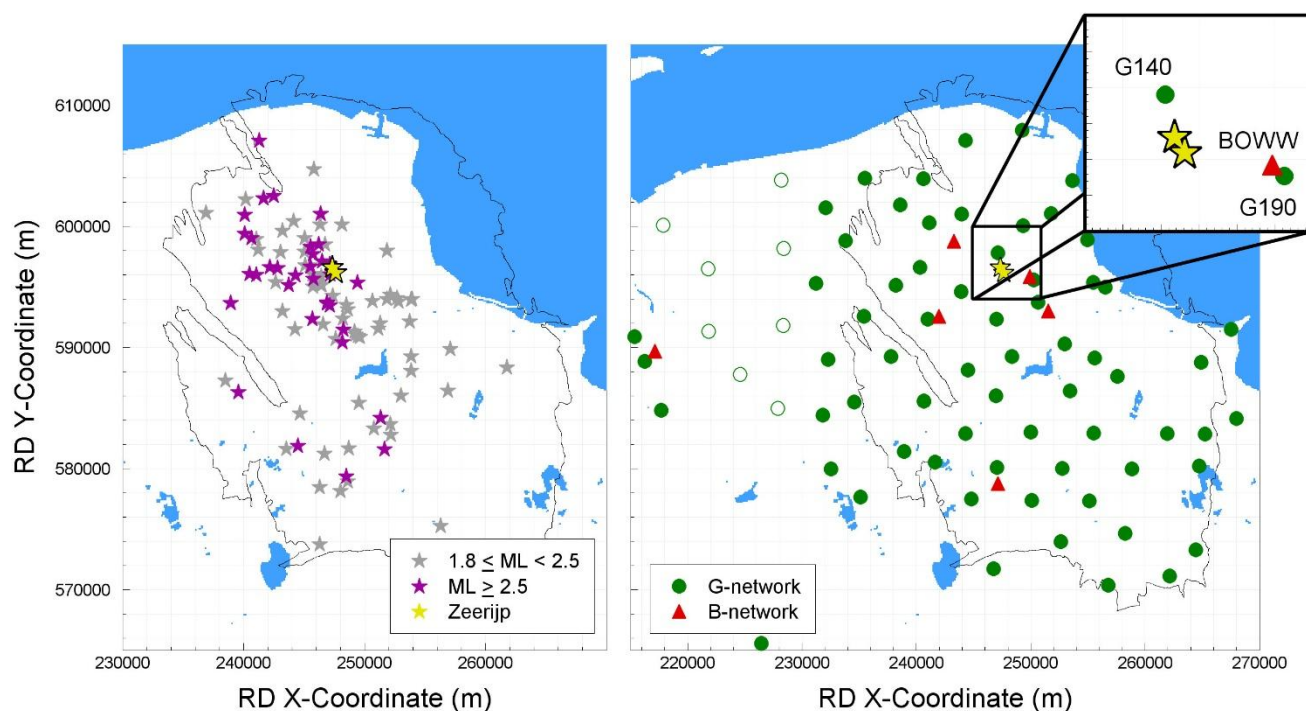


Figure 1. *Left:* Epicentre of Zeerijp earthquake (yellow star) together with epicentres of previous earthquakes of $M_L \geq 2.5$ (purple stars) and of M_L 1.8-2.4 (grey stars) from the database of Ntinalexis *et al.* (2023); *right:* the locations of the KNMI stations in the Groningen region that were operational during the earthquake and produced usable records of the ground shaking.

This earthquake occurred following a period of very subdued seismic activity after the suspension of gas production on 1st October 2023, which was preceded by a period of greatly reduced extraction rates. This is the first earthquake to exceed magnitude M_L 3 since October 2022, during which time the largest event has only reached M_L 2.2. This is now the third earthquake of M_L 3.4 to have occurred in the Groningen field, the previous events being the Zeerijp earthquake of 8 January 2018 and the Westervijtwerd earthquake of 22 May 2019. The epicentre of the 2018 Zeerijp earthquake was located 1.93 km to the north-west of the epicentre of the November 2025 earthquake. The only earthquakes to have occurred with larger magnitude are the M_L 3.5 Westermenden earthquake on 8 August 2006 and the M_L 3.6 Huizinge earthquake of 16 August 2012.

Ground-Motion Recordings

A total of 90 three-component recordings from the surface stations of the KNMI B- and G-networks were downloaded for this preliminary assessment of the motions. The records were processed as described by Edwards & Ntinalexis (2021). Figure 2 shows the 81 usable recordings in the magnitude-distance occupied by the database used to derive the empirical PGV GMPEs (Ntinalexis *et al.*, 2023). A notable observation is that this earthquake has provided the most distant usable recordings of ground motion to date (due to more recently installed instruments to the west), extending the distance range covered by ~5km, which may prove useful for constraining the long-distance attenuation of ground motions in the Groningen field, although the lack of measured site characteristics at these distant stations may be a limitation.

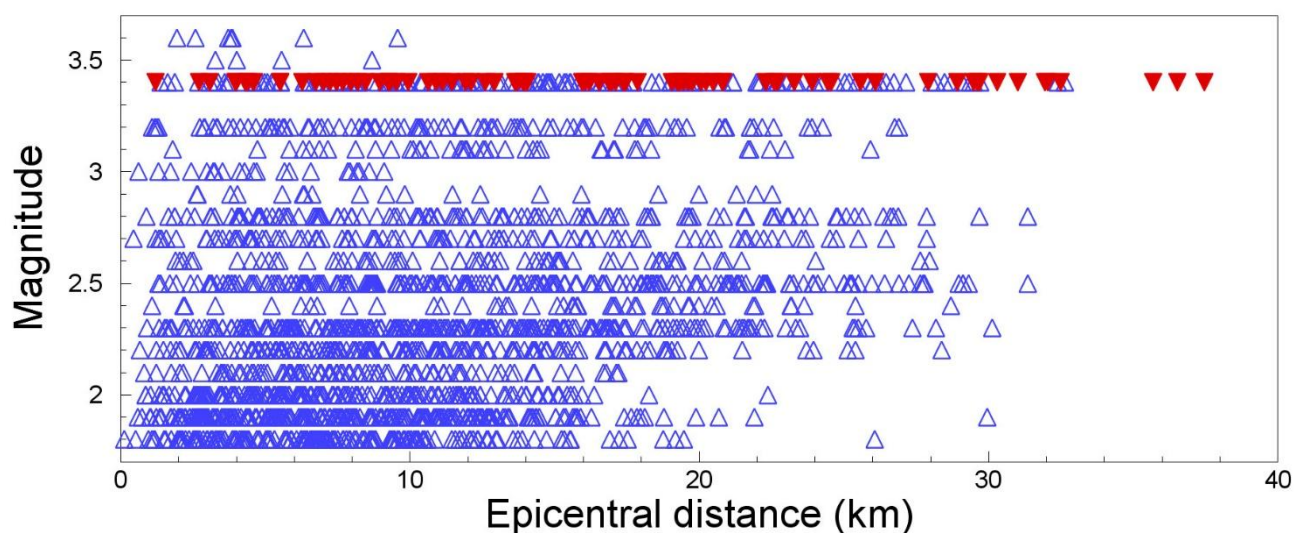


Figure 2. Magnitude-distance distribution of the Groningen strong-motion database including the recordings of the 14 November 2025 Zeerijp earthquake (*red triangles*).

Figures 3 and 4 show the recorded horizontal values of peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) against hypocentral distance superimposed on the existing database of Groningen ground-motion recordings. In both cases, the peak values are calculated using three different definitions of the horizontal component of motion: the geometric mean of the two horizontal components (GM), the larger of the two horizontal components, and the maximum rotated component (MaxRot).

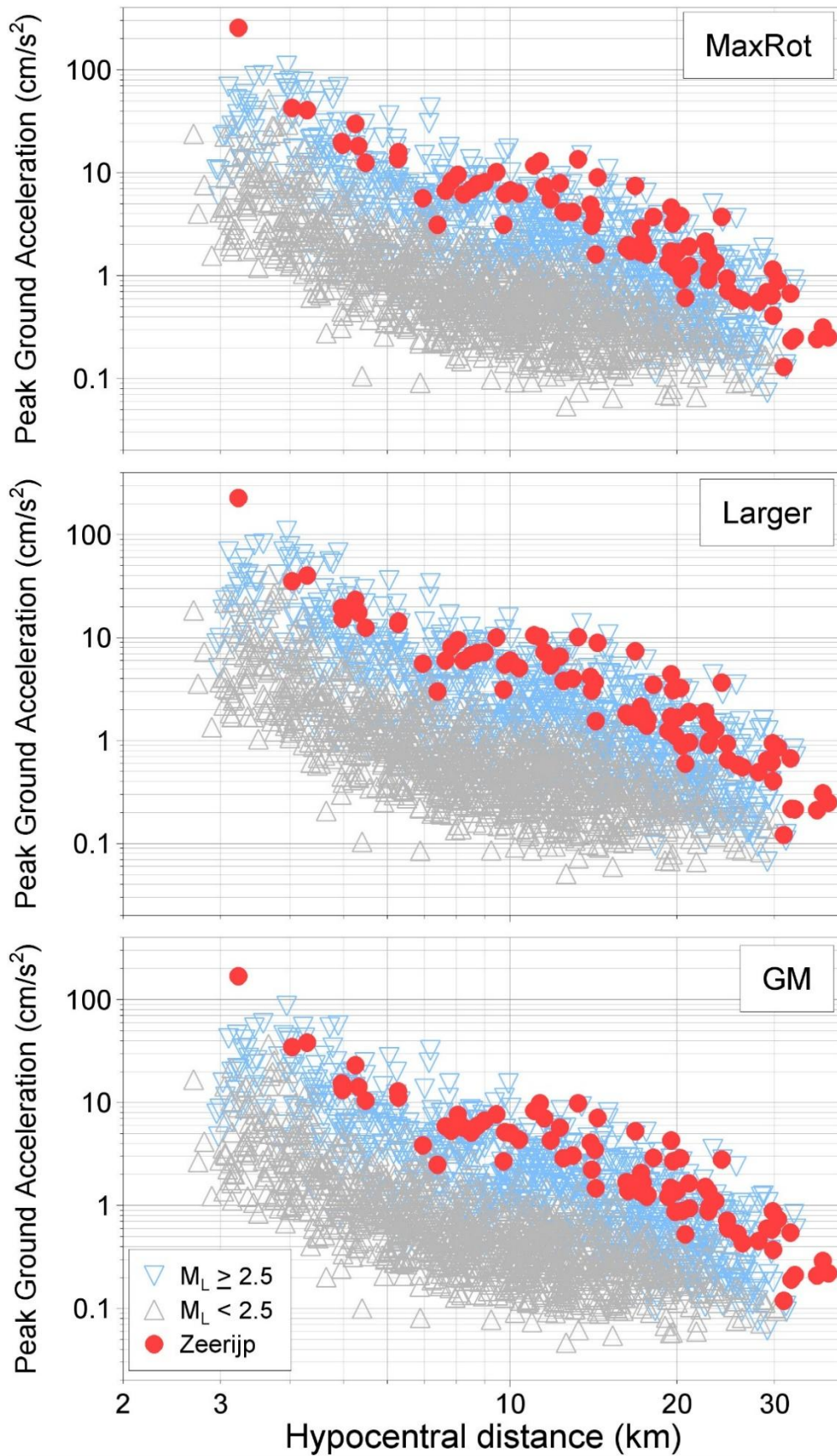


Figure 3. Horizontal components of PGA recorded during the 14 November 2025 Zeerijp earthquake and previous earthquakes plotted against hypocentral distance.

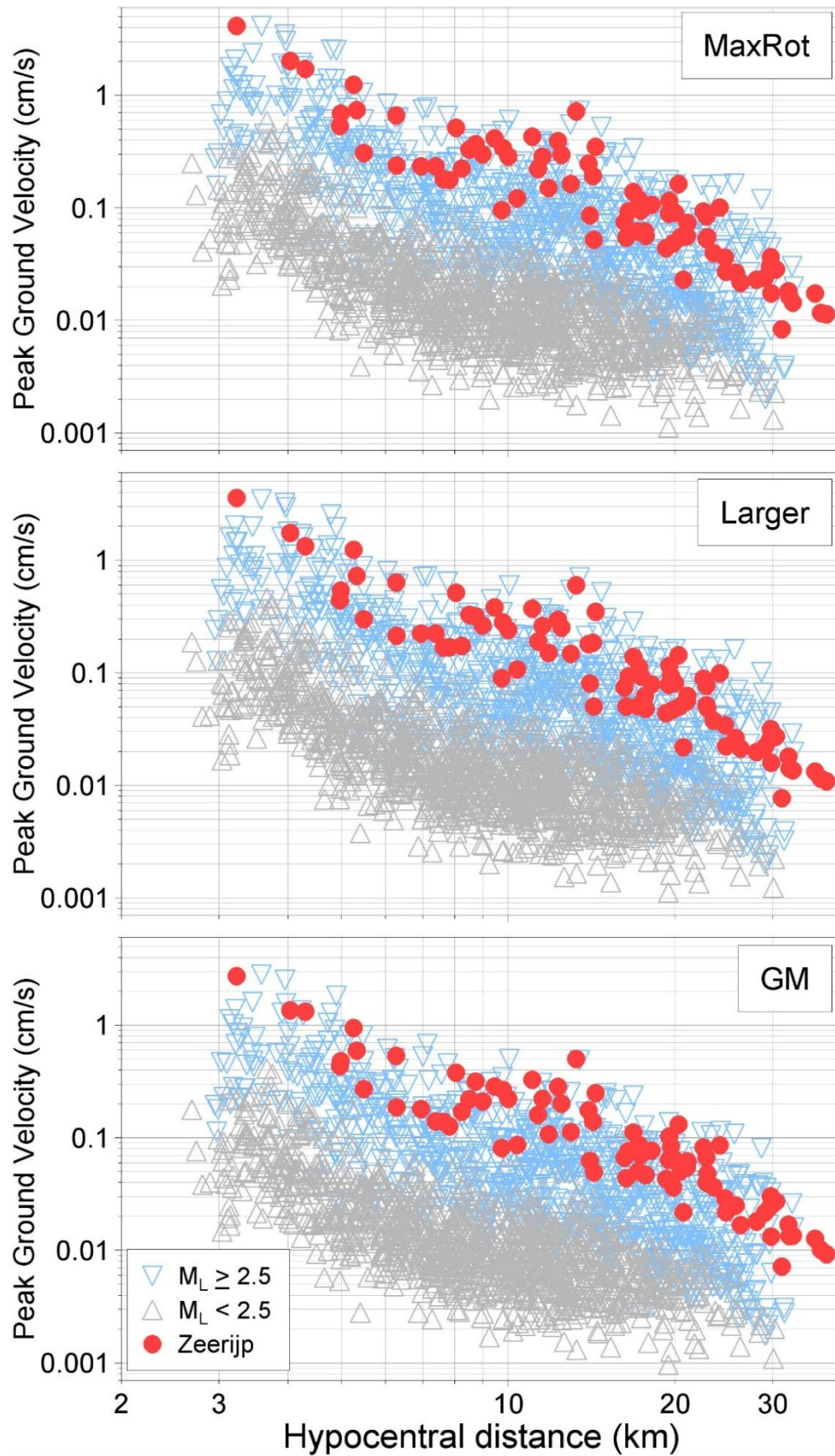


Figure 4. Horizontal components of PGV recorded during the 14 November 2025 Zeerijp earthquake and previous earthquakes plotted against hypocentral distance.

Figures 3 and 4 show that the recordings of the most recent earthquake are broadly consistent with those from previous events in the field. However, a very notable feature of Figure 3 is that this latest earthquake has generated the highest recorded value of PGA to date. Although far less pronounced, the same recording has also yielded the highest PGV that has been recorded in Groningen. Table 1 compares these peak values with the highest recorded values of PGA and PGV prior to the occurrence of this latest earthquake. Whereas the previous largest PGA and PGV amplitudes corresponded to different records, both the new maxima correspond to the H1 (NS) component of the G140 recording of the recent M_L 3.4 earthquake. However, while the largest PGA recorded in the field has more than doubled with the most recent earthquake, the largest PGV has only increased by 3.6%.

Table 1. PGA and PGV values of the three highest amplitude records from Groningen.

Earthquake		M_L	Station	Distance (km)		PGA		PGV (mm/s)
Name	Date			R_{epi}	R_{hyp}	(cm/s ²)	(g)	
Huizinge	16-08-2012	3.6	MID1	1.95	3.58	81.5	0.083	34.62
Zeerijp	08-01-2018	3.4	BGAR	2.68	3.95	108.7	0.111	32.12
Zeerijp	14-11-2025	3.4	G140	1.20	3.23	227.5	0.232	35.85

The G140 record was obtained at 1.2 km from the epicentre, which is closer to the earthquake source than either of the two previous maxima. Figures 5 and 6 show the as-recorded horizontal component peaks of the recordings from the 2025 Zeerijp earthquake. Two important observations can be made immediately, the first being the clear polarisation of the G140 recording, which is a feature that has been frequently seen in the Groningen ground-motion recordings obtained at short distances (Stafford *et al.*, 2019). The second observation is how much lower are the recorded amplitudes at the other stations that are slightly more distant from the epicentre than G140 (the grid size in these maps is 4 x 4 km).

The horizontal PGA recorded at the G140 station will clearly be a focus of a great deal of attention from parties and individuals with an interest in the induced seismicity and associated seismic risk in Groningen. For this reason, this report focuses in particular on the characteristics of the G140 recording. However, before discussing the G140 record in more detail, some analyses are presented that have the objective of ascertaining whether the new maxima for PGA and PGV reflect only the characteristics of this particular record or whether the motions from the most recent earthquake are consistently higher than those from previous earthquakes (although Figures 5 and 6

would already suggest that the G140 is an outlier given the significantly lower amplitudes at the other stations located within 6 km of the epicentre). These exploratory analyses include both direct comparisons with recordings from previous earthquakes of similar magnitude and calculation of residuals with respect to the amplitudes predicted by ground-motion prediction equations (GMPEs). Following these analyses, we return to a more detailed examination of the characteristics of the G140 recording. The report then closes with the conclusions from this preliminary assessment.

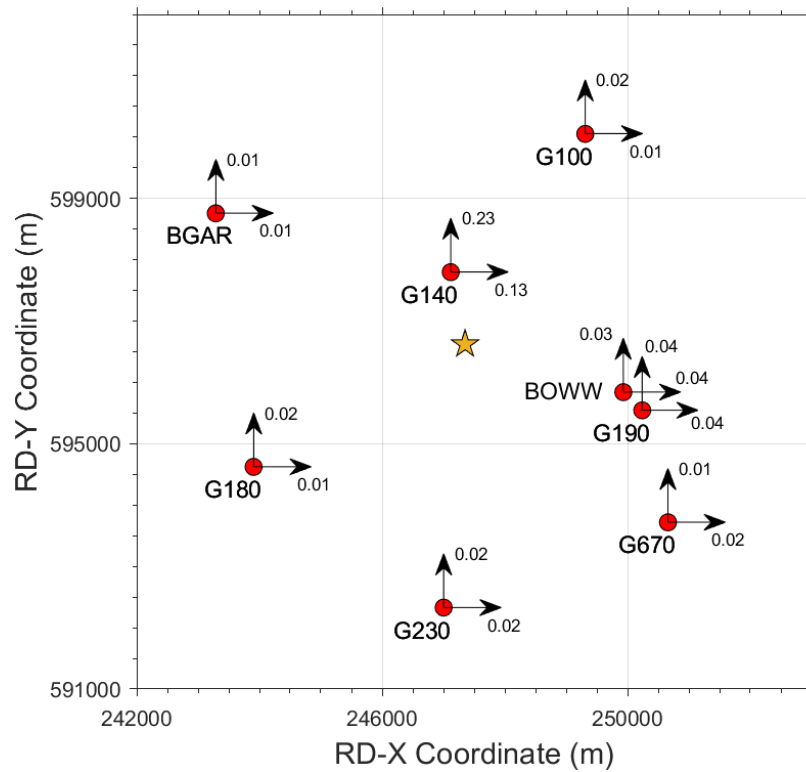


Figure 5. Horizontal components of PGA (g) recorded close to the epicentre of the 2025 Zeerijp earthquake.

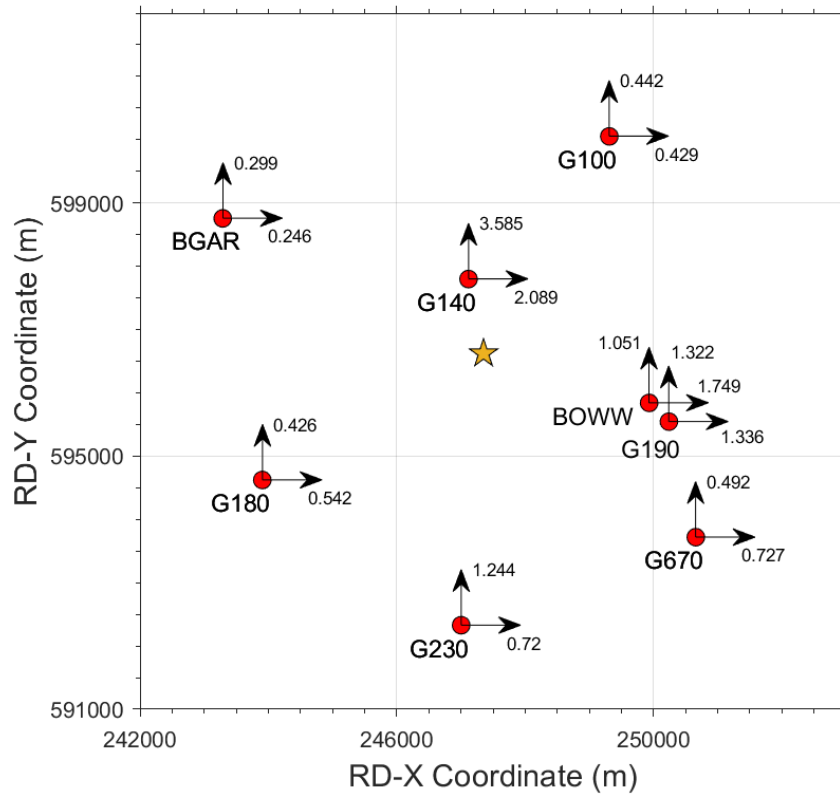


Figure 6. Horizontal components of PGV (cm/s) recorded close to the epicentre of the 2025 Zeerijp earthquake.

Comparison with Previously Recorded PGA and PGV Values

Figures 7 and 8 show the recorded values of PGA and PGV, respectively, from earthquakes in the Groningen field as a function of the earthquake magnitude, with the peak motions from the latest earthquake superimposed using a different symbol.

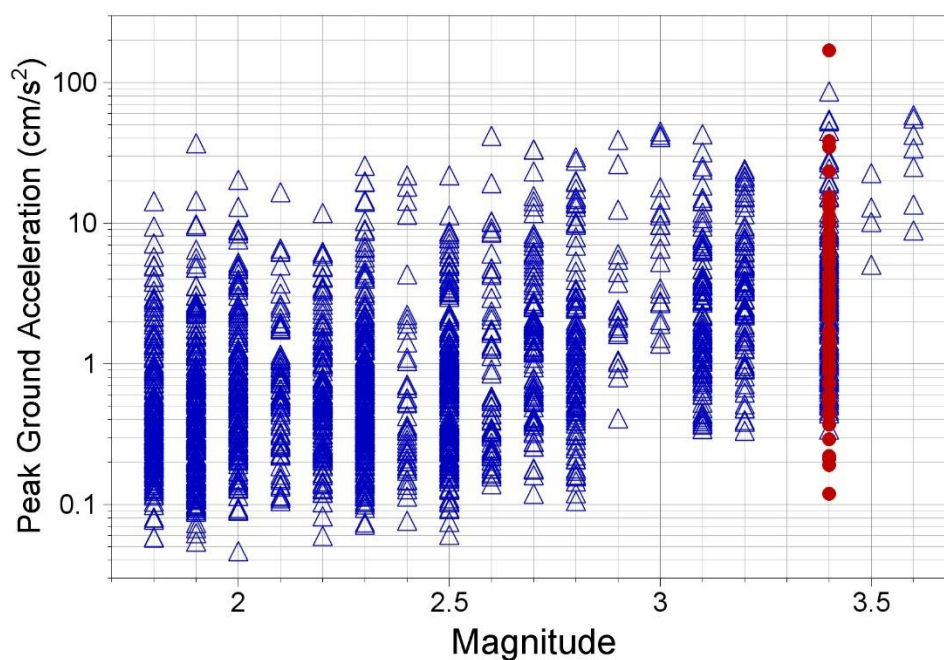


Figure 7. Geometric mean horizontal PGA values against magnitude; the records from the 2025 Zeerijp earthquake are shown in red.

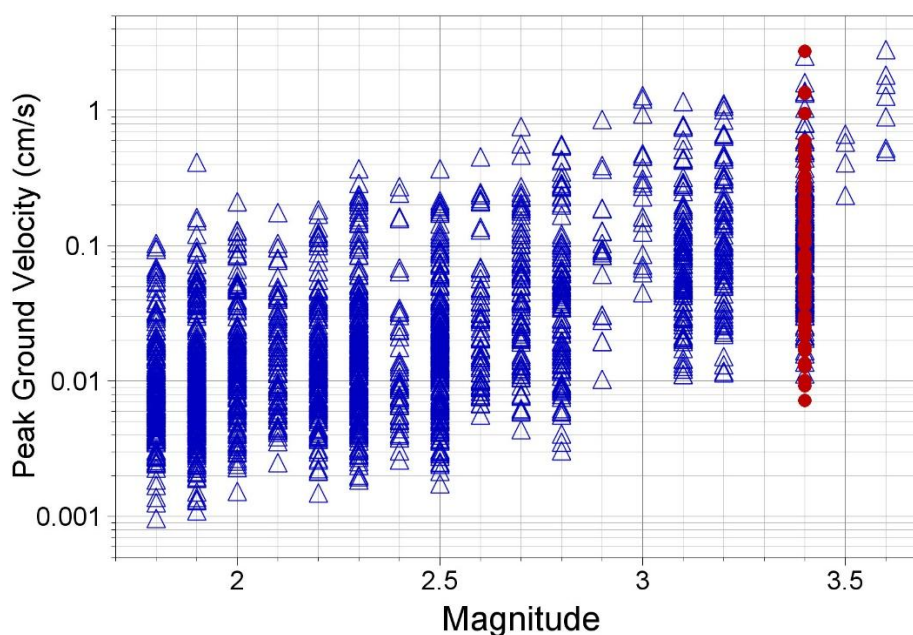


Figure 8. Geometric mean horizontal PGV values against magnitude; the records from the 2025 Zeerijp earthquake are shown in red.

Figures 7 and 8 show that, in general, the peak recorded values are consistent with those from previous events of the same magnitude, apart from the much higher PGA value recorded at the G140 station. The lower amplitudes than those recorded in the previous M_L 3.4 earthquakes are a consequence of the more distant recordings (Figure 2). The comparisons with recordings from the previous M_L 3.4 earthquakes are

presented in another format in Figure 9, which suggests that the ground motions generated by this earthquake are very consistent with those from the earlier events of the same magnitude. While the largest PGA value does stand out, the PGV values at short distances suggest that this is simply an improved sampling of the near-source motions: the largest PGV matches 84-percentile prediction from the current empirical GMPEs (Bommer *et al.*, 2021).

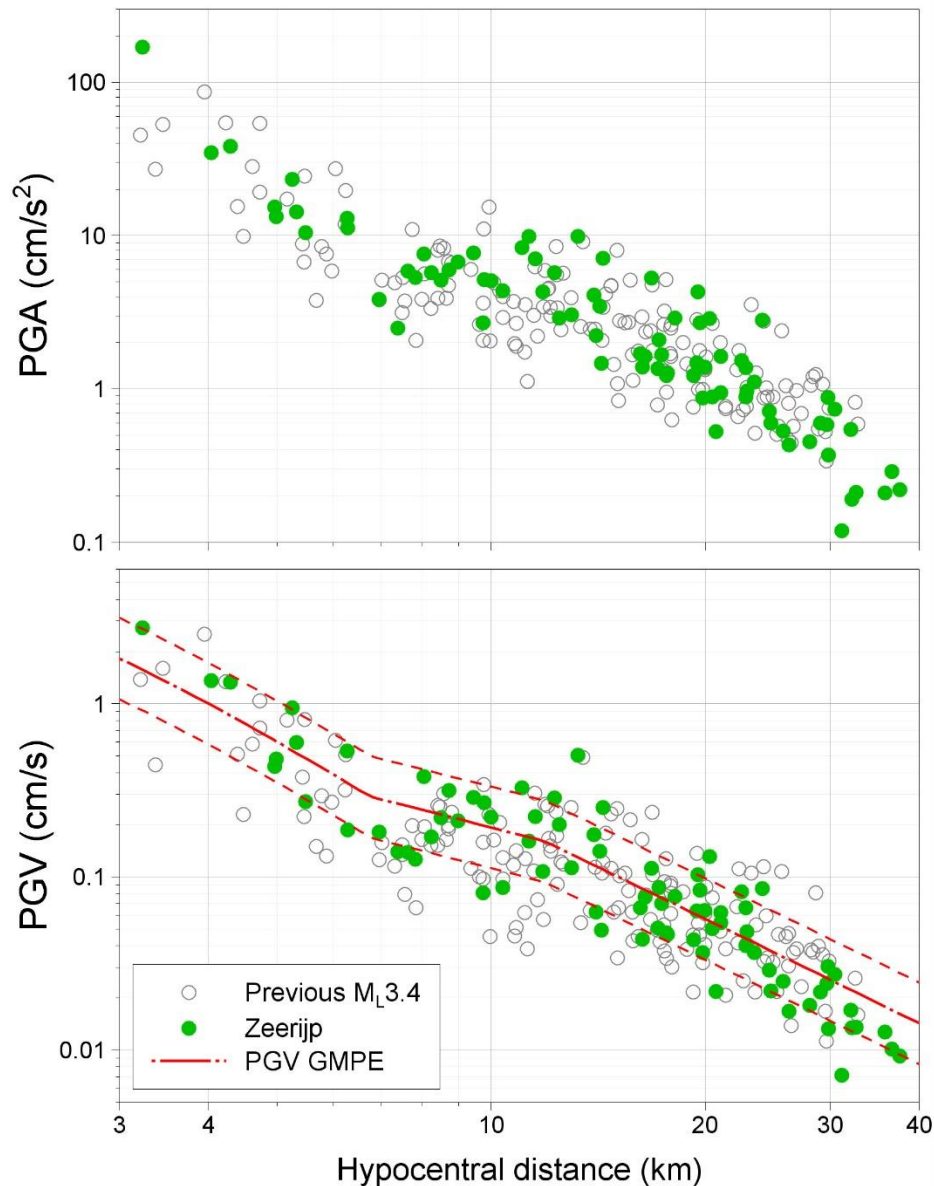


Figure 9. Geometric mean PGA (*upper*) and PGV (*lower*) values from earthquakes of M_L 3.4 in Groningen, the solid symbols corresponding to the most recent event. In the lower plot, the solid red line is the median predictions (for $V_{S30} = 200$ m/s) and the dashed lines the 16- and 84-percentile predictions.

Residual analysis provides the most rigorous option for ascertaining if the motions from the new earthquake differ in any systematic manner from the motions recorded during

previous Groningen earthquakes. In the absence of a current empirical GMPE for PGA in Groningen, residuals of PGA are calculated relative to the GMPE of Atkinson (2015), which was developed using recordings from tectonic earthquakes in California with the intention of being applicable to induced seismicity. The GMPE is valid for moment magnitudes M from 3 to 6, so residuals are only calculated using recordings from earthquakes of $M_L \geq 3.0$. Since the GMPE includes the time-averaged shear-wave velocity of the uppermost 30 metres, V_{S30} , as an explanatory variable, only the 66 recordings of the new earthquake obtained at stations with reliable V_{S30} values – either measured or determined from the field-wide velocity model (Kruiver *et al.*, 2017) – are used. The residuals are calculated using the less conservative alt- h version of the Atkinson (2015) GMPE. The results are shown in Figure 10.

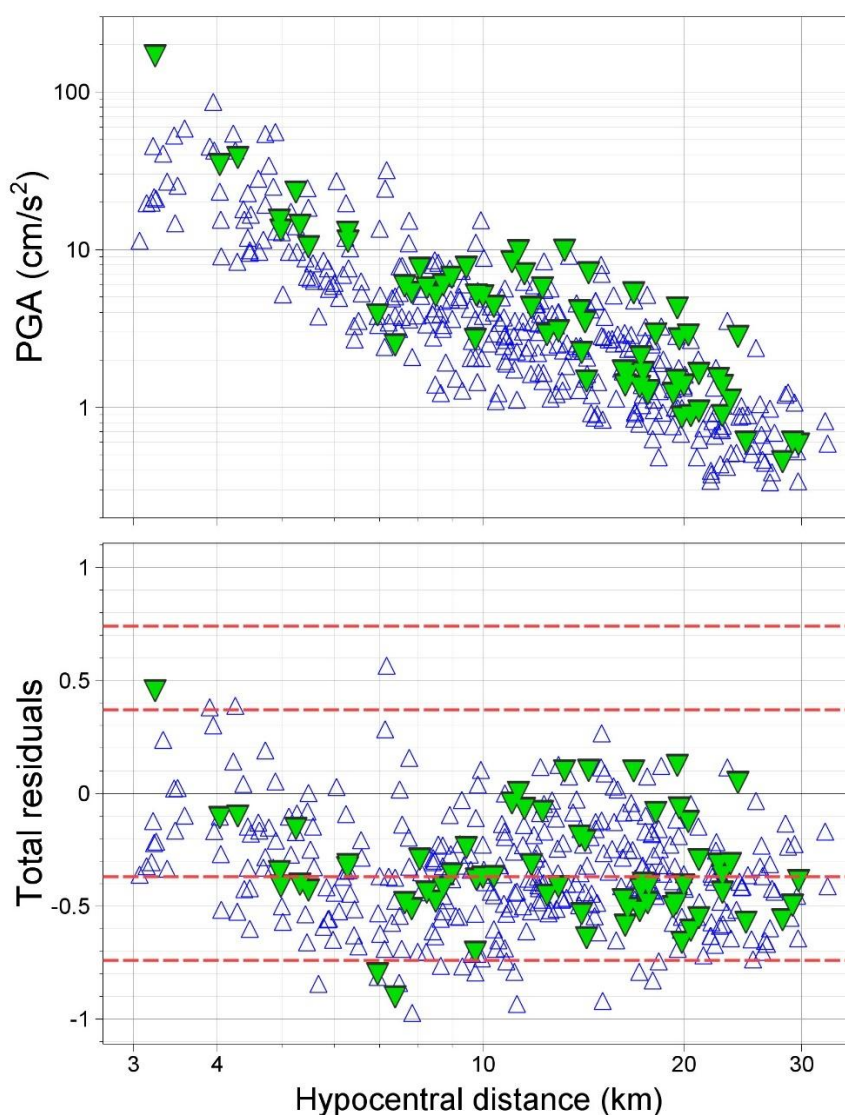


Figure 10. Geometric mean PGA (*upper*) from earthquakes of $M_L \geq 3$ and residuals ($\log_{10}$ units) with respect to the Atkinson (2015) alt- h GMPE (*lower*) plotted against distance, with the 2025 Zeerijp records shown as green triangles. The red lines in the lower frame indicate the $\pm 1\sigma$ and $\pm 2\sigma$ levels from the Atkinson (2015) equation.

The average residual of the data from previous earthquakes is -0.344, which implies that the Groningen PGA values are, on average, equal to 0.452 times those predicted by the Atkinson (2015) GMPE. For the new earthquake, the average residual is fractionally smaller, indicating a ratio of 0.458 between the recordings and the Atkinson (2015) predictions. For the combined dataset, the ratio is 0.453. These numbers confirm that notwithstanding the large PGA recorded at G140, the motions are consistent with those from previous earthquakes in Groningen – and significantly lower than the values predicted by this GMPE derived from Californian data. Trendlines fitted to the residuals are almost identical whether the full dataset is used or only the previous events (Figure 11).

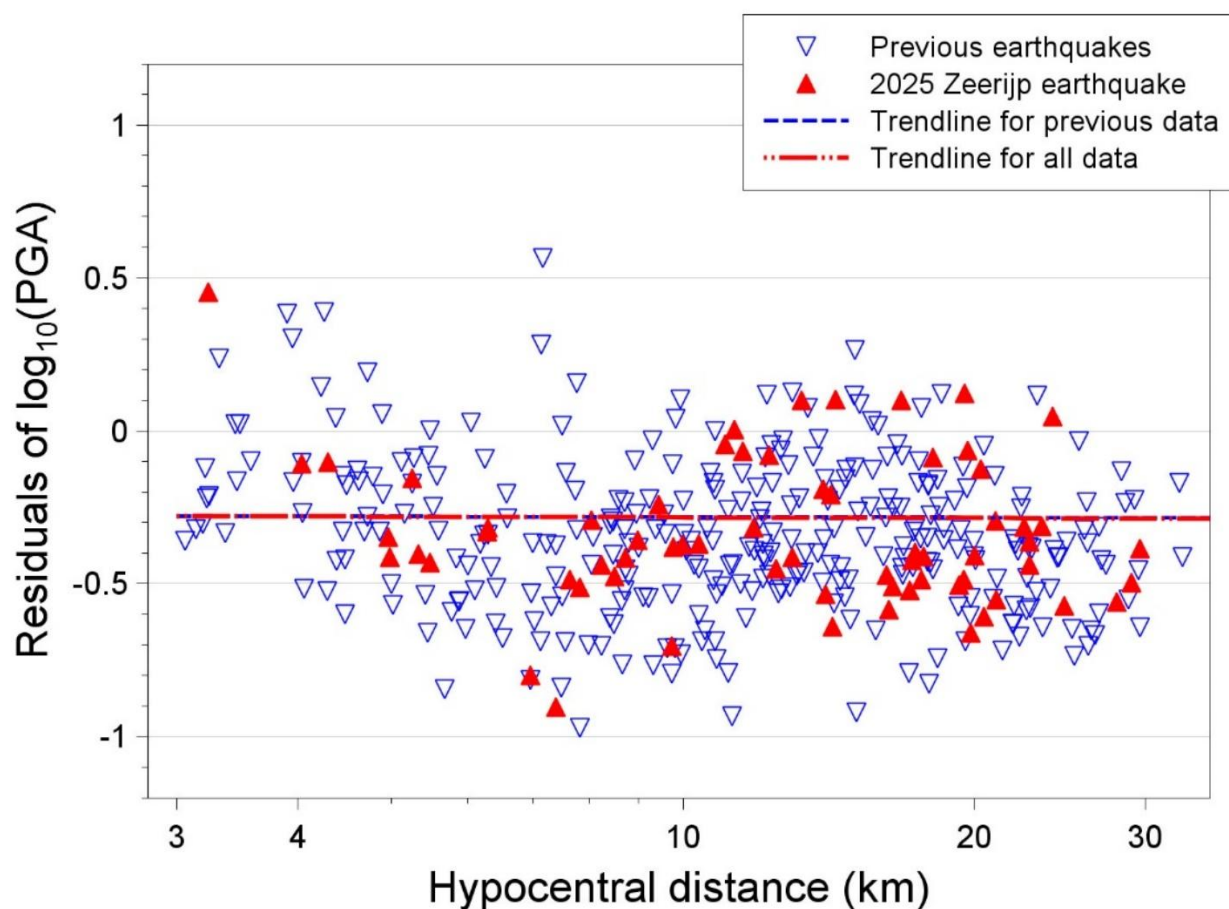


Figure 11. The same residuals as shown in the lower frame of Figure 10, showing that the trendline in the residuals, with an extremely weak negative scaling with distance, is unchanged by the addition of the recordings from the 2025 earthquake.

For PGV, use can be made of the most recent Groningen-specific GMPEs (Bommer *et al.*, 2021; Bommer *et al.*, 2022). These empirical models allow the residuals to be decomposed into between-earthquake and within-earthquake components, but this requires knowledge of the station-terms (i.e., consistent offsets of amplitudes at each station) for which reason only 60 records could be used in these calculations, these

coming from the recording stations with measured V_{S30} . Figure 12 shows the total residuals of PGV, for all three component definitions, plotted against distance. Note that consistent with the formulation of the GMPE, these residuals are in natural logarithms (which means they need to be divided by 2.3 to be compared with those shown above for PGA). The residuals from the recordings of the new event seem entirely consistent with those from previous earthquakes; as previously noted, the largest PGV value is close to the 84-percentile prediction from the GMPE.

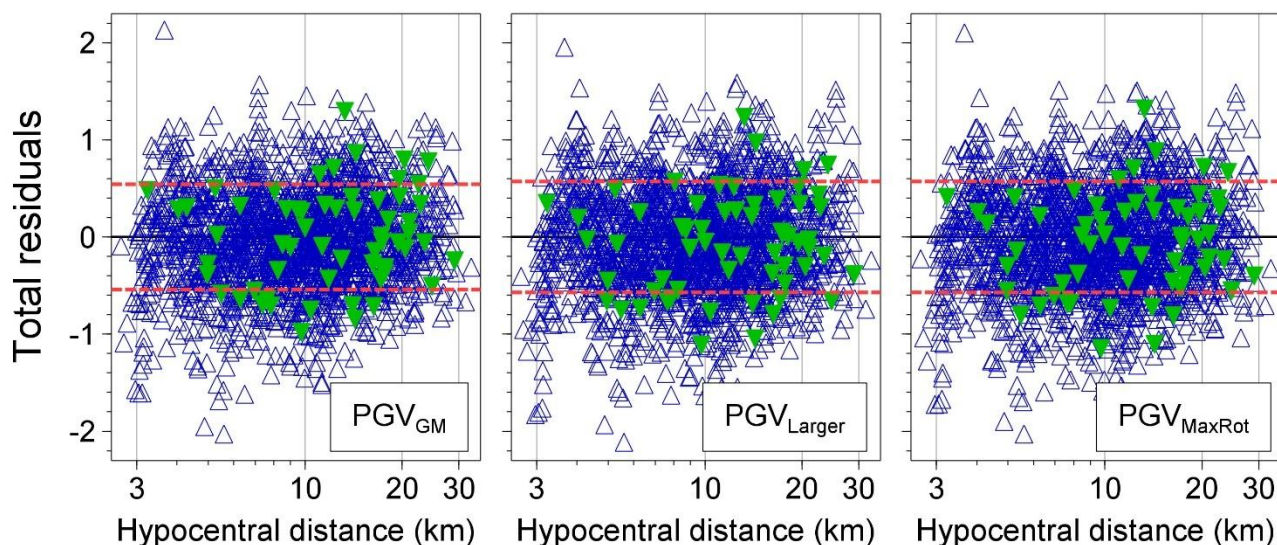


Figure 12. Total residuals of PGV (In units) plotted against hypocentral distance with respect to the current empirical GMPEs for Groningen. The recordings from the recent Zeerijp earthquakes are shown by green triangles and the red dashed lines correspond to $\pm\sigma$.

Figure 13 shows the event-terms, which represent the average offset of the recordings from each earthquake with respect to the median predictions from the GMPE for events of that magnitude. As can be seen, the event term for the latest earthquake is negative, which means that on average the PGV values recorded in this event are somewhat lower than the average level for events of the same magnitude as predicted by the GMPEs. Since there are a large number of recordings from this new earthquake, the event term can be considered to be robustly determined, hence confidence can be placed in the conclusion that in terms of PGV, the motions from this event were below average overall.

Finally, Figure 14 shows the within-event residuals, which show no trends to suggest any deviation from the spatial distribution of PGV levels predicted by the models. The G140 record does not stand out as being outside the expectations embedded in the model. The GMPEs do predict a rapid increase in ground-motion amplitudes in close proximity to the earthquake epicentre (or conversely, a very rapid drop-off of amplitudes with increasing distance from the epicentre), which is not easily appreciated

when the predicted amplitudes over a range of distances are plotted in log-space, as in the lower plot of Figure 9. Figure 15 makes the dependence on PGV on distance clearer by plotting both the recorded values and the predicted curves on linear axes.

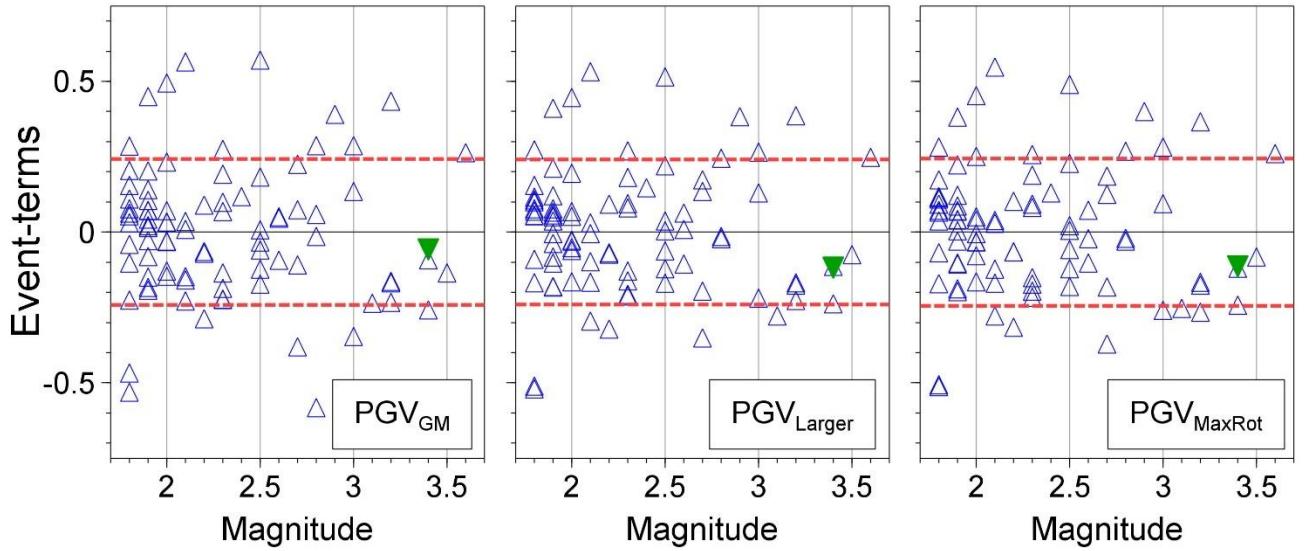


Figure 13. Event terms for PGV (In units) plotted against magnitude as calculated with the current empirical GMPEs for Groningen. The event term for the 2025 Zeerijp earthquake is the inverted green triangle. The red lines indicate the within-event variability (τ).

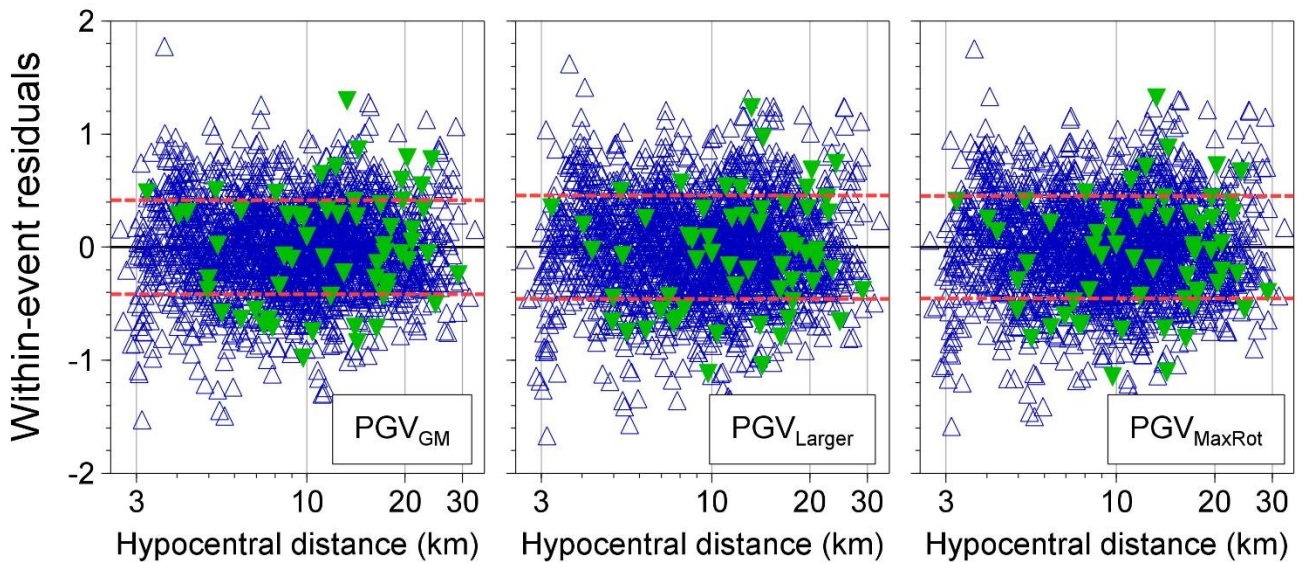


Figure 14. Event- and station-corrected within-event residuals of three component definitions of PGV with respect to the equations of the empirical PGV GMPE (Bommer *et al.*, 2021). Residuals of the M_L 3.4 Zeerijp earthquake recordings are shown in green and of other events in blue. The within-event standard deviation (ϕ_{ss}) is shown as red dashed lines.

In summary, it is clear that the average levels of shaking produced by the recent M_L 3.4 earthquake, in terms of PGA and PGV, are consistent with those from previous earthquakes of the same magnitude. The PGV values are actually fractionally lower, on average, than the levels that would be expected for an earthquake of this magnitude. Therefore, the new maxima for recorded PGA and PGV are associated with the specific characteristics of the G140 recording rather than the earthquake itself being in any way unusual.

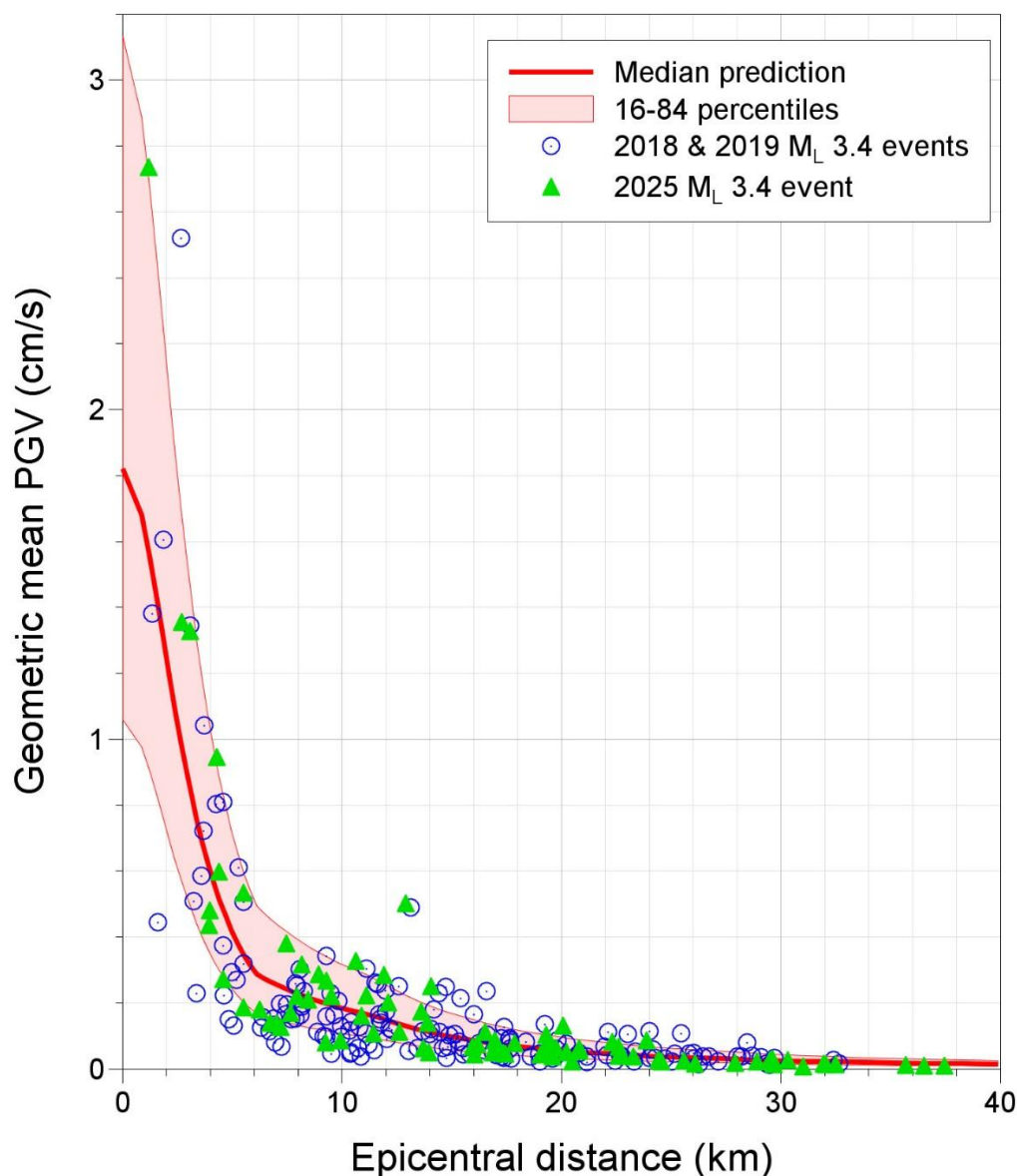


Figure 15. Recorded geometric mean PGV values from earthquakes of M_L 3.4 and predicted amplitudes at three exceedance levels (as in the lower frame of Figure 9) plotted against epicentral distance and using linear rather than logarithmic axes.

Characteristics of the G140 Recording

Another way of stating the conclusion from the previous section is that the large amplitudes of motion recorded at the G140 station do not appear to be due to source effects (such as a high stress drop) since this would manifest as higher amplitudes at all stations. If this is the case, the large amplitude motions may be due to path effects (e.g., directivity, focusing of seismic waves, etc.) and/or site effects (local amplifications).

Some insight into the nature of the ground motions can be obtained from the 5%-damped acceleration response spectra. The horizontal acceleration response spectra from the G140 of the Zeerijp earthquake are shown in Figure 16. The spectral shapes are consistent with previous observations in the field. The divergence between the red and blue curves shows that the horizontal polarisation of both recordings seen for PGA and PGV (Figures 5 and 6) persists across the entire range of usable response periods. The spectral accelerations of the larger component are relatively high for periods shorter than about 0.15 s, decaying very rapidly at longer oscillator periods. Although many ground-motion recordings in Groningen have exhibited strong vertical components of motion, this is not the case for the G140 recording.

Figure 17 shows the time-histories of both acceleration and velocity for all three components of the G140 recording together with their Husid plots, which show the accumulation of Arias intensity (a measure of the energy in the motion) over time. Several important observations can be made, including the presence of two separate wave trains, which is most visible on the vertical component. This may suggest that the two sets of waves are the P-wave and S-wave arrivals, separated by about 1.8 seconds, which would be consistent with the relatively low propagation velocities in the layers above the Zechstein salt (but would also require a high ratio of the velocities of P-waves and S-waves).

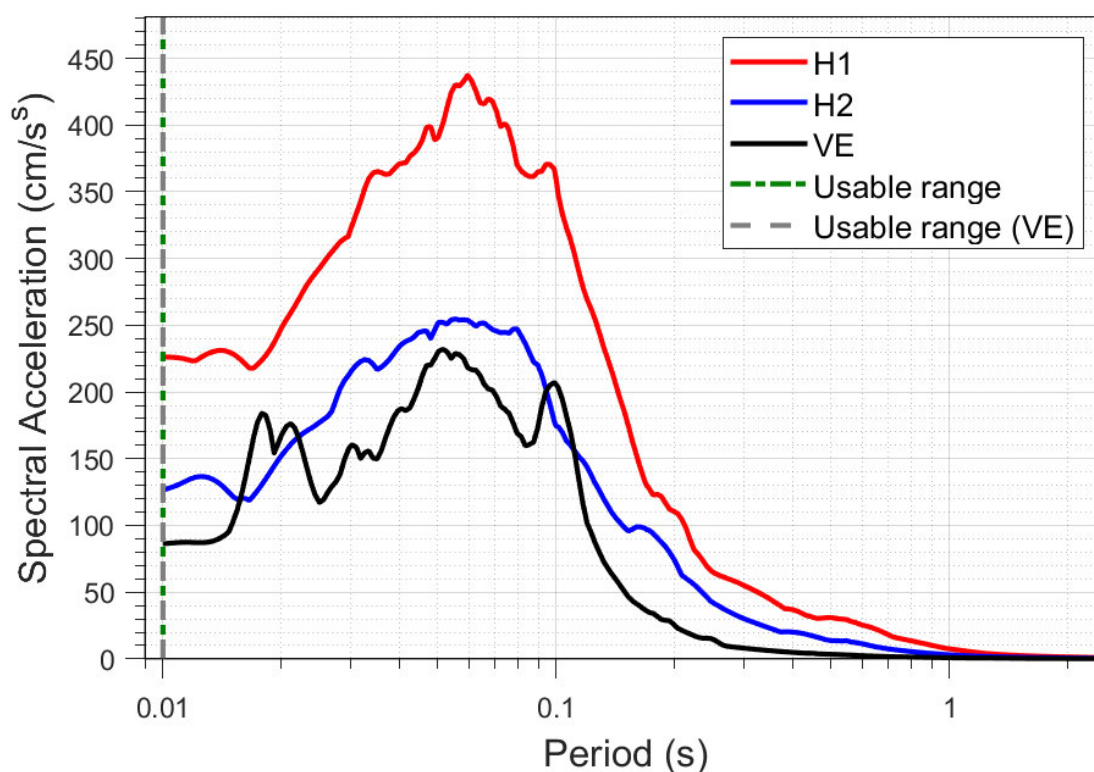


Figure 16. Horizontal response spectra with 5% of critical damping from the record obtained at the G140 station.

Another important observation is that the peak value on the H1 (NS) acceleration trace is associated with a single isolated pulse that is of much higher amplitude than the cycles of motion that immediately follow. The presence of this single strong pulse is even more apparent in the H1 velocity trace. The most striking feature of Figure 17, however, is the almost vertical curve for the H1 component in the uppermost plot, which shows that about two-thirds of the total energy in the motion is carried by the strong pulse.

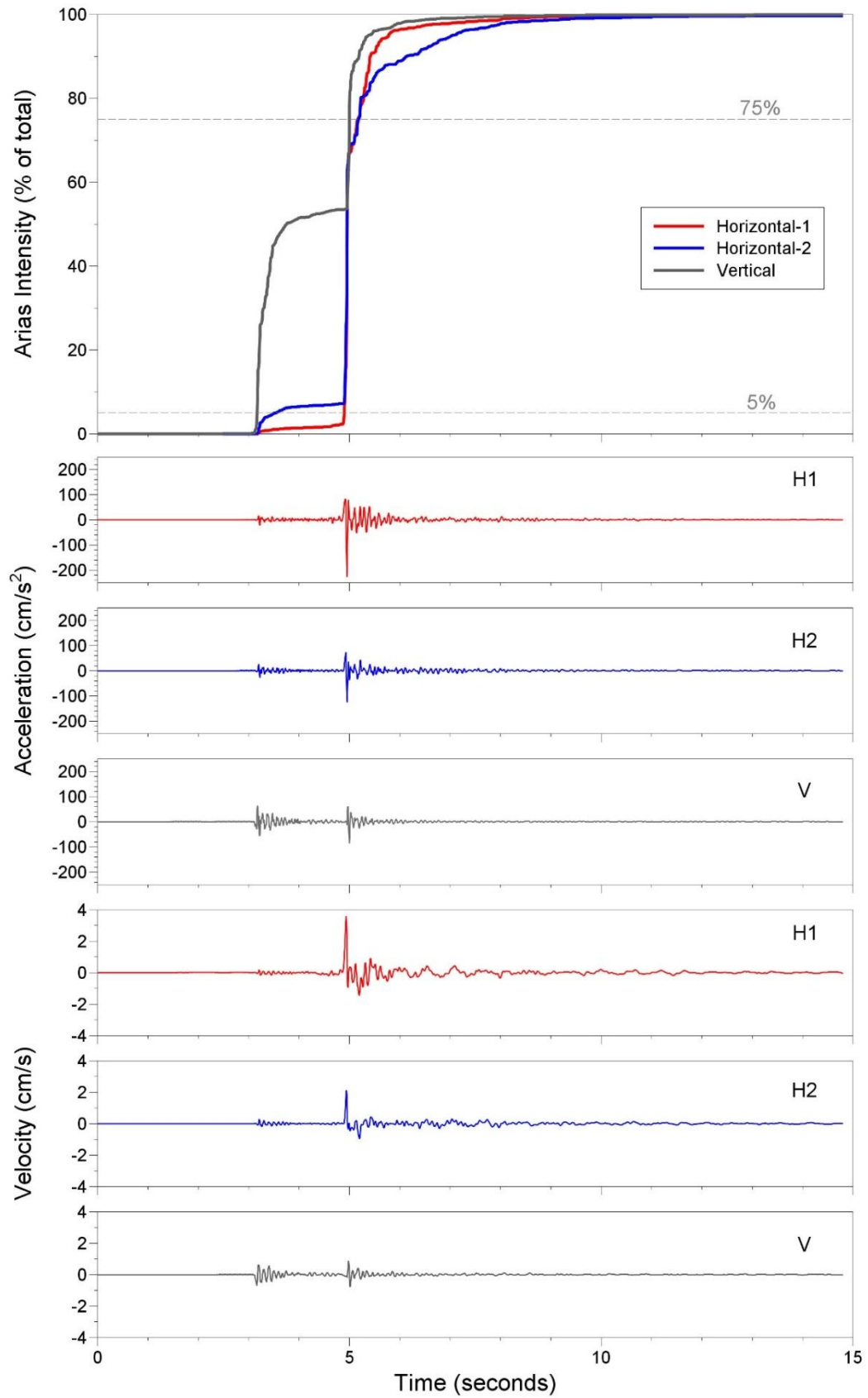


Figure 17. Time-series of acceleration and velocity of the three components of the G140 recording; the top frame shows the accumulation of Arias intensity over time.

The most widely used measure of ground-motion duration is the interval between the times at which the record reaches 5% and 75% of the total Arias intensity, referred to as a significant duration, D_{S5-75} . The duration of the H1 component of the G140 recording is just 0.275 seconds, which is much shorter than the durations of the other two strongest records that were listed in Table 1, as shown in Table 2. This very short duration explains why the much larger PGA value on this most recent recording has not resulted in a similar increase in the largest recorded PGV value: the peak velocity is related to the area of the acceleration pulse, which can be considered as a triangle with a height equal to PGA and base width equal to the duration of the pulse. In the G140 record, the energy has been concentrated into a high-amplitude pulse of acceleration that is extremely short. There is a clear correlation between the durations and the ratio of PGV to PGA (Figure 18). This is a very important observation since PGV is a much better indicator of the damage potential of ground shaking than PGA, and the data suggests that higher PGA values in near-source recordings of Groningen earthquakes are characterised by shorter durations, which means that PGV values do not increase significantly.

Table 2. PGA, PGV and D_{S5-75} values of the three highest amplitude records from Groningen.

Earthquake		M_L	Station	Distance (km)		PGA (cm/s ²)	D_{S5-75} (s)	PGV (mm/s)
Name	Date			R_{epi}	R_{hyp}			
Huizinge	16-08-2012	3.6	MID1	1.95	3.58	81.5	0.52	34.62
Zeerijp	08-01-2018	3.4	BGAR	2.68	3.95	108.7	0.44	32.12
Zeerijp	14-11-2025	3.4	G140	1.20	3.23	227.5	0.28	35.85

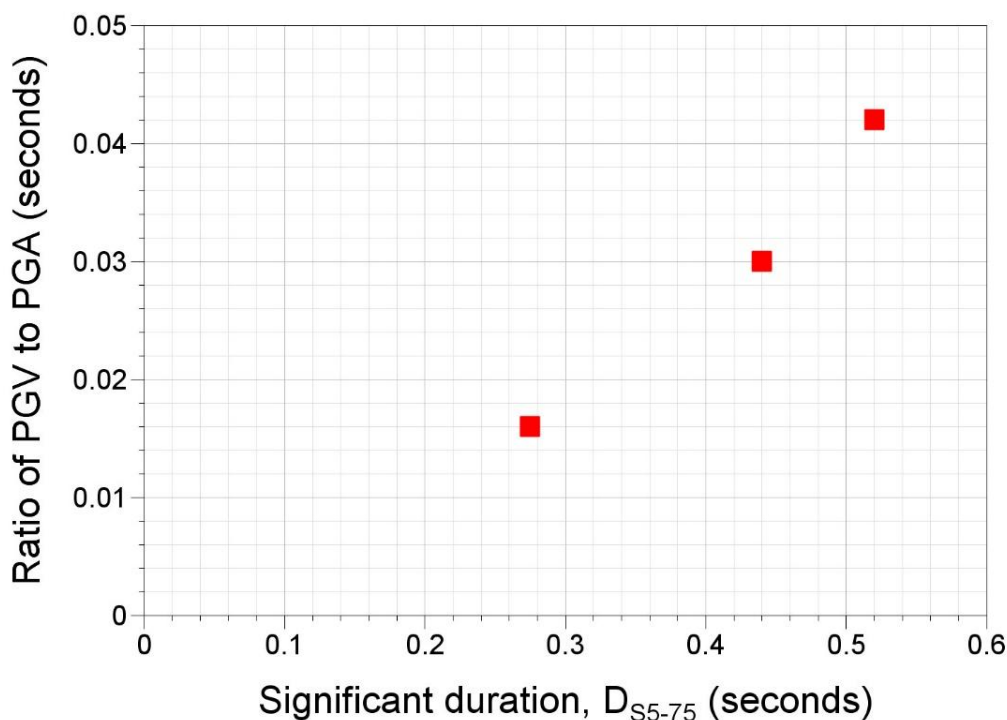


Figure 18. Ratios of PGV to PGA for records in Table 2 plotted against duration.

Investigation of the path influences will require a verified location and identification of the causative fault, both of which are beyond the scope of this preliminary report. However, the site effects of station G140 can be discussed here, as well as their influence on the recorded amplitudes. Figure 19 displays the V_s , unit weight and damping profiles of the station down to a depth of 50 metres (openly available to access through Ntinalexis *et al.*, 2023). An impedance contrast may be observed in the uppermost 12 metres of the site; this would result in resonance at an oscillator period of approximately 0.5 seconds, which, however, would not explain the larger PGA values recorded (since PGA corresponds to spectral accelerations at a period of 0.01 seconds).

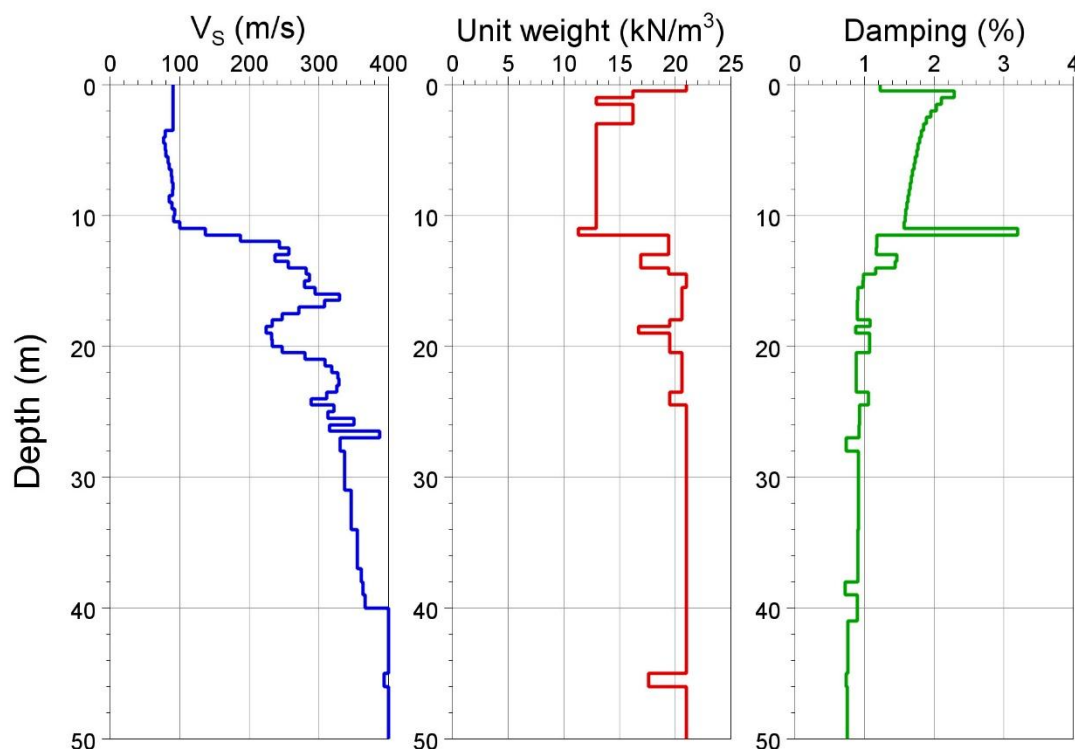


Figure 19. Shear-wave velocity, unit weight and damping profile of uppermost 50 metres of station G140

A site parameter commonly used as a proxy for site conditions in GMPEs, including Atkinson (2015) and Bommer *et al.* (2021), as discussed previously, is the time-averaged shear-wave velocity of the uppermost 30 metres of soil, V_{S30} . Station G140 displays a value of 154 m/s, a very low value by international standards (considering, for instance, that the reference rock V_{S30} for NGA-W2 and European GMPEs is 760 m/s) but for local standards as well. The V_{S30} values among the 90 station locations in the Groningen field range from 118 to 306 m/s, and station G140 displays the 15th lowest value of the 90.

Ground-motion amplitudes increase with decreasing shear-wave velocity, a difference that is accounted for in the empirical PGV GMPE with a V_{S30} -dependent site effects term. Despite the relatively low value of the V_{S30} measured for station G140, the GMPE predicts only a modest increase with respect to amplitudes at the 200 m/s reference (Figure 20): 8.0% in the geometric-mean PGV, 8.9% in the larger component and 9.1% in the maximum-rotated component.

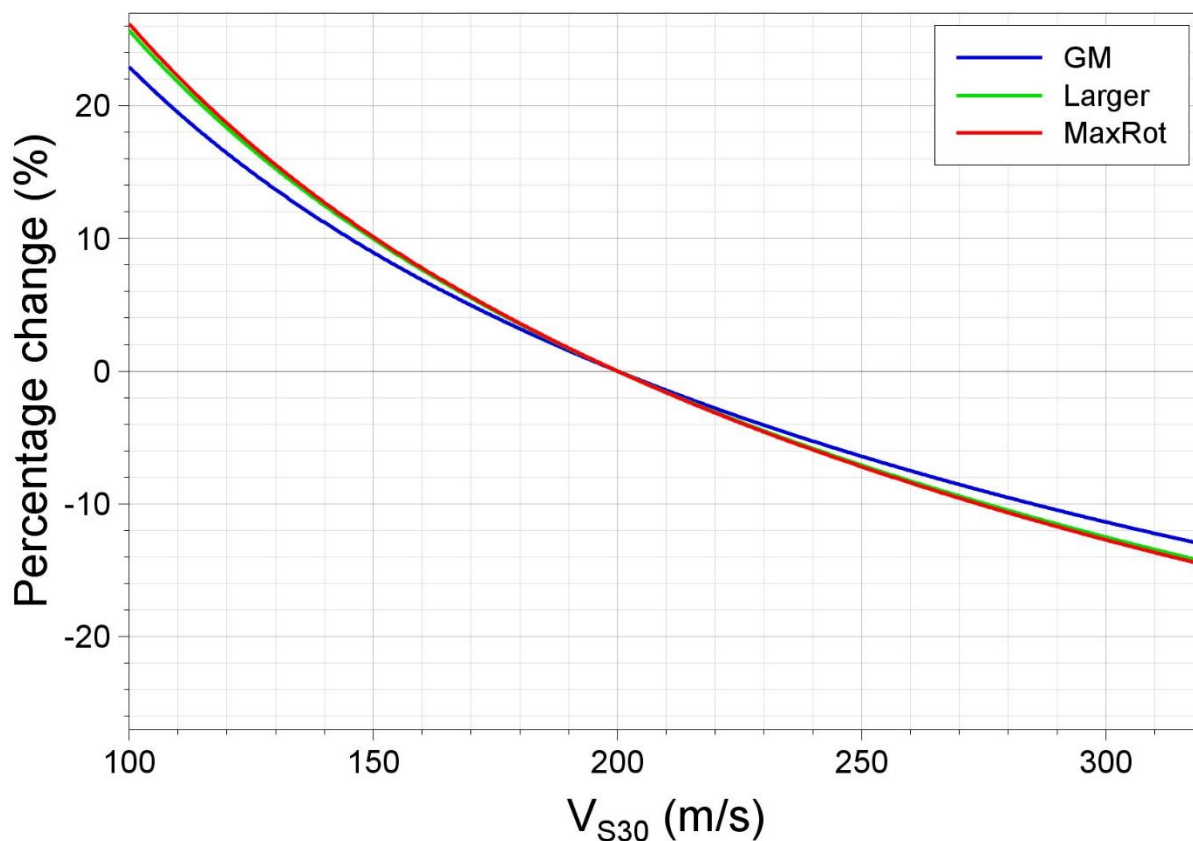


Figure 20. Percentage change in PGV amplitudes predicted by the site effects term of the Bommer *et al.* (2021) GMPE for the V_{S30} range of the Groningen stations, with respect to the reference value of 200 m/s

While V_{S30} is a good indicator of site amplification, it can be too simple a variable to describe such a complicated process perfectly. In the empirical PGV GMPE, this is mitigated by the calculation of site-specific station-terms which describe the average offset of the residuals of each station (in essence, the local site effects not captured by the simple term of the equation), and by the inclusion of the site-to-site variability term, which describes the associated uncertainty in the model predictions. For station G140, the station-terms are approximately zero indicating that the site-effects term of the GMPE captures the site response in the station well: the station-term for geometric-mean PGV is -0.024, for larger PGV -0.004 and for the maximum-rotated component it is -0.008. These correspond to average differences of -2.4%, -0.4% and -0.8%, respectively,

The total residuals of the station with respect to the GMPE are compared to those of the other stations in Figure 21. Event-corrected residuals and the station-terms are also shown in Figure 21, including the residuals of the latest event. As can be observed in the upper two parts of the figure, the residuals of station G140 are well-centred on the zero line, display no pattern with respect to it, and follow the same general pattern as residuals from the other stations. The station-term is one of the smallest of the

database. These features indicate that the GMPE, including its site-response term, describes the PGV amplitudes observed at the station very accurately.

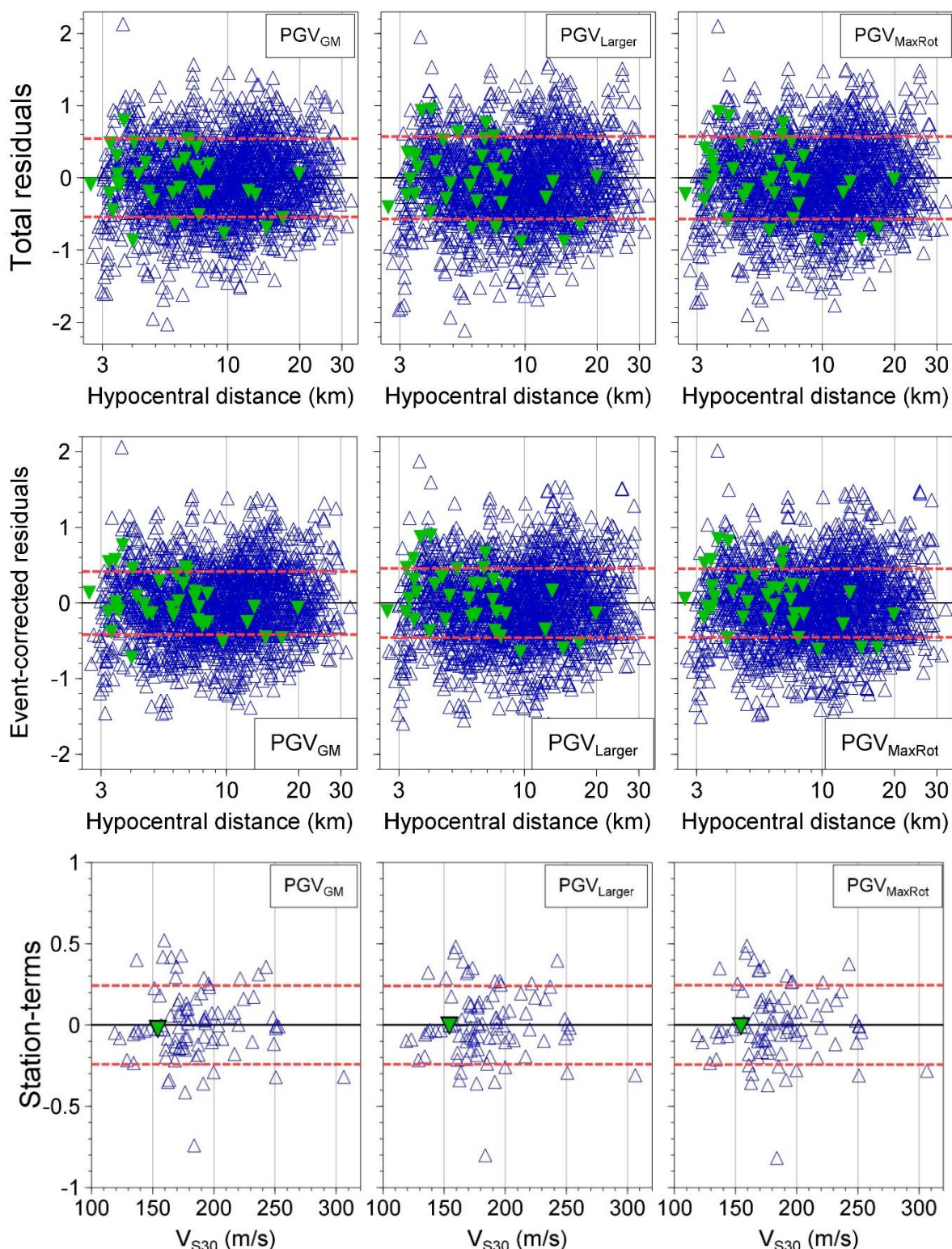


Figure 21. Total (*upper*), event-corrected (*centre*) and station (*lower*) residuals of PGV (In units) plotted against hypocentral distance with respect to the current empirical GMPEs for Groningen. Residuals of station G140 are shown in *green* and of other stations in *blue*. The red dashed lines correspond to $\pm\sigma$, ϕ_{SS} and ϕ_{S2S} , respectively.

Finally, Figure 22 compares the total residuals of the recordings of station G140, from all events of $M_L \geq 3.0$ to date, to those from the other stations, again only showing stations with reliable V_{S30} values, as in Figure 10. With the exception of the recent Zeerijp recording, the residuals here do not appear to be exceptional.

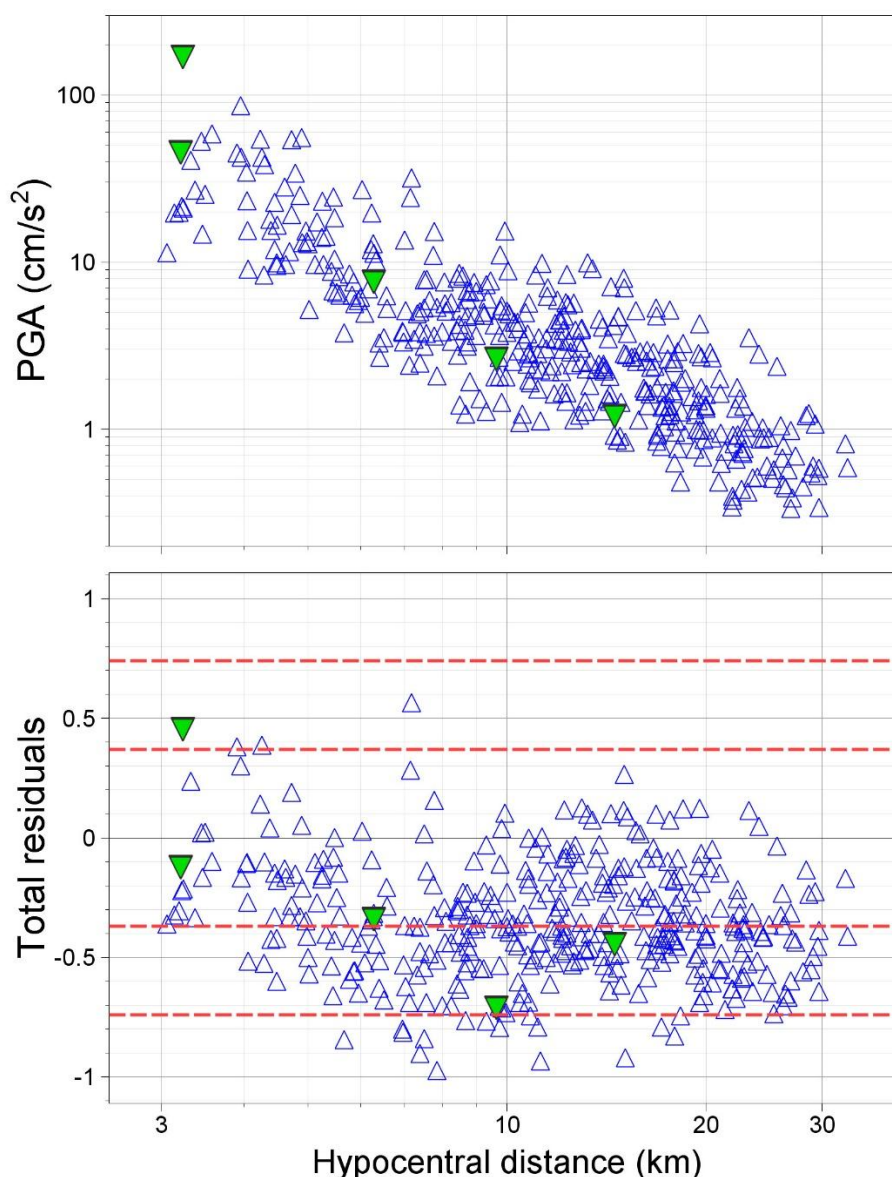


Figure 22. Geometric mean PGA (*upper*) from earthquakes of $M_L \geq 3$ and residuals ($\log_{10}$ units) with respect to the Atkinson (2015) alt- h GMPE (*lower*) plotted against distance, with the G140 station records shown as green triangles. The red lines in the lower frame indicate the $\pm\sigma$ and $\pm2\sigma$ levels from the Atkinson (2015) equation.

Overall, the examination of the PGV and PGA values of G140 shows that the station does not display large site amplification. Records of the station display similar

amplitudes to those from other stations, with the exception only of the recording of the latest event, and only for PGA. This leads to the conclusion that systematic site effects from the station are most likely not the cause of the relatively large PGA amplitudes recorded, leaving path effects as the most likely explanation.

Concluding Remarks

In this report, we have presented a preliminary analysis of the ground-motion recordings of the $M_L 3.4$ earthquake that occurred near the village of Zeerijp on Friday 14 November. The analyses have shown that in terms of both PGA and PGV the recorded motions are consistent with those from previous earthquakes in Groningen. The PGV values, in particular, are consistent with the predictions of the empirical model derived from the Groningen database, while being indeed slightly below average for an earthquake of this magnitude.

However, the largest PGA, recorded at just 1.2 km from the epicentre, is much larger than any of the previously recorded peaks, and this will no doubt attract considerable attention. A point that needs to be emphasised is that this new maximum PGA is associated with an extremely short duration, as a result of which the PGV value of the same record, despite being the new maximum PGV value recorded in Groningen, is almost identical to the previous maximum value. Thus, the large increase in the maximum recorded PGA amplitude translated to a very small increase in PGV. This observation is significant since PGV is widely recognised as a much better indicator of damage potential than PGA. Additionally, the PGV value in question is entirely consistent with the predictions of the existing PGV GMPE and therefore would not result in notable changes to the models.

The recordings confirm both that relatively high amplitude motions can be generated close to the epicentres of the larger earthquakes (albeit associated with very short durations) and that the ground-motion amplitudes decay very rapidly with increasing distance from the epicentre.

References

- Atkinson, G. M. (2015). Ground-motion prediction equation for small-to-moderate events at short hypocentral distances, with application to induced-seismicity hazards. *Bulletin of the Seismological Society of America* **105**(2A), 981-992.
- Bommer, J. J., P. J. Stafford, & M. Ntinalexis (2021). *Empirical Equations for the Prediction of Peak Ground Velocity due to Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field*, 10 October 2021, 35 pp.
- Bommer, J. J., P. J. Stafford, E. Ruigrok, A. Rodriguez-Marek, M. Ntinalexis, P. P. Kruiver, B. Edwards, B. Dost, & J. van Elk (2022). Ground-motion prediction models for induced earthquakes in the Groningen gas field, the Netherlands. *Journal of Seismology*, **26**(6), 1157-1184.
- Edwards, B. & M. Ntinalexis (2021). Usable bandwidth of weak-motion data: application to induced seismicity in the Groningen Gas Field, the Netherlands. *Journal of Seismology*, **25**(4), 1043-1059.
- KNMI (1993). Netherlands Seismic and Acoustic Network. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Seismic Network.
- Kruiver P.P., E. van Dedem, R. Romijn, G. de Lange, M. Korff, J. Stafleu, J.L. Gunnink, A. Rodriguez-Marek, J.J. Bommer, J. van Elk & D. Doornhof (2017). An integrated shear-wave velocity model for the Groningen gas field, The Netherlands. *Bulletin of Earthquake Engineering* **15** (9): 3555–3580.
- Ntinalexis, M, P.P Kruiver, J.J. Bommer, E. Ruigrok, A. Rodriguez-Marek, B. Edwards, R. Pinho, J. Spetzler, E. Obando Hernandez, M. Pefkos, M. Bahrampouri, E.P. van Onselen, B. Dost B & J. van Elk (2023). A database of ground-motion recordings, site profiles, and amplification factors from the Groningen gas field in the Netherlands. *Earthquake Spectra*, **39**(1): 687-701.
- Stafford, P.J., B.D. Zurek, M. Ntinalexis & J.J. Bommer (2019). Extensions to the Groningen ground-motion model for seismic risk calculations: component-to-component variability and spatial correlation. *Bulletin of Earthquake Engineering* **17**, 4417-4439.

