



RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – NOVEMBER 2021



[Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten]

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	1
1.1	Aantal aardbevingen (activity rate)	1
1.2	Aardbevingsdichtheid	1
1.3	Trend in seismiciteit	1
1.4	Incidentparameters PGA en PGV	2
1.5	Aardbevingen rond Zeerijp op 4 oktober 2021 en volgende dagen	2
1.6	Aanpassingen seismisch monitoring	2
1.7	Overschrijding Monitoringsniveau 2 en Speciale Rapportage	2
2	Inleiding en leeswijzer	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Leeswijzer	4
2.3	Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid	4
3	Trendparameters	7
3.1	Trendparameter aantal aardbevingen	8
3.2	Aardbevingsdichtheid	8
4	Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit	10
4.1	Aantal aardbevingen	10
4.2	Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld	12
4.3	Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen	13
	Verloop van het aantal bevingen door de tijd	13
	Verband productie en seismiciteit per productie locatie cluster	15
	Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd	17
	Verhouding tussen grote en kleine bevingen	19
4.4	De aardbevingenreeks op 4 oktober en volgende dagen	23
5	Referenties	28
	Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 november 2020 tot 1 november 2021	29
	Appendix B – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 2,5 bij Zeerijp op 4 oktober	32
	Appendix C – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving bij Appingedam op 4 oktober	50
	Appendix D – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 2,2 bij Zeerijp op 4 oktober	68

Appendix E – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 1,3 bij Zeerijp op 6 oktober	84
Appendix F – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 0,6 bij Zeerijp op 7 oktober	102
Appendix G – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 0,8 bij Zeerijp op 22 oktober	118

1 Samenvatting

Deze rapportage is opgesteld om te voldoen aan Mijnbouwregeling artikel 1.3a.5 waarin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningen-gasveld twee keer per kalenderjaar een rapportage opstelt over ontwikkelingen in de seismiciteit. In dit artikel staat ook dat de seismiciteit wordt gemonitord door middel van het continu bijhouden van vier parameters.

In de Mijnbouwregeling zijn deze vier parameters onderverdeeld in twee zogenoemde trendparameters en in twee zogenoemde incidentparameters. De aardbevingsdichtheid en het aantal aardbevingen ('activity rate') zijn de trendparameters. Deze parameters worden gebruikt om vroegtijdig een (lokale) toename of afname van de seismiciteit te signaleren over de afgelopen 6 maanden. De trendparameters worden berekend over een periode van 6 maanden en gerapporteerd op jaar basis. De grondversnellingen (PGA) en grondsnelheden (PGV) van de bevingen zijn de incidentparameters.

1.1 Aantal aardbevingen (activity rate)

Het aantal geregistreerde aardbevingen met een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,5$ is in de afgelopen twaalf maanden afgenomen van 14 naar 12. Voor een magnitude groter dan of gelijk aan $M_L \geq 1,2$ is het aantal geregistreerde aardbevingen in de afgelopen twaalf maanden afgenomen van 21 naar 18.

1.2 Aardbevingsdichtheid

Aardbevingsdichtheid is gedefinieerd als het aantal geobserveerde aardbevingen per vierkante kilometer per jaar en wordt berekend voor het hele Groningen-gasveld. In een deel van het veld rond Loppersum is de aardbevingsdichtheid, per 4 oktober 2021, gestegen tot 0,311 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar. Deze dichtheid is berekend op basis van de aardbevingen met een magnitude van 1,2 en hoger, geregistreerd gedurende de voorafgaande 6 maanden (Ref. 2).

Rond Loppersum is de aardbevingsdichtheid daardoor gestegen tot boven "grenswaarde 1", die is vastgesteld op 0,3 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar. Deze grenswaarde is overschreden op 4 oktober 2021 nadat een aantal aardbevingen plaats vonden nabij Zeerijp binnen één dag. De toezichthouder is meteen de volgende dag door NAM op de hoogte gesteld van deze overschrijding. In de rest van het Groningen-gasveld is de aardbevingsdichtheid niet verhoogd en bevindt deze zich onder de laagste grenswaarde zoals gedefinieerd in Mijnbouwregeling Artikel 1.3a.6.

1.3 Trend in seismiciteit

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid laten vanaf 2015 een dalende trend zien. In de afgelopen twaalf maanden zijn er 12 aardbevingen boven het Groningen-gasveld met een magnitude van $M_L \geq 1,5$ geregistreerd. De zwaarste aardbeving in het afgelopen jaar was die bij Zeerijp op 4 oktober 2021 met een magnitude van $M_L = 2,5$. Het aantal aardbevingen met een kleinere magnitude tussen 1,0 (en gelijk aan) en 1,5 is in deze periode afgenomen tot 13 ten opzichte van 14 in de vorige rapportage periode.

Het aantal geregistreerde aardbevingen en een statistische analyse hiervan wijzen op een gelijkblijvend of licht dalend niveau van seismiciteit. In hoeverre de observaties een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet met zekerheid vast te stellen.

1.4 Incidentparameters PGA en PGV

In de afgelopen twaalf maanden hebben zich geen aardbevingen boven het Groningen-gasveld voorgedaan die hebben geleid tot grondversnellingen en/of grondsnelheden boven de in de Mijnbouwregeling vastgestelde grenswaarden.

1.5 Aardbevingen rond Zeerijp op 4 oktober 2021 en volgende dagen

De aardbeving met de grootste magnitude tijdens de 12-maanden rapportage periode was de Zeerijp aardbeving met een magnitude van $M_L = 2,5$ op 4 oktober 2021. Deze aardbeving was onderdeel van een aardbevingenreeks, waar ook een aardbeving later op de zelfde dag met een kracht van 2,2 op nagenoeg de zelfde locatie, onderdeel van was.

In deze halfjaarlijkse rapportage is een analyse van de hypocentra en het bronmechanisme voor de aardbevingen in deze reeks opgenomen. De analyse laat zien dat de hypocentra van de aardbevingen rond Zeerijp erg dicht bij elkaar liggen en daardoor een significante invloed hebben op de lokale aardbevingsdichtheid rond Zeerijp.

1.6 Aanpassingen seismisch monitoring

Op 14 oktober 2020 zijn de monitoringsparameters en de daarbij horende grenswaarden aangepast op advies van SodM (Ref. 2). Deze rapportage is gebaseerd op de in de rapportage periode geldende monitoringsparameters en grenswaarden. Een historische vergelijking tussen de verschillende monitoringsregimes over de periode voor de introductie van de aangepaste grenswaarden is opgenomen in de speciale rapportage voor de Loppersum aardbeving (Ref. 1).

1.7 Overschrijding Monitoringsniveau 2 en Speciale Rapportage

Op 8 november 2021 is tijdens de voorbereidingsperiode van deze halfjaarlijkse rapportage het tweede monitoringsniveau overschreden. NAM zal naar aanleiding hiervan een speciale rapportage voorbereiden. Beide documenten, halfjaarlijkse monitoringsrapportage en de speciale rapportage, zullen vrijwel gelijktijdig met SodM worden gedeeld en worden gepubliceerd op de website van NAM. Analyse van de hypocentra en bronmechanisme van de aardbevingen in de zwerm met de automatiseerde Full Wave Form Inversion zijn opgenomen in deze halfjaarlijkse rapportage. Echter om duplicatie te voorkomen is ervoor gekozen om de analyse van de groundbewegingen gemeten tijdens de aardbevingen van de aardbevingszwerm op te nemen in de speciale rapportage.

De belangrijkste conclusie van deze analyse is dat de bewegingen die zijn geregistreerd voor de grootste twee aardbevingen in Zeerijp in grote lijnen in overeenstemming zijn met eerdere registraties van aardbevingen in Groningen en daardoor dus ook goed overeenkomen met de resultaten van de empirische methode voor het voorspellen van groundbeweging (de empirische GMPE).

Een reeks aardbevingen met sterk verschillende magnituden, die op nagenoeg dezelfde locatie hun oorsprong hebben, kan ook geanalyseerd worden met de empirische Green's function methode. Deze geavanceerde analyse is inmiddels gestart en eventuele resultaten worden in het eerste kwartaal van 2022 verwacht. Voorlopige resultaten hiervan zullen ook in de speciale rapportage worden opgenomen.

2 Inleiding en leeswijzer

2.1 Inleiding

Dit rapport bevat de rapportage over de ontwikkeling van de seismiciteit in het Groningen-gasveld zoals benoemd in Artikel 1.3a.5 van de Mijnbouwregeling. Hierin staat dat de houder van de winningsvergunning Groningen-gasveld twee keer per kalenderjaar een rapportage opstelt over ontwikkelingen in de seismiciteit (Ref. 2).

Seismische gegevens en gasproductie in dit rapport zijn bijgewerkt tot 1 november 2021. Het rapport kijkt in principe een jaar terug maar daar waar relevant wordt verder teruggekeken om seismische ontwikkelingen in hun historische context te plaatsen. Een tabel met de aardbevingen die in Groningen zijn geregistreerd in de afgelopen 12 maanden is in dit rapport opgenomen als appendix A.

In Mijnbouwregeling artikel 1.3a.6.1a tot en met f is beschreven welke actie moet worden genomen bij welke waarnemingsniveau overschrijding, dit is samengevat in Tabel 1. In Mijnbouwregeling artikel 1.3a.8 is beschreven welke actie genomen moet worden bij overschrijding van een signaalparameter waarnemingsniveau, zie Tabel 2.

Tabel 1 Beschrijving van welke actie ondernomen wordt bij overschrijding van een trendparameter waarnemingsniveau volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.6. Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen.

Trendparameter	Waarnemings Niveau	Melding	Analyse
Aantal aardbevingen $M_L \geq 1,2$	30	Waarneming melden binnen 48 uren.	-
	40	Idem	Analyse van de ontwikkeling van seismiciteit binnen 14 dagen.
Aardbevingsdichtheid	0,30	Waarneming melden binnen 48 uren.	-
	0,40	Idem	Analyse van de ontwikkeling van seismiciteit binnen 14 dagen.

Tabel 2 Beschrijving van welke actie ondernomen wordt bij overschrijding van een signaalparameter waarnemingsniveau volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.8. Meldingen worden gedaan aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat en de Inspecteur-generaal der Mijnen

Signaalparameter	Waarnemingsniveau	Melding	Analyse
Grondversnelling	> 0,08	Terstond waarneming melden	Eerste analyse binnen 48 uren, nadere analyse binnen 14 dagen.
Grondsnelheid	50 mm/s	Idem	Idem

Signaal parameter	Waarnemingsniveau	Melding	Analyse
Magnitude	≥ 3	Terstond waarneming melden	Eerste analyse binnen 48 uren, nadere analyse binnen 14 dagen.

2.2 Leeswijzer

Voor de in dit rapport besproken analyses wordt de dataset van geregistreerde aardbevingen onderverdeeld in vier magnitude-klassen. Dit is gedaan vanwege de verschillen in compleetheid en omvang van de vier subsets, die daardoor statistisch niet direct vergelijkbaar zijn.

Om de leesbaarheid te vergroten wordt voor elke klasse de volgende vaste kleur gebruikt in de verschillende figuren.

- Groen: Bevingen met een magnitude¹ groter of gelijk aan $M_L = 1,0$
- Paars: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,2$
- Blauw: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 1,5$
- Rood: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan $M_L = 2,0$

In dit rapport wordt een , (komma) gebruikt als scheidingsteken voor decimalen, en een . (punt) voor duizendtallen.

2.3 Meetnetwerk en meetnauwkeurigheid

Het seismische meetnetwerk is eigendom van en wordt geopereerd en onderhouden door KNMI. Elk seismisch meetstation bestaat uit een bovengronds geplaatste accelerometer voor het meten van grondbeweging en vier ondergronds geplaatste geofoons voor nauwkeurige plaatsbepaling en bepaling van de aardbevingssterkte. Daarnaast zijn ook stations geplaatst (vooral ten westen van het gasveld) die alleen grondversnelling meten. Alle in dit hoofdstuk gerapporteerde meetgegevens zijn ontleend aan het KNMI en terug te vinden op de website van het KNMI.

¹ De sterkte van de aardbevingen worden in dit rapport aangeduid in Local Magnitude Scale of M_L . (Ref. 3)

Het seismische meetnetwerk boven het Groningen-gasveld is in 2014 uitgebreid met 69 nieuwe seismische meetstations. Hierdoor is de gevoeligheid van het meetnetwerk toegenomen. In de periode van 2003 tot en met 2014 werden alle bevingen in het Groningen-gasveld met een magnitude groter dan $M_L = 1,5$ op de schaal van Richter geregistreerd. Vanaf 2014 worden alle aardbevingen met een magnitude groter dan $M_L = 1,0$ op de schaal van Richter boven het Groningen-gasveld geregistreerd. Voor 2014 werden ook enkele bevingen met een magnitude boven de $M_L = 1,2$ geregistreerd, maar door de lagere gevoeligheid van het meetnetwerk is het niet zeker of alle bevingen met een magnitude tussen de $M_L = 1,2$ en de $M_L = 1,5$ geregistreerd zijn. Daardoor kan het werkelijke aantal bevingen onderschat zijn.

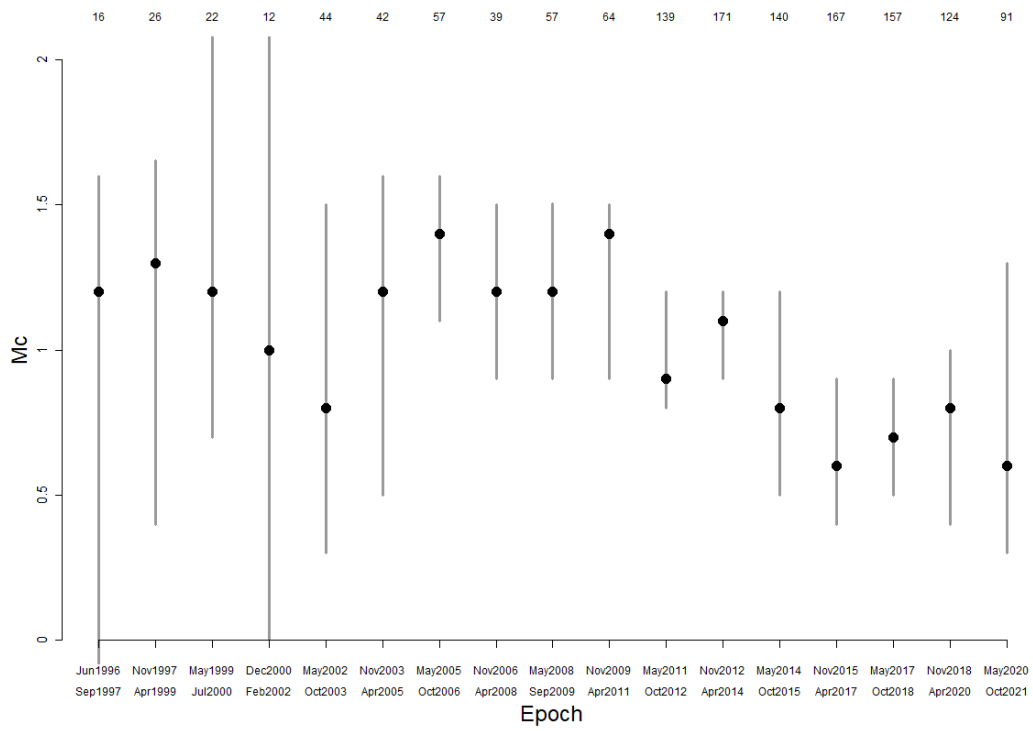
Magnitude van compleetheid

De magnitude van compleetheid (magnitude of completeness of ook wel MoC) is de laagste magnitude M_L waarvoor elke beving waargenomen kan worden, ongeacht positie in het reservoir. Bevingen met een magnitude kleiner dan de MoC kunnen waargenomen worden wanneer deze zich voordoen op een voor het meetnetwerk 'gunstige' locatie. Wanneer de beving zich voordoet op een andere locatie zou het kunnen dat deze niet wordt waargenomen. Voor bevingen met een magnitude groter dan de MoC geldt dat deze wordt waargenomen, ongeacht locatie in het reservoir. De MoC wordt afgeleid uit de waarnemingen en is onderhevig aan een bepaalde mate van onzekerheid.

Voor statistisch onderzoek is het van belang een goede MoC te veronderstellen. Is de veronderstelde MoC te hoog dan is de dataset kleiner dan mogelijk en is het moeilijker statistisch relevante conclusies aan de data te verbinden. Is de MoC te laag aangenomen dan is de dataset incompleet en worden mogelijkerwijs foutieve conclusies uit de dataset afgeleid.

De MoC is afgeleid volgens de maximum curvature method (Ref. 4) en de resultaten met het 95% betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Figuur 1. In de figuur is duidelijk zichtbaar dat vanaf 2014 de MoC afneemt (ook kleinere aardbevingen worden geregistreerd). Vanaf 2014 zijn bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,0$ bruikbaar voor statistisch onderzoek. In de periode voorafgaand aan 2014 is de dataset waarschijnlijk compleet voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ en zeer waarschijnlijk compleet voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,5$. In deze rapportage wordt een MoC van 1,0, 1,2, 1,3 of 1,5 verondersteld, ondermeer afhankelijk van hoe ver teruggekeken wordt in de tijd.

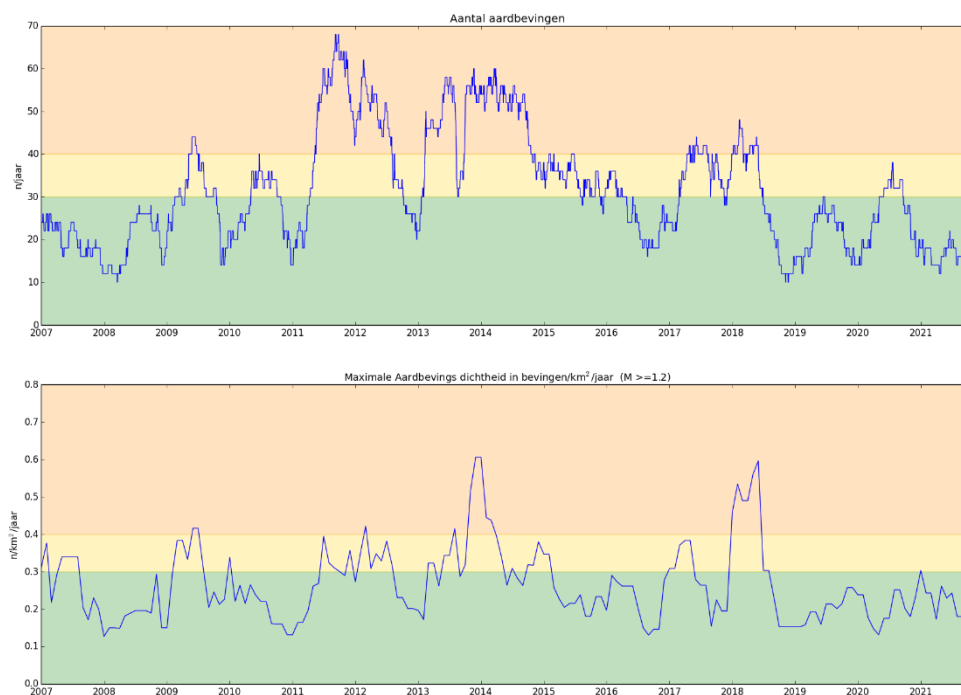
RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021



Figuur 1: Magnitude of Completeness met onzekerheidsintervallen voor verschillende periodes, met de stip wordt de P50 waarde aangegeven.

3 Trendparameters

Het aantal aardbevingen en de aardbevingsdichtheid zijn de trendparameters. De trendparameters worden continu bijgehouden en in de vorm van een trendlijngrafiek getoond op de website van NAM, <https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen.html>, zie Figuur 2.



Figuur 2: Trendparameters, in de bovenste grafiek wordt het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude 1,2 of groter in per twaalf maanden getoond. In de onderste grafiek wordt de maximale aardbevingsdichtheid (voor aardbevingen met een magnitude van 1,2 of groter) per twaalf maanden getoond. In beide grafieken is de periode waarin de bevingen verzameld worden zes maanden, de getallen zijn omgerekend naar een jaarlijks aantal bevingen/dichtheid. (vermenigvuldiging met twee). De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en oranje: hoge activiteit

Tabel 3 Trendparameter overzicht mei 2021 tot november 2021. Aardbevingsdichtheid is aangegeven op het einde van de maand.

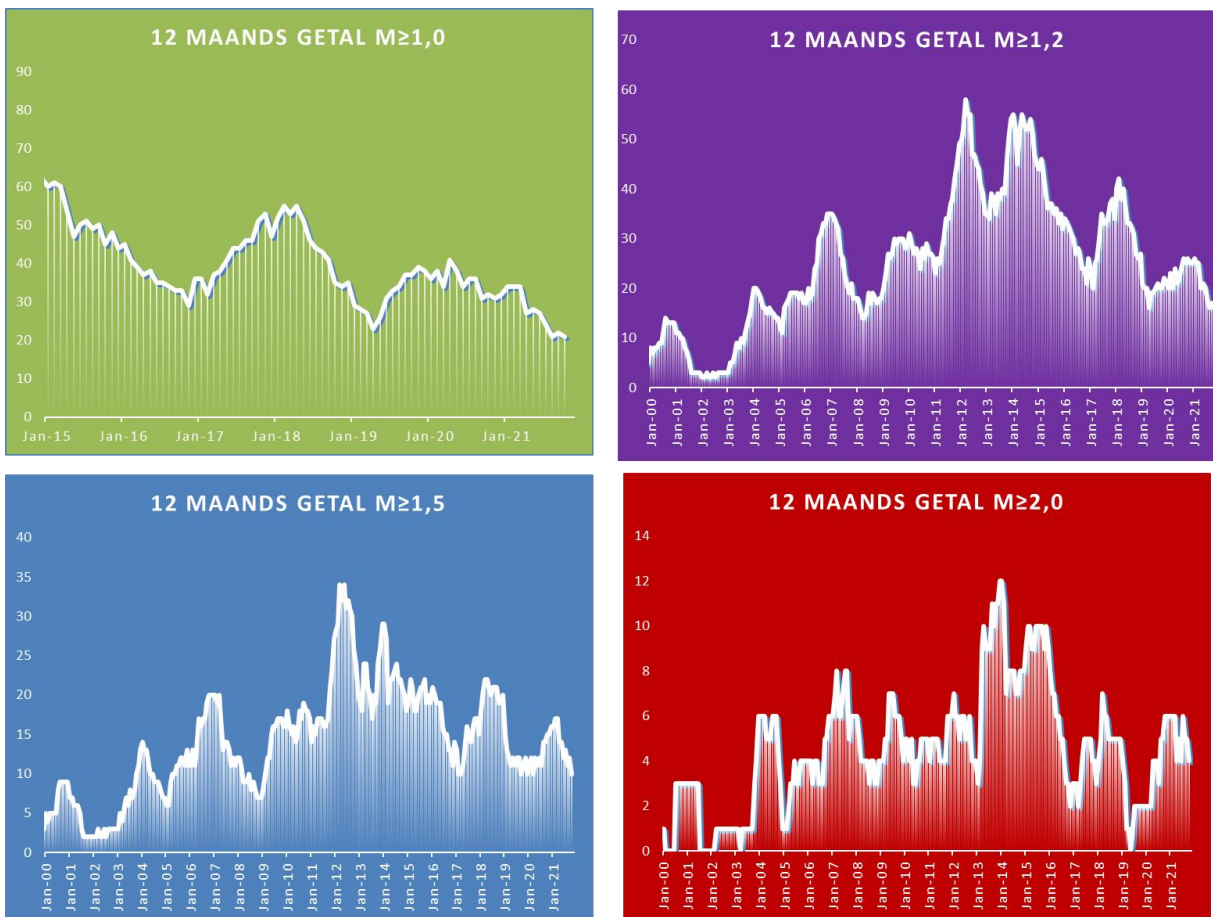
	mei	juni	juli	aug	sep	okt
Aantal aardbevingen ($M_L \geq 1,2$)	2	2	1	1	1	4
Aardbevingsdichtheid (einde maand)	0,23	0,24	0,18	0,18	0,18	0,38

3.1 Trendparameter aantal aardbevingen

De trendparameter “Aantal aardbevingen” toont het aantal waargenomen aardbevingen met een magnitude $M_L=1,5$ of groter in de voorgaande twaalf maanden. Dit wordt ook het rollende aantal of 12-maandsgetal genoemd. Het 12-maandsgetal van november 2021 is dus de som van het aantal aardbevingen van een bepaalde magnitude in de periode van 1 november 2020 tot 1 november 2021.

Figuur 3 laat het 12-maandsgetal zien over een langere periode voor vier magnitude-classes. Hierbij geldt dat de data van bevingen met een magnitude onder de $M_L = 1,5$ in de periode voor 2014 mogelijk incompleet is vanwege beperkingen in het meetsysteem in die periode, zie ook hoofdstuk 2.3.

De stabiel lage trend in het aantal aardbevingen (met magnitude groter dan 1,0 en 1,5) zou het gevolg kunnen zijn van de verlaagde productievolumes en de manier van opereren maar ook van de natuurlijke variabiliteit. Het lage aantal events maakt het lastig conclusies te trekken, in hoofdstuk 4 wordt hier verder op in gegaan. Informatie over het verband tussen de seismiciteit en de productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analyses (Ref 5, 6 en 7).



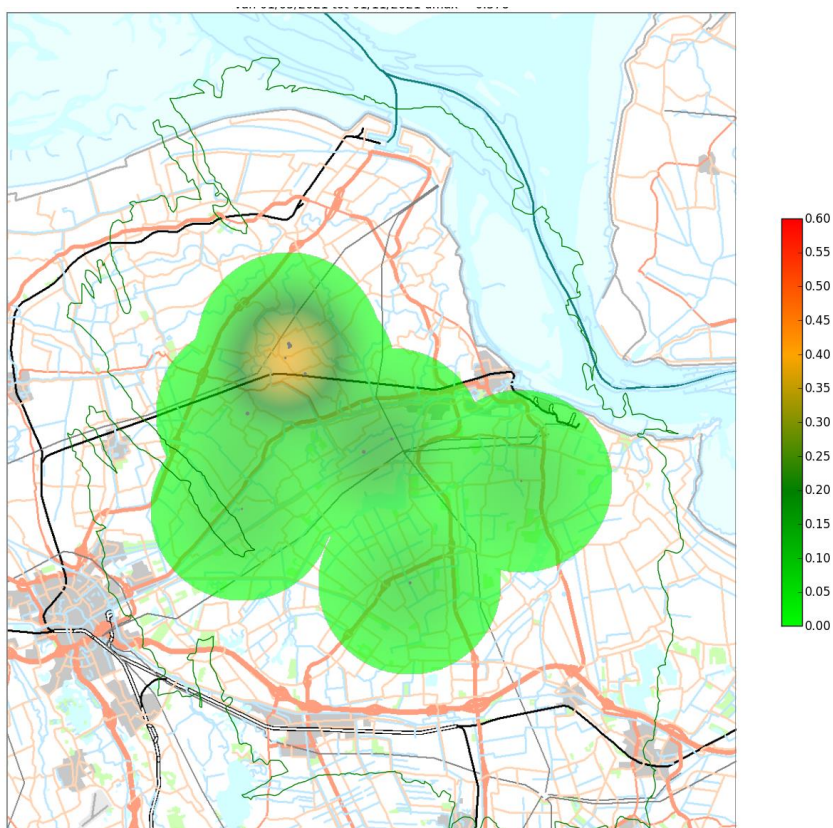
Figuur 3: 12-maandsgetallen voor vier magnitude-classes; waarnemingen voor $M_L \geq 1,0$ weergegeven vanaf 2014, de overige waarnemingen sinds 2000

3.2 Aardbevingsdichtheid

Figuur 4 toont een kaart met daarop de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode 1 mei 2021 tot 1 november 2021 geregistreerde aardbevingen. Aardbevingsdichtheid wordt berekend

met de Quartic Kernel functie. Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van $M_L = 1,2$ en hoger zijn hierin opgenomen. De berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurenschaal. Als trendparameter wordt de maximale waarde van de berekende aardbevingsdichtheid over de voorgaande twaalf maanden gebruikt.

Op 4 oktober 2021 bereikte de maximale aardbevingsdichtheid in het Groningen veld een waarde van 0,378 bevingen/km²/jaar. Hiermee overschreed de aardbevingsdichtheid het niveau van 0,30 bevingen/km²/jaar waarna een speciale tussentijdse rapportage is uitgebracht met daarin een analyse naar de ontwikkeling van seismiciteit (Ref. 9). De volgende dag is de toezichthouder door NAM op de hoogte gesteld van deze overschrijding.



Figuur 4: Aardbevingsdichtheidskaart voor bevingen met een magnitude $M_L \geq 1,2$ weergegeven in de zes maanden voorafgaand aan 1 november 2021. (de dichtheid is omgerekend naar een jaarlijkse dichtheid) De maximale waarde in deze kaart komt overeen met de trendparameterwaarde.

4 Nadere analyse van de geobserveerde seismiciteit

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van nadere analyse van de trends en patronen van de trendparameters opgenomen, te weten:

1. Regionale verschillen
2. Een statistische analyse van de hoeveelheid aardbevingen over tijd
3. Veranderingen in de verhouding tussen kleine en grote bevingen (b-factor Gutenberg-Richter)
4. Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

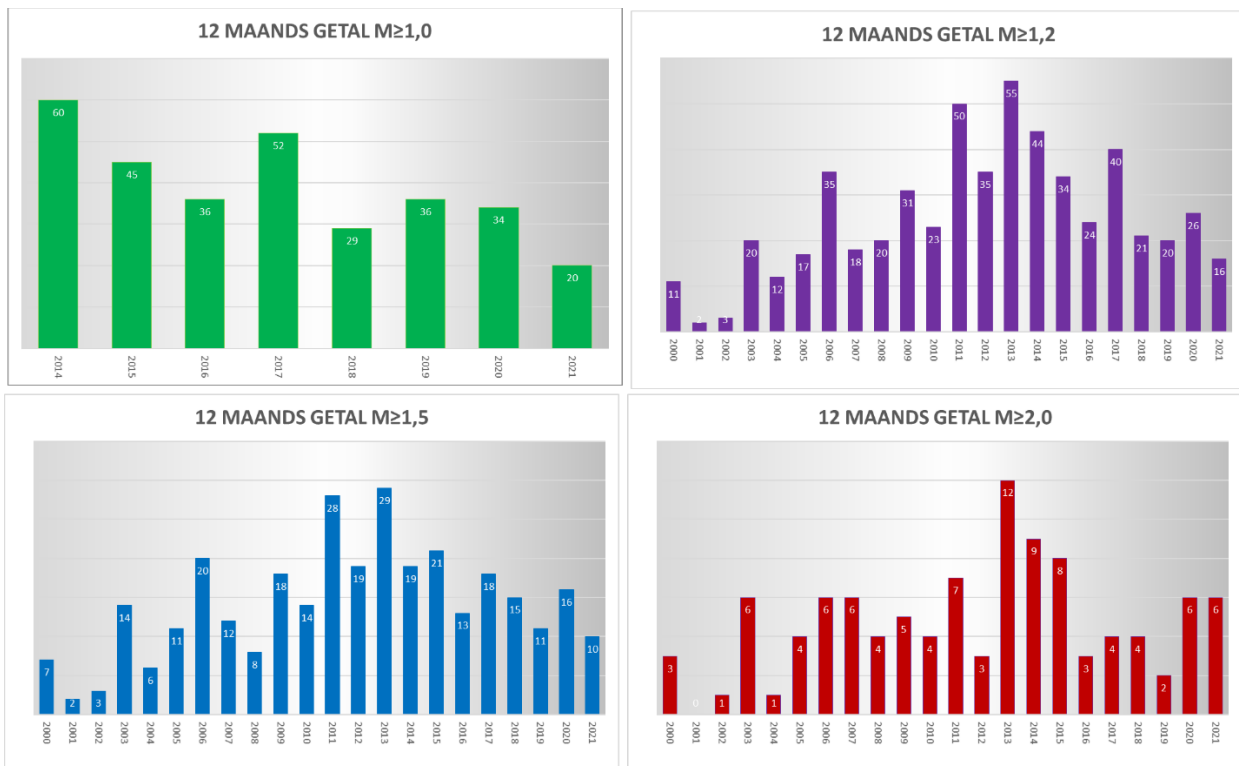
4.1 Aantal aardbevingen

In de afgelopen twaalf maanden zijn in totaal 25 aardbevingen geregistreerd met een magnitude groter of gelijk aan $M_L \geq 1,0$. Het aantal aardbevingen per maand onderverdeeld in vier magnitudeklassen is opgenomen in Tabel 4. In de voorgaande periode (1 november 2019 tot 1 november 2020) zijn er 28 aardbevingen geregistreerd.

Figuur 5 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor verschillende magnitudeklassen. Het panel linksboven (groene kleur) laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M_L \geq 1,0$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2021 over de periode tot mei weergegeven is en dat er vanwege incompleetheid van de data voor 2014, er geen data van voor 2014 getoond is voor $M_L \leq 1,2$). Er zijn statistische aanwijzingen dat de dataset boven de $M_L = 1,2$ wel compleet zou kunnen zijn (ook voor de periode voor 2014), zie hiertoe ook de uiteenzetting in sectie 2.3. Dit is de reden dat deze geplotted is vanaf het jaar 2000 (paneel rechtsboven, paarse kleuren). Het linker paneel beneden (blauwe kleuren) laat bevingen zien met een magnitude van $M_L \geq 1,5$. Deze dataset is vrijwel zeker compleet vanaf 2000 en kan dus goed gebruikt worden om een historisch overzicht te geven van de seismische ontwikkeling. Het paneel rechts beneden tenslotte (in de rode kleuren), toont het aantal bevingen met een magnitude $M_L \geq 2,0$.

Tabel 4: Aantal waargenomen aardbevingen per maand het afgelopen jaar.

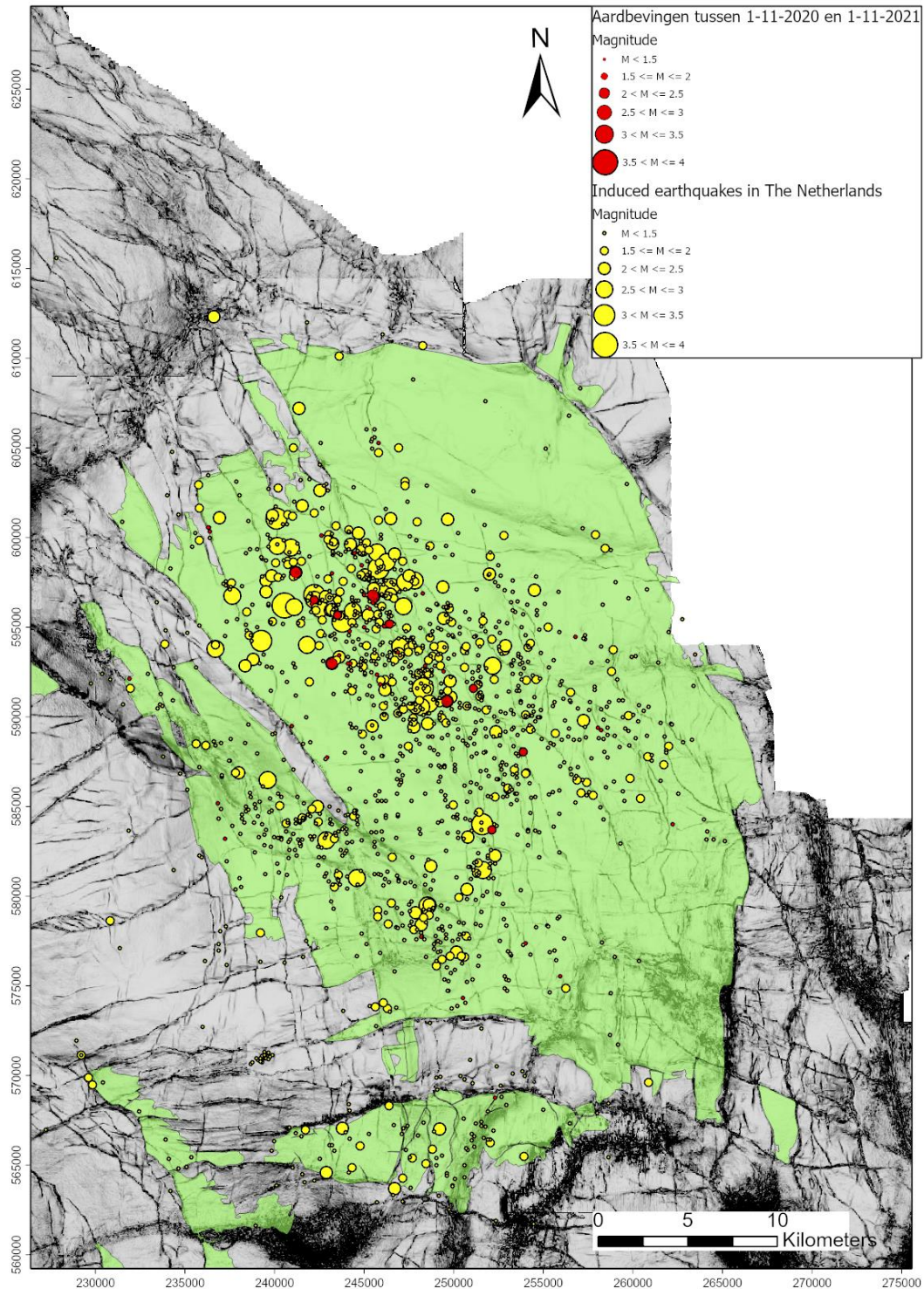
Maand	$1,0 \leq M_L < 1,5$	$1,5 \leq M_L < 2,0$	$2,0 \leq M_L < 2,5$	$M_L \geq 2,5$	Totaal
Nov-20	1	1	0	0	2
Dec-20	2	1	0	0	3
Jan-21	2	2	0	0	4
Feb-21	0	0	0	0	0
Mar-21	1	0	0	0	1
Apr-21	1	0	1	0	2
Mei-21	2	0	0	0	2
Jun-21	0	0	2	0	2
Jul-21	0	0	1	0	1
Aug-21	0	1	0	0	1
Sep-21	1	0	0	0	1
Okt-21	3	1	1	1	6
Tot Nov-Apr	7	4	1	0	12
Tot Mei-Okt	6	2	4	1	13
Totaal	13	6	5	1	25



Figuur 5: Aantal aardbevingen per jaar voor vier verschillende magnitude-klassen. Het aantal aardbevingen in 2021 is aangegeven voor de periode tot november 2021.

4.2 Distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld

De distributie van aardbevingen over het Groningen-gasveld is getoond op de kaart in Figuur 6. De locaties van de in de periode november 2020 tot november 2021 (12 maanden) geregistreerde aardbevingen vallen goed samen met de eerder geregistreerde aardbevingen.



Figuur 6: Kaart van de diepe ondergrond met daarop in groen het Groningen-gasveld en de omliggende gasvelden. Met rode stippen zijn de in de periode november 2020 tot november 2021 geregistreerde aardbevingen aangegeven. Alle aardbevingen zijn aangegeven met gele cirkels. De grootte van een cirkel is maat voor de magnitude van de aardbeving.

4.3 Statistische analyse naar de ontwikkeling aardbevingen

Verloop van het aantal bevingen door de tijd

Deze analyse is uitgevoerd om de statistische significantie van de ontwikkeling van de trend van het aantal aardbevingen per kwartaal te duiden.

Om dit inzichtelijk te maken zijn twee grafieken gemaakt van het aantal aardbevingen per kwartaal met betrouwbaarheidsintervallen van de te verwachten hoeveelheid aardbevingen; één onder de aanname dat de seismische events Poisson verdeeld zijn (Figuur 7); één onder de aanname dat de events quasi-Poisson verdeeld zijn (**Error! Reference source not found.**). De betrouwbaarheidsintervallen helpen bij de interpretatie van de data. Een seismisch relatief rustige periode kan het gevolg zijn van veranderingen in geproduceerde volumes, maar kan ook op toeval berusten.

De Poisson verdeling geeft een redelijke beschrijving van de data onder de aanname dat de bevingen ongecorreleerd zijn. Deze aanname is echter niet geheel correct omdat naschokken plaats vinden.

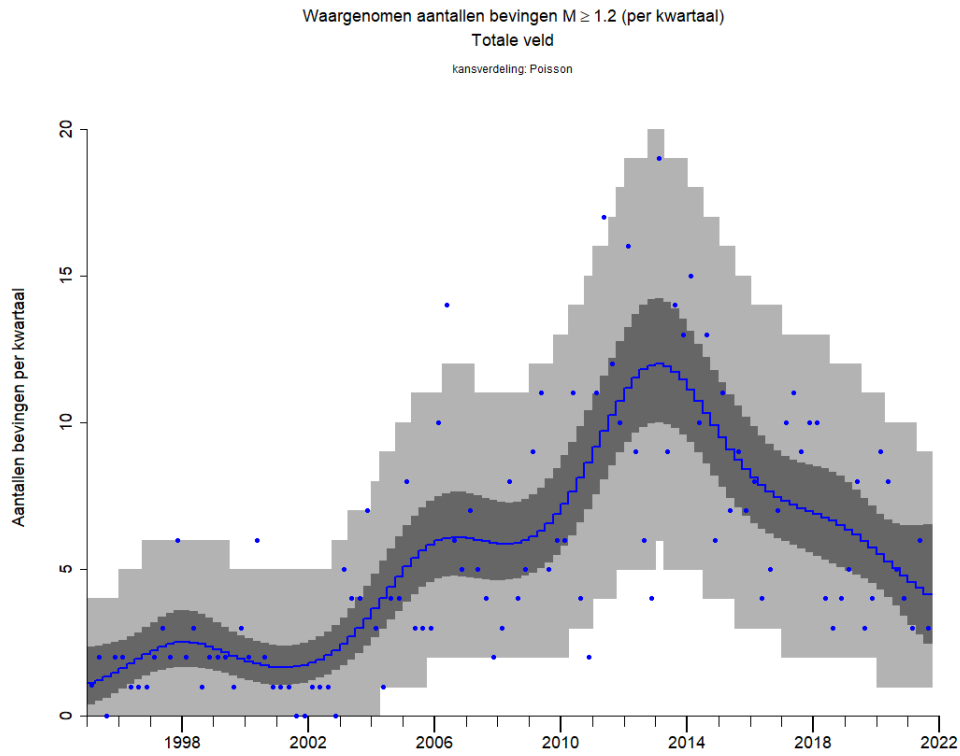
De quasi-Poisson kan gebruikt worden om een hogere mate (ten opzichte van de Poisson) aan variabiliteit in aantallen bevingen tussen kwartalen te beschrijven. Deze hogere mate van variabiliteit kan ontstaan door een bepaalde mate van correlatie tussen de events door naschokken.

De statistische analyse gebaseerd op de quasi-Poisson is meer robuust en resulteert in grotere onzekerheidsmarges. Beide plots bevatten de volgende informatie:

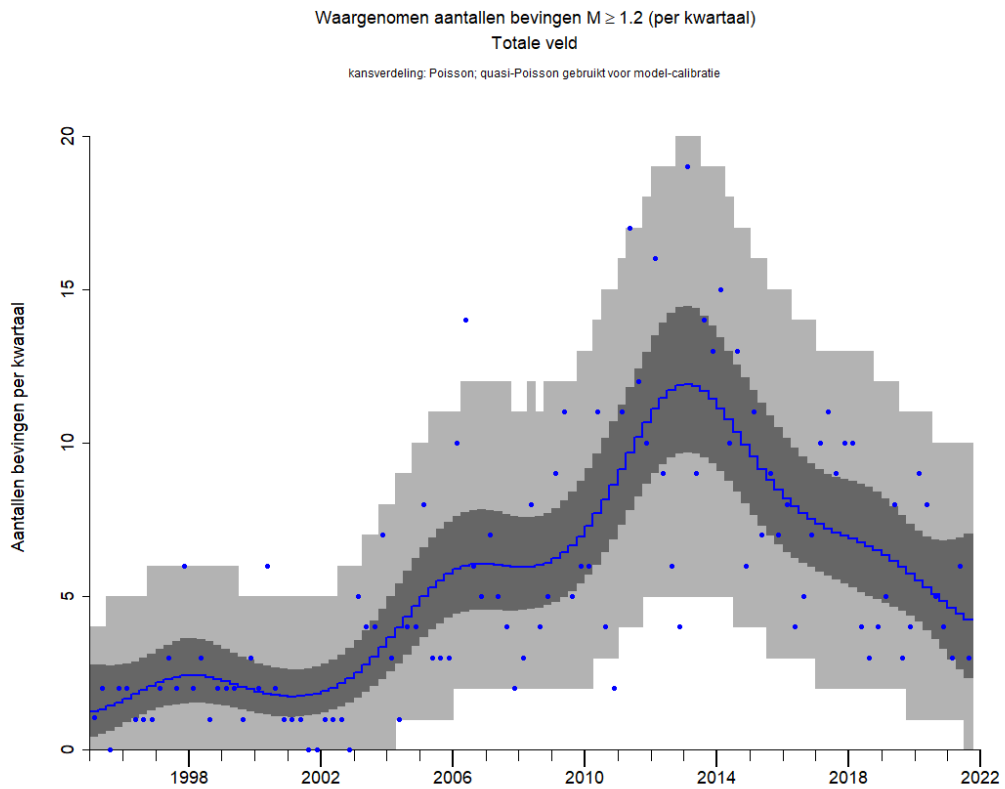
- Blauwe stippen voor het aantal seismische events dat kwartaal
- Een blauwe lijn die de trendlijn van het aantal te verwachten seismische events weergeeft
- Een donkergrijze band; het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn.
- Een lichtgrijze band; het 95% voorspellingsinterval van het aantal te verwachten events in dat kwartaal

Beide manieren van beschouwen van de data geven grofweg hetzelfde beeld. Het aantal aardbevingen nam toe in de periode van 2001 tot een maximum in 2012. Hierna laat het aantal bevingen een neergaande trend zien in de periode van 2013 tot 2021. Merk op dat de onzekerheidsbanden in 2019 mogelijk toenemen door grotere variatie van het aantal bevingen per kwartaal, maar dat de onzekerheid rondom de trend sowieso toeneemt, omdat er simpelweg minder datapunten nabij zijn om de trend uit af te leiden. De trend voor de laatste maanden is met minder zekerheid af te leiden dan de trend op een punt waar alle data twee jaar ervoor en er na bekend is.

Uit deze analyse is te concluderen dat er statistisch bewijs is dat de frequentie van het voorkomen van aardbevingen een neergaande trend laat zien.



Figuur 7: Trend en betrouwbaarheidsinterval het aantal bevingen per kwartaal, bij Poisson verdeelde seismische events.



Figuur 8: Trend en betrouwbaarheidsinterval van het aantal bevingen per kwartaal, bij quasi-Poisson verdeelde seismische events.

Verband productie en seismiciteit per productie locatie cluster

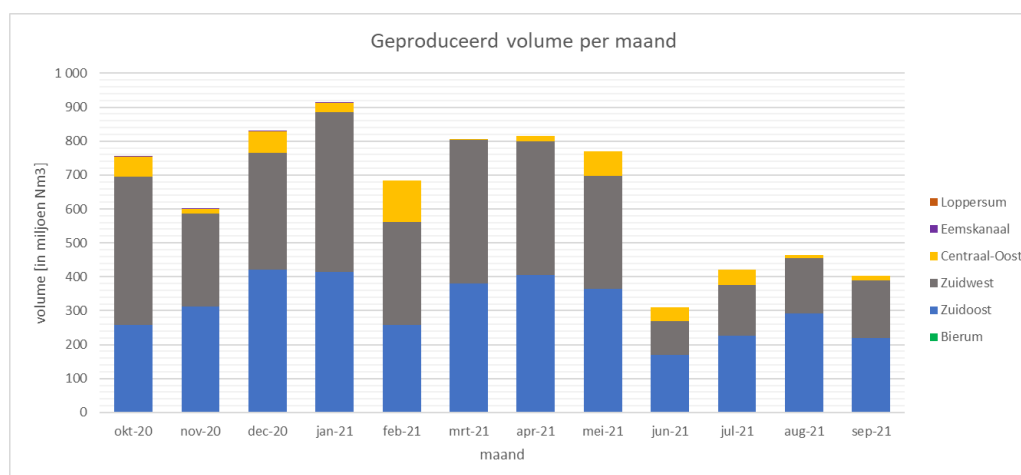
In welke mate de over een korte periode waargenomen variaties in de seismische monitoringsparameters een gevolg zijn van de wijze van opereren, van de lagere geproduceerde volumes of van de natuurlijke variabiliteit in seismiciteit is niet direct vast te stellen. Er zijn modellen opgesteld waarmee seismische dreiging en risico kunnen worden geanalyseerd. Meer informatie hierover kan gevonden worden in verschillende rapporten die van de NAM-site te downloaden zijn (Ref 10, 11, 12, 13 and 14).

Het Groningen-gasveld is onderverdeeld in een aantal clusters zoals beschreven in de Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1. In Tabel 5 is de verdeling van productielocaties per cluster opgenomen.

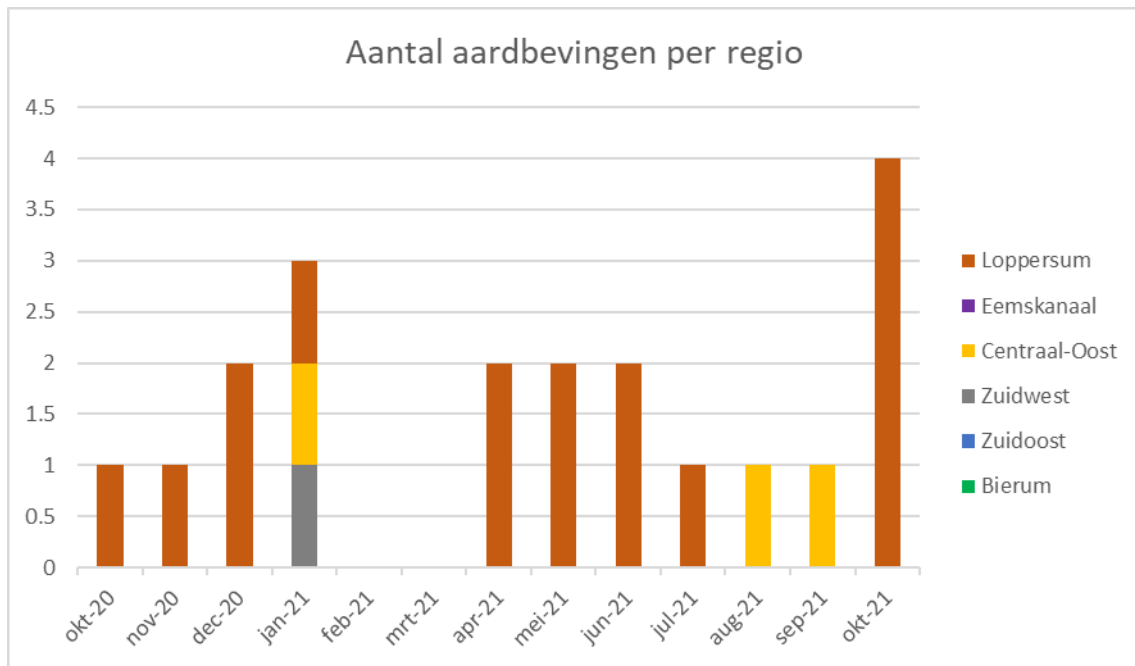
Tabel 5: Overzicht productielocaties per cluster volgens Mijnbouwregeling artikel 1.3a.1.

Cluster	Productielocatie	Cluster	Productielocatie
Eemskanaal	Eemskanaal	Zuidwest	Zuiderveen
Bierum	Bierum		Spitsbergen
Loppersum	Leermens		Tusschenklappen/Sappemeer
	Overschild		Kooipolder
	De Paauwen		Slochteren/Froombosch
	Ten Post		
Zuidoost	't Zandt	Centraal-Oost	Oudeweg
	Zuiderpolder		Schaapbulten
	De Eeker		Amsweer
	Scheemderzwaag		Siddeburen
			Tjuchem

In Figuur 9 is de productie per cluster van productielocaties opgenomen over het voorgaande jaar. De productie uit het Loppersum cluster is per februari 2018 beëindigd. In Figuur 10 is het aantal aardbevingen van magnitude $M_L \geq 1,2$ geplot per cluster. Hoewel er geen gas wordt geproduceerd uit het Loppersum cluster is het aantal geregistreerde aardbevingen in dit cluster het hoogst.



Figuur 9: Geproduceerd volume per maand per cluster

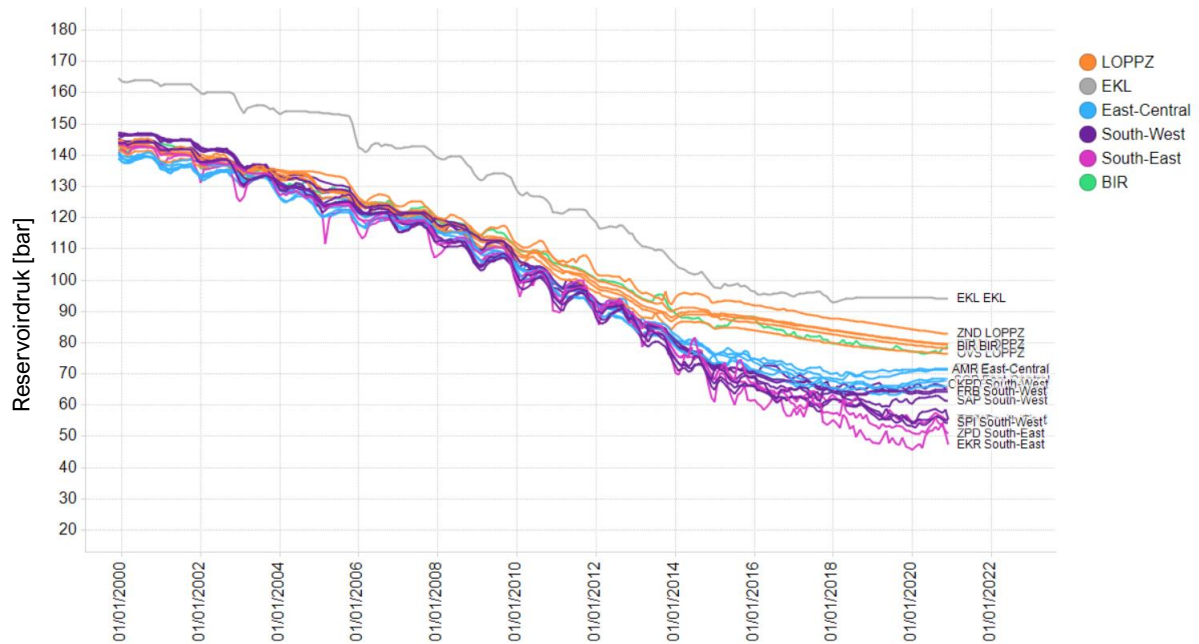


Figuur 10: Aantal aardbevingen per cluster

In Figuur 11 is de reservoirdruk per cluster weergegeven. In deze figuur is duidelijk zichtbaar dat de druk in de cluster van productielocaties rond Loppersum blijft dalen (oranje lijn), ook sinds de productie vanuit deze cluster is gestaakt in februari 2018. Deze daling van reservoirdruk in de cluster Loppersum is een gevolg van herverdeling van de reservoirdruk als gevolg van productie uit andere delen van het veld en de drukgradiënt over het veld die daardoor is ontstaan sinds het verminderen van de Loppersum productie in 2014. Deze reservoirdruk daling is de verklaring voor de toenemende aardbevingsdichtheid in de cluster Loppersum.

Figuur 11 toont dat de reservoirdruk in de cluster Centraal-Oost (blauwe lijnen, elke productie locatie wordt weergegeven door een aparte lijn) na 2018 stabiliseert en zelfs toeneemt ondanks de gasproductie uit dit cluster. De stijging is ook een gevolg van de herverdeling van de reservoirdruk. Of de aardbevingsdichtheid in de cluster Centraal-Oost is laag, of dat de reservoirdruk stijging een effect heeft op de aardbevingsdichtheid, zie Figuur 12, is niet met zekerheid te concluderen.

Informatie over het verband tussen de seismiciteit, productievolumes en manier van opereren kan gevonden worden in de Hazard and Risk Analyses (Ref 6, 7 en 8).



Figuur 11: Reservoir drukdaling in Groninger gasveld op basis van het gekalibreerde Groningen reservoirmodel. Merk op dat de druk in de cluster Loppersum (LOPPZ) ook bij verminderde en stilgelegde productie daalt.

Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over tijd

De maximumwaarde van de aardbevingsdichtheid als functie van de tijd over het gehele veld en per deelgebied is weergegeven in Figuur 12. Duidelijk zichtbaar is de hogere maximale aardbevingsdichtheid in de periode van 2012 tot 2014 over het veld en in het gebied Loppersum in het bijzonder. Sinds het eind van 2018 is de aardbevingsdichtheid over het gehele veld laag vergeleken met voorgaande jaren. Uitzondering op deze trend is de recente stijging (4 oktober 2021) van de aardbevingsdichtheid in het gebied Loppersum. De gebieden tussen de verschillende grenswaarden voor rapportage en analyse op basis van aardbevingsdichtheid volgens de Mijnbouwwet zijn aangegeven in de kleuren groen, geel en rood.

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021



Figuur 12: De ontwikkeling van aardbevingsdichtheid over de jaren in het gehele Groningen-gasveld en kleinere gebieden binnen het Groningen-gasveld, weergegeven in aantal bevingen met een $M_L > 1,2$ per km² per jaar. De achtergrondkleur geeft het niveau van de seismiciteit weer, groen: lage activiteit, geel: bovengemiddelde activiteit en rood: hoge activiteit

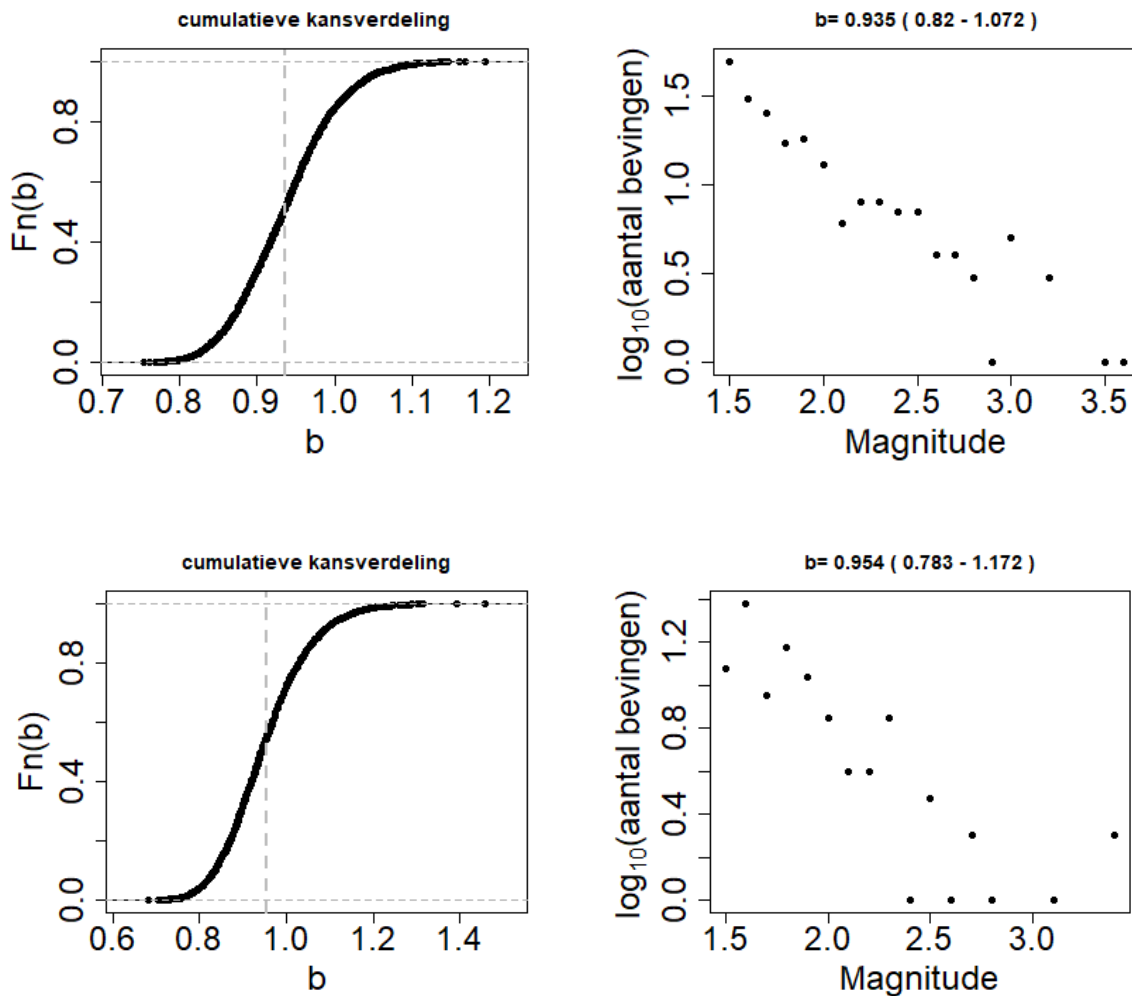
Verhouding tussen grote en kleine bevingen

De verhouding tussen grote en kleine bevingen wordt beschreven met de methode Gutenberg-Richter (Ref. 3).

Figuur 13 heeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor het veld weer. De b-waarde is maat voor de frequentie relatie tussen aardbevingen met verschillende magnitudes. De b-waarden zijn gegeven in Tabel 6. Zichtbaar is dat over het hele veld de b-waarde over de periode vanaf 2015 heel licht lijkt te zijn toegenomen ten opzichte van de periode ervoor. Door het relatief lage aantal aardbevingen is het betrouwbaarheidsinterval groot en daardoor is niet te zeggen of dit daadwerkelijk een trend is of slechts een statistische variatie zonder onderliggende fysische grondslag.

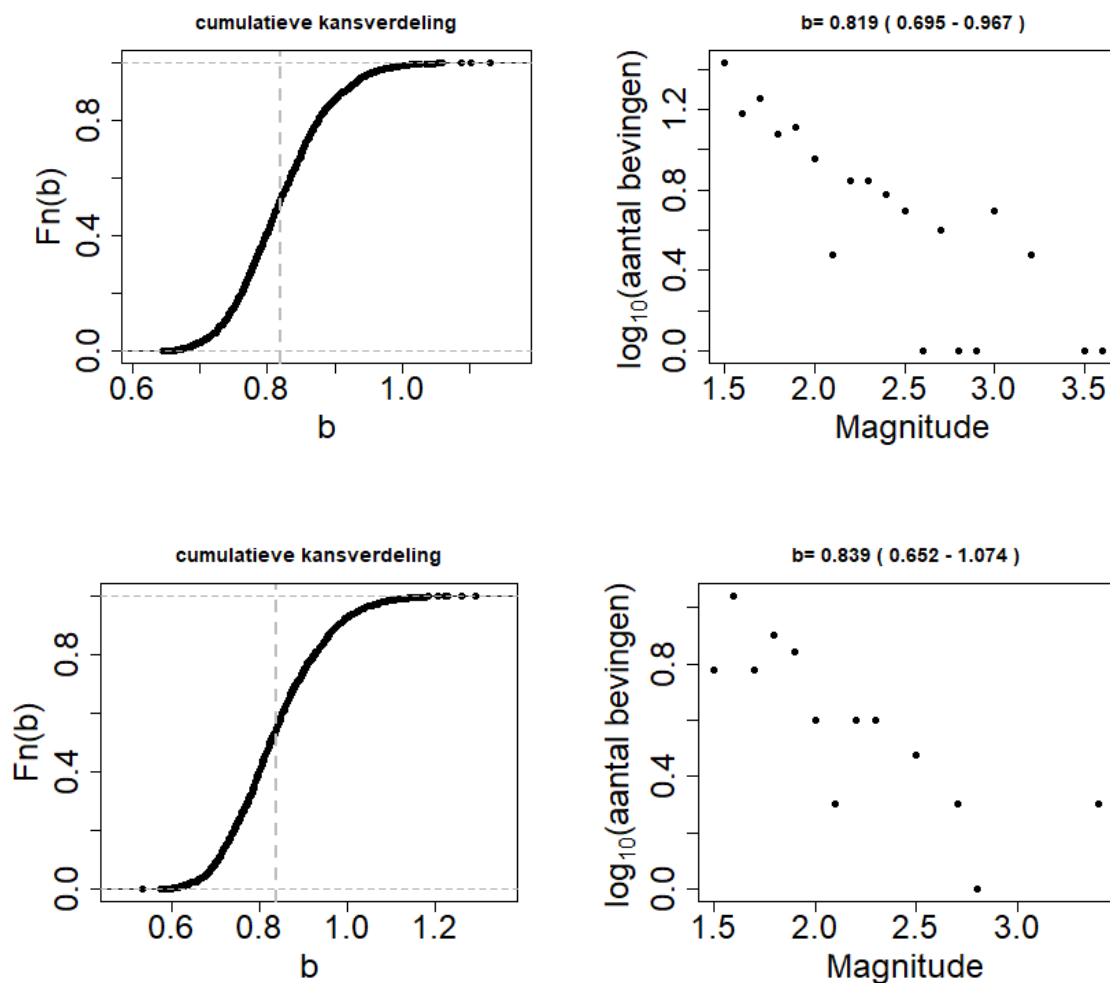
Tabel 6: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het hele Groninger veld

Totale gebied Groningen		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2021
P _{2.5%}	0,82	0,78
P _{50%}	0,94	0,95
P _{97.5%}	1,07	1,17



Figuur 13: Gutenberg Richter plots voor het hele Groningen-gasveld. Bovenste panelen: Periode 2000 tot 2015. Onderste panelen: periode januari 2015 tot en met oktober 2021

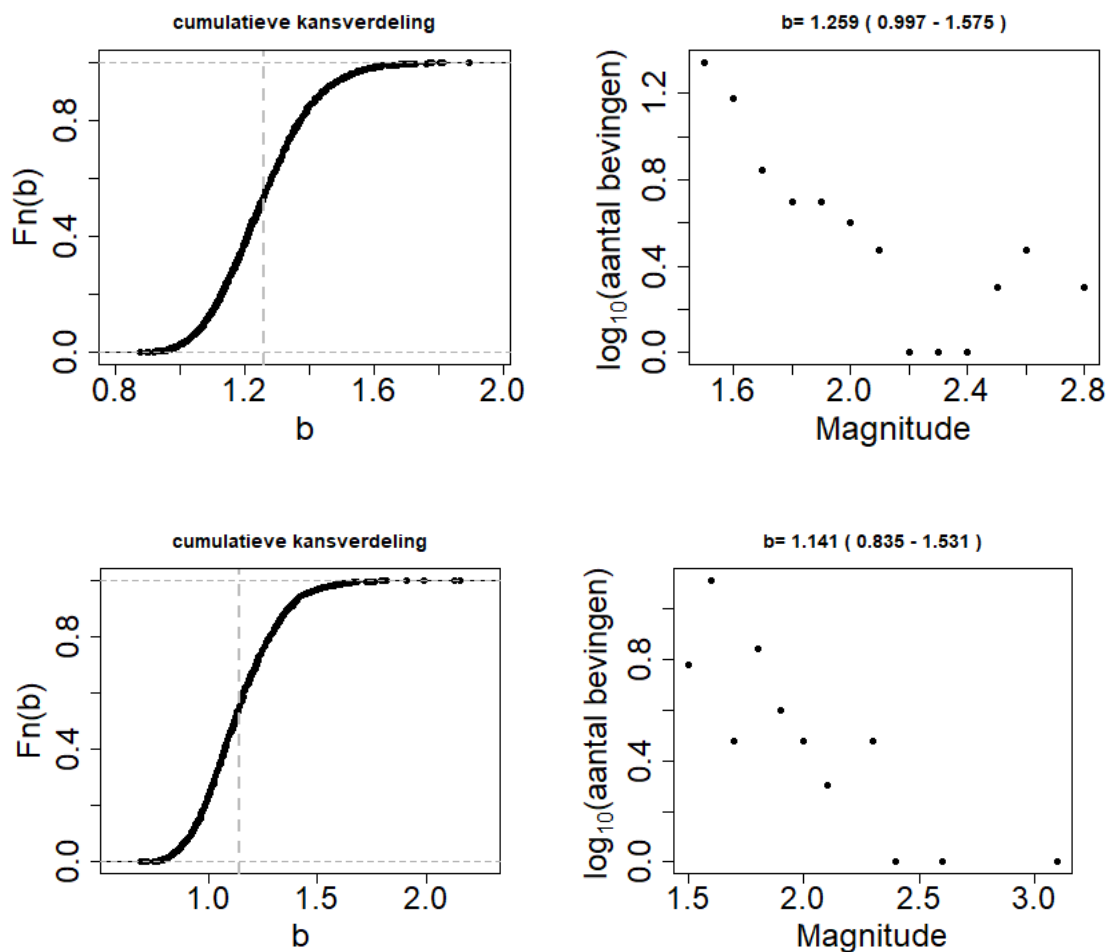
Figuur 13 en Figuur 14 geven twee Gutenberg-Richter plots voor respectievelijk de omgeving van Loppersum en het gehele veld exclusief de omgeving van Loppersum weer. In Tabel 7 en Tabel 8 zijn de b-waarden met hun betrouwbaarheidsintervallen weergegeven. Over beide beschouwde periodes zijn de b-waarden lager in Loppersum dan in de rest van het Groningen-gasveld. In Loppersum is het aantal aardbevingen met grotere magnitude dus relatief groot ten opzichte van het aantal aardbevingen met lagere magnitude. De b-waarde lijkt toegenomen te zijn in de recente periode; de $P_{50\%}$ b-waarde van de periode vanaf 2015 ligt binnen het $P_{2.5\%}$ en $P_{97.5\%}$ betrouwbaarheidsinterval van de periode ervoor. De betrouwbaarheidsintervallen zijn echter dusdanig groot dat niet met zekerheid te zeggen is of de b-waarde daadwerkelijk toegenomen is. In de rapportage van mei 2019 (Ref. 11) is een hypothesetest gedaan naar deze theorie en daaruit bleek dat de geobserveerde waarde waarschijnlijk het resultaat is van natuurlijke variabiliteit.



Figuur 14: Gutenberg Richter plots voor de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode januari 2000 tot en met december 2014. Onderste panelen: periode januari 2015 tot oktober 2021

Tabel 7: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen in het gebied rond Loppersum

Gebied Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2021
P _{2.5%}	0,70	0,66
P _{50%}	0,82	0,84
P _{97.5%}	0,97	1,07



Figuur 15: Gutenberg Richter plots voor het gehele veld exclusief de cluster Noordwest (het gebied rond Loppersum). Bovenste panelen: Periode 2000 - 2014. Onderste panelen: 2015 - 2021

Tabel 8: Betrouwbaarheidsintervallen van verschillende b-waarden waargenomen over het gehele veld exclusief de cluster Loppersum

Gehele veld exclusief Loppersum		
Percentiel van betrouwbaarheidsinterval	2000-2014	2015-2021
P _{2.5%}	1,00	0,84
P _{50%}	1,26	1,14
P _{97.5%}	1,58	1,55

In Tabel 9 zijn voor de eerder genoemde gebieden de b-waarden opgenomen. De b-waarde voor het hele veld lijkt voor de periode vanaf 2015 licht te zijn toegenomen ten opzichte van de periode ervoor. Dus het aantal bevingen met lagere magnitudes is relatief gezien groter dan aardbevingen met hogere magnitudes.

Tabel 9 Overzicht van de b-waarde ($P_{50\%}$) voor het gehele veld, het gebied Loppersum en het gehele veld exclusief het gebied Loppersum.

	b-waarde ($P_{50\%}$) 2000-2014	b-waarde ($P_{50\%}$) 2015-2021
Gehele Groningen-gasveld	0,94	0,95
Gebied Loppersum	0,82	0,84
Gehele veld exclusief Loppersum	1,26	1,14

4.4 De aardbevingenreeks op 4 oktober en volgende dagen

Op 4 oktober 2021 zijn drie aardbevingen geregistreerd. Twee hiervan waren in Zeerijp en hadden een magnitude van $M=2,5$ en $M=2,2$ op de Richterschaal respectievelijk. De derde aardbeving met een magnitude van $M=1,8$ was bij Appingedam. In de er op volgende twee weken zijn er nog drie aardbevingen geregistreerd bij Zeerijp. Tabel 10 geeft een overzicht van deze aardbevingenreeks.

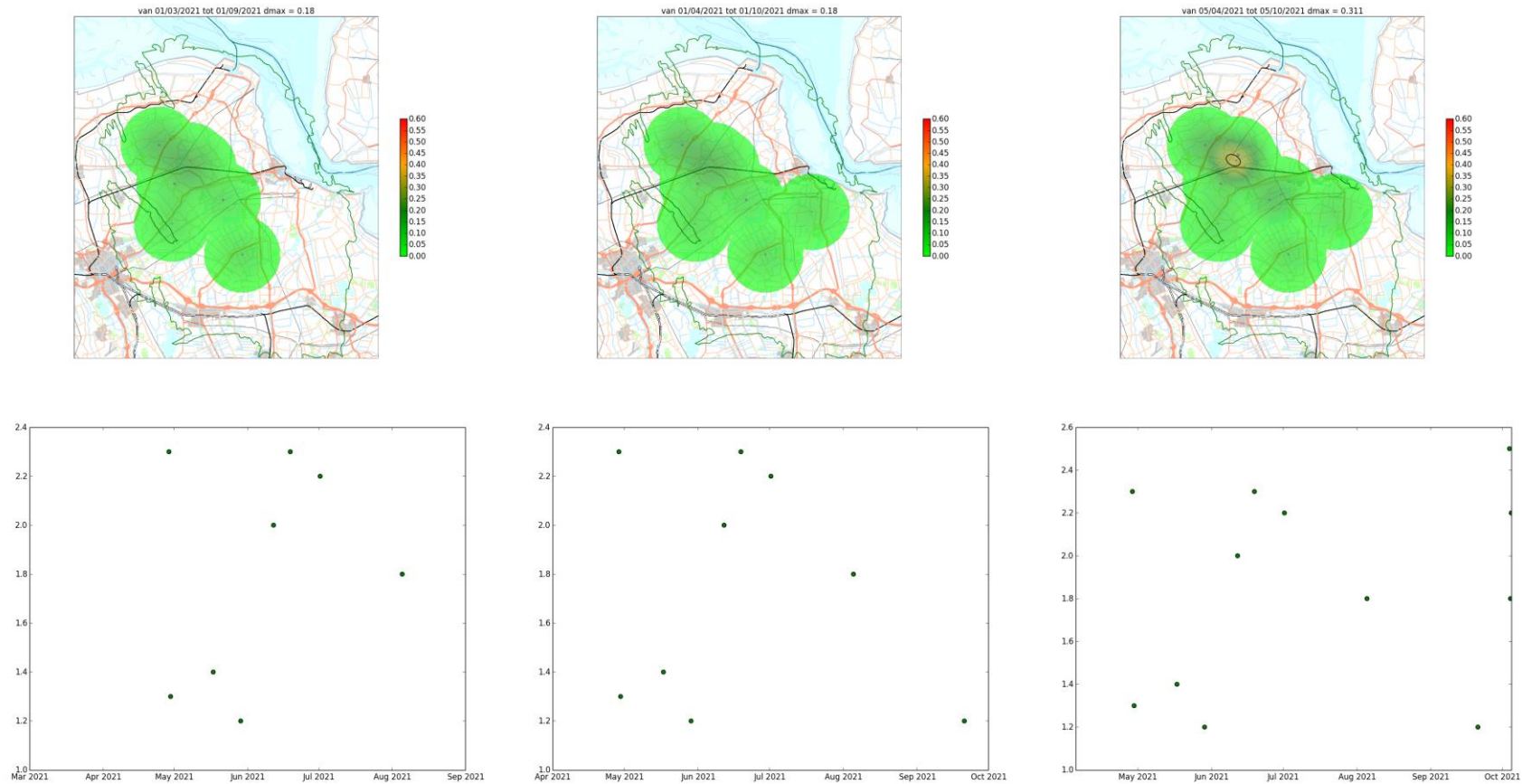
Tabel 10 Overzicht van de aardbevingenreeks die begon op 4 oktober 2021

Datum (UTC)	Tijd (UTC)	Tijd (CEST)	Locatie	Magnitude
4 okt 2021	02:59:08	04:59	Zeerijp	2,5
4 okt 2021	13:33:45	15:33	Appingedam	1,8
4 okt 2021	20:47:42	22:47	Zeerijp	2,2
6 okt 2021	18:57:56	20:57	Zeerijp	1,3
7 okt 2021	11:53:20	13:53	Zeerijp	0,6
15 okt 2021	15:04:21	17:04	Zeerijp	1,1

Omdat deze aardbevingen voornamelijk dicht bij elkaar rond Zeerijp plaatsvonden had dit een aanzienlijke invloed op de aardbevingsdichtheid rond Zeerijp. De derde aardbeving van deze reeks heeft het maximum van de aardbevingsdichtheid hoger doen uitkomen dan de signaalwaarde van 0,3 (deze was na de derde beving 0,31). Er was daardoor sprake van “verhoogde seismiciteit”. Volgens de Mijnbouwwet (Artikel 1.3a.6 - lid c) moet NAM dit binnen 48 uur melden aan SodM. NAM heeft dit de volgende dag aan SodM gemeld. Figuur 16 en Figuur 17 tonen de ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid gedurende oktober 2021. Deze figuren tonen de aardbevingsdichtheid op 1 september 2021, 1 oktober 2021, 5 oktober 2021 en 1 november 2021. In Figuur 18 wordt de trend parameter voor het aantal aardbevingen getoond voor 1 november 2021.

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021

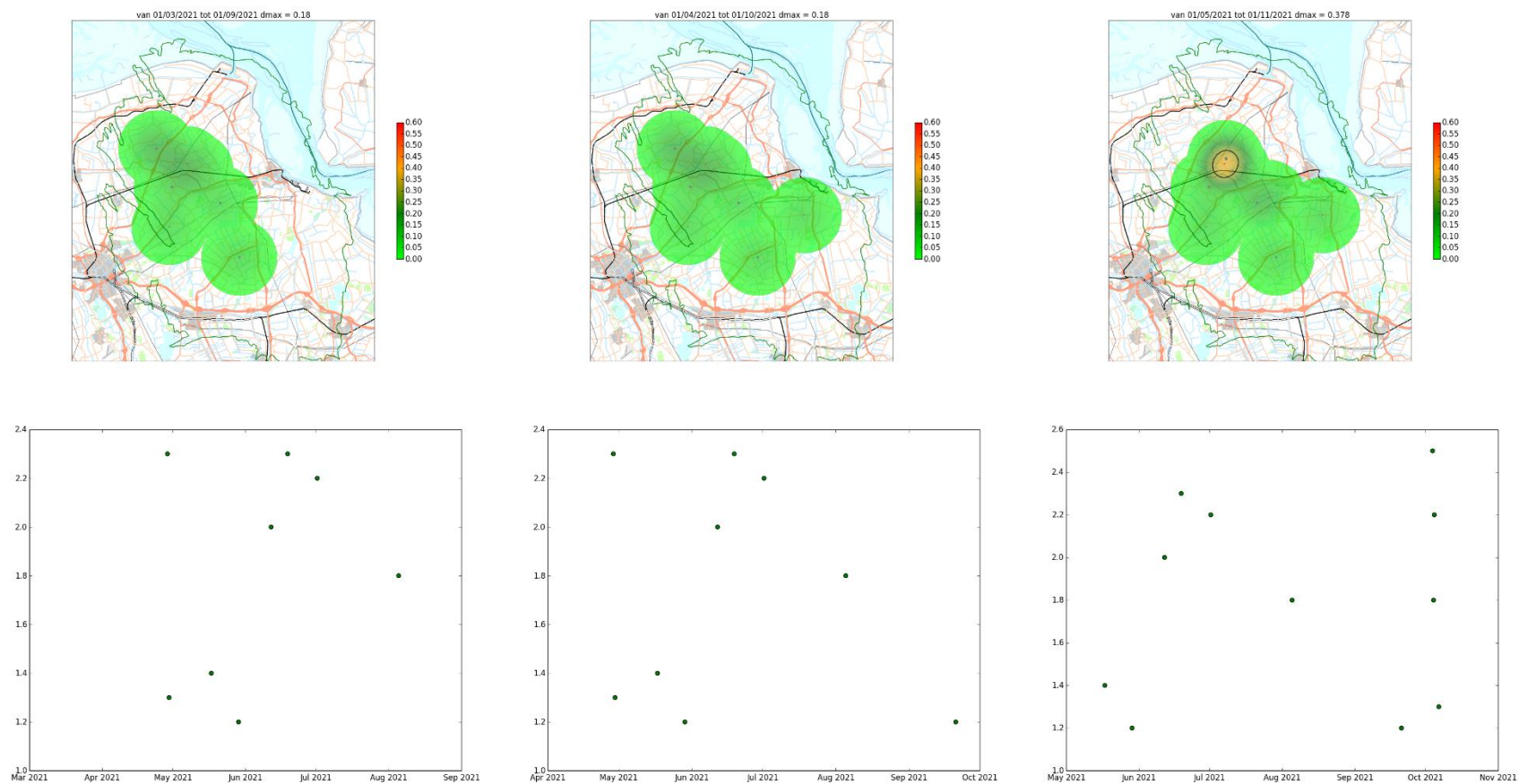
Aardbevings dichtheid in bevingen/km² /jaar (M >=1.2)



Figuur 16: Dit paneel toont de aardbevingsdichtheid (boven) en magnitude van aardbevingen tegen tijd (onder) voor drie verschillende tijdsperiodes. Links wordt dit getoond voor de 6 maanden voorafgaand aan 1 september 2021, in het midden voor de 6 maanden voorafgaand aan 1 oktober 2021 en rechts voorafgaand aan 5 oktober.

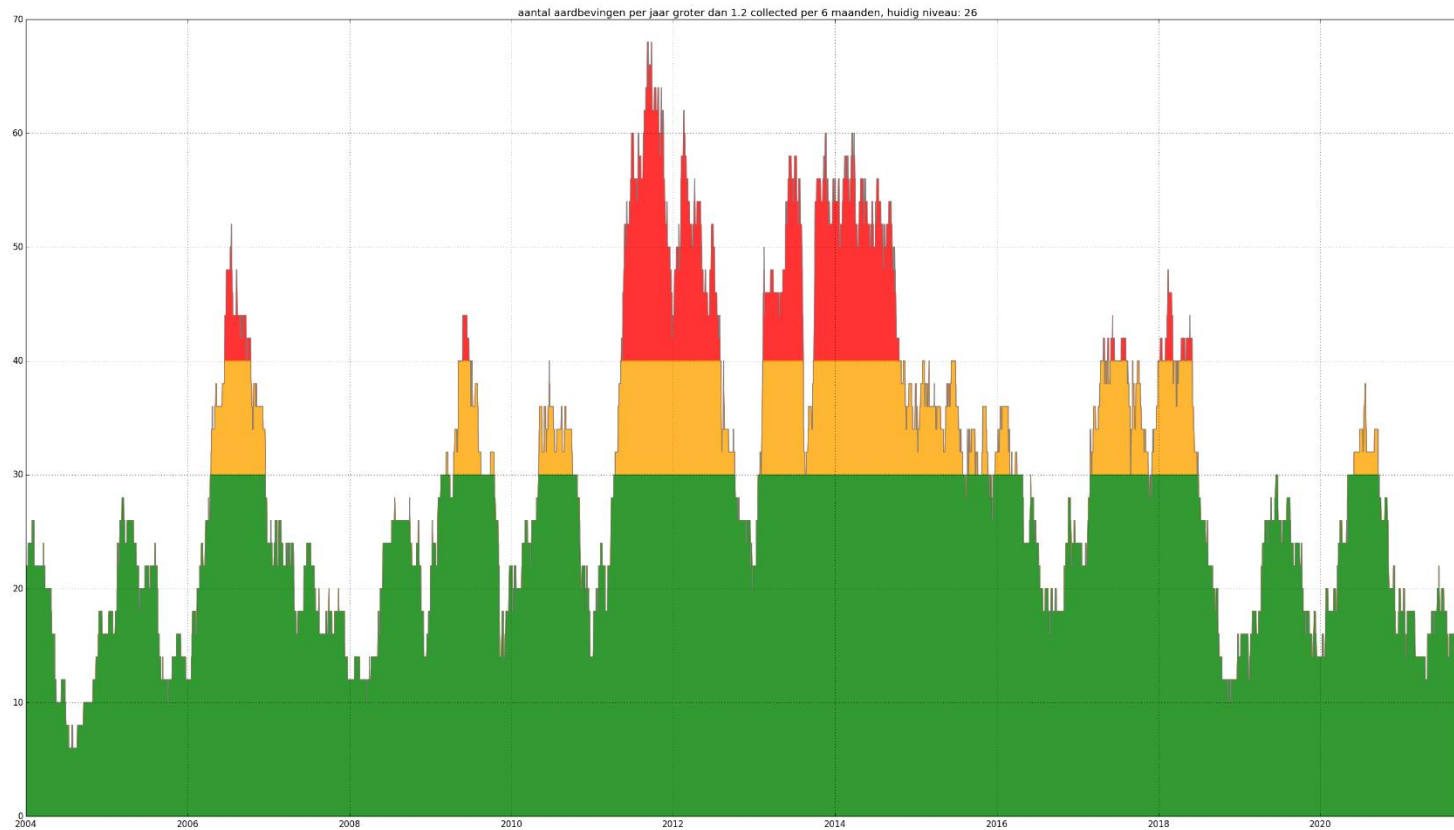
RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021

Aardbevings dichtheid in bevingen/km²/jaar (M >=1.2)



Figuur 17: Dit paneel toont de aardbevingsdichtheid (boven) en magnitude van aardbevingen tegen tijd (onder) voor drie verschillende tijdsperiodes. Links wordt dit getoond voor de 6 maanden voorafgaand aan 1 september 2021, in het midden voor de 6 maanden vooraf gaand aan 1 oktober 2021 en rechts voorafgaand aan 1 november.

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021



Figuur 18: De trendparameter voor het aantal aardbevingen voor de periode eindigend op 1 november 2021.

Gebruikmakend van de geautomatiseerde ‘Full-waveform Inversion’ (FWI) methode zijn zowel het hypocentra als het bronmechanismen van deze aardbevingen bepaald. De resultaten voor de hypocentra van deze aardbevingen zijn samengevat in tabel 11, terwijl de uitgebreide resultaten voor zowel hypocentra als bronmechanisme, aan deze rapportage zijn toegevoegd als appendices B tot G.

Tabel 11: Overzicht van de hypocentra voor de aardbevingenreeks die begon op 4 oktober 2021

File	Datum	Locatie	Northing (m)	Easting (m)	Depth (m)	Appendix
39	4 oktober 2021	Zeerijp	596750	245550	3000	B
40	4 oktober 2021	Appingedam	591500	251150	2850	C
41	4 oktober 2021	Zeerijp	596700	245550	3050	D
42	6 oktober 2021	Zeerijp	596600	245450	2850	E
43	7 oktober 2021	Zeerijp	596650	245550	3000	F
46	22 oktober 2021	Zeerijp	596400	245550	2850	G

Uit deze geautomatiseerde FWI-analyses blijkt dat de epicentra van de twee aardbevingen bij Zeerijp zeer dicht bij elkaar liggen. De dieptes van het hypocentra van de drie aardbevingen liggen rond de drie kilometer. Ook de oriëntaties van het bronmechanisme komen goed overeen. De aardbevingen hebben waarschijnlijk plaatsgevonden op dezelfde breuk. Vier van de Zeerijp aardbevingen in deze reeks hebben een epicentrum binnen een cirkel met een straal van 150 m (Tabel 12).

Tabel 12: Overzicht van de afstand van de hypocentra voor de aardbevingenreeks die begon op 4 oktober 2021 tot de centrale locatie (N: 596620, E: 245530, D: 2950).

File	Datum	Locatie	Horizontale afstand tot de centrale locatie	Horizontale afstand tot de centrale locatie
39	4-okt-21	Zeerijp	132	141
41	4-okt-21	Zeerijp	82	130
42	6-okt-21	Zeerijp	82	130
43	7-okt-21	Zeerijp	36	62
46	22-okt-21	Zeerijp	221	242

Deze aardbevingenreeks kan ook geanalyseerd worden met de zogenaamde Empirische Green’s function methode (Ref. 15). Dit zou voor de grotere aardbevingen een beeld kunnen geven van de ontwikkeling van de aardbevingsbeweging langs de breuk. Dit is echter een complexe analyse, die meer tijd vergt dan beschikbaar voor deze halfjaarlijkse rapportage. De analyse is inmiddels begonnen, en zal waarschijnlijk begin 2022 worden gerapporteerd. Voorlopige resultaten zullen in de speciale rapportage worden opgenomen.

5 Referenties

1. Special Report on the Loppersum ML 2.7 Earthquake of 14th June 2020, NAM, Jan van Elk en Jeroen Uilenreef, August 2020.
2. Advies over de actualisatie van de trendparameters en de bijbehorende grenswaarden in artikel 1.3a van de Mijnbouwregeling, SodM, 16 juni 2020.
3. Magnitude and Energy of Earthquakes. B. Gutenberg, C.F. Richter. *Annali di Geofisica*. 9: 1-15, 1956.
4. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. Wiemer, Stefan en Wyss, Max. 4, 2000, *Bulletin of the Seismological Society of America*, pp. 859-869.
5. Seismic Risk Assessment for a selection of Gas Production Scenarios for the Groningen field. Jan van Elk, Assaf Mar-Or, Leendert Geurtsen, Per Valvatne, Eddy Kuperus, Dirk Doornhof. 2018.
6. Induced Seismicity in Groningen - Assessment of Hazard, Building Damage and Risk. Jan van Elk, Dirk Doornhof. 2017.
7. Hazard and Risk Assessment Groningen GTS - Raming 2020. Van Elk, Jan, et al. 2020.
8. Analyse overschrijding trendparameter Aardbevingsdichtheid. NAM. 3 december 2019.
9. Online NAM Feiten en cijfers. <https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen>.
10. Rapportage Seismiciteit Groningen November 2020. NAM. mei 2019.
11. Development of probabilistic seismic hazard assessment for the Groningen gas field. Dost, B., E. Ruigrok & J. Spetzler (2017). *Netherlands Journal of Geoscience* 96, s235–s245.
12. Updated empirical GMPEs for PGV from Groningen earthquakes. Bommer, J. J., P. J. Stafford, and M. Ntinalexis (2019). 10 March 2019
13. Developing an application-specific ground-motion model for induced seismicity. Bommer, J.J., B. Dost, B. Edwards, P.J. Stafford, J. van Elk, D. Doornhof & M. Ntinalexis (2016). *Bulletin of the Seismological Society of America* 106(1), 158-173.
14. Framework for a ground-motion model for induced seismic hazard and risk analysis in the Groningen gas field. Bommer, J.J., P.J. Stafford, B. Edwards, B. Dost, E. van Dedem, A. Rodriguez-Marek, P. Kruiver, J. van Elk, D. Doornhof & M. Ntinalexis (2017a). *The Netherlands. Earthquake Spectra* 33(2), 481-498.
15. Empirical Green's Functions analysis of some induced earthquake pairs from the Groningen gasfield, Steve Oates, Jelena Tomic, Brian Zurek, Tom Piesold and Ewoud van Dedem, August 2020.

Appendix A - Aardbevingscatalogus 1 november 2020 tot 1 november 2021

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte_km	Easting	Northing	Veld
Garrelsweer	5-nov-20	22:27:58	0,5	3	246878	593608	Groningen
Garsthuizen	16-nov-20	04:53:59	1,1	3	244442	599128	Groningen
Westeremden	26-nov-20	13:23:52	1,6	3	242225	596527	Groningen
Loppersum	28-nov-20	19:44:42	0,7	3	244190	594782	Groningen
Sappemeer	13-dec-20	15:24:13	0,8	3	250526	574310	Groningen
Rottum	15-dec-20	02:57:19	1,0	3	236295	600541	Groningen
Rottum	16-dec-20	01:03:49	0,5	3	236366	600320	Groningen
Rottum	19-dec-20	06:24:10	1,3	3	236362	600542	Groningen
Westeremden	21-dec-20	09:29:31	1,8	3	243507	595660	Groningen
Zuidbroek	28-dec-20	02:09:54	0,6	3	254010	577386	Groningen
Sappemeer	10-jan-21	22:39:08	1,3	3	248185	577715	Groningen
Tjuchem	24-jan-21	09:35:05	1,9	3	253857	588069	Groningen
Loppersum	27-jan-21	13:26:49	1,9	3	246448	595158	Groningen
Leermens	28-jan-21	02:40:50	0,2	3	248281	596863	Groningen
Stedum	31-jan-21	18:47:51	1,0	3	244223	593001	Groningen
Nieuwolda	21-feb-21	08:50:07	0,7	3	262223	584018	Groningen
Loppersum	13-mrt-21	06:00:50	0,6	3	244985	595019	Groningen
Wirdum	31-mrt-21	01:24:59	1,0	3	249533	590765	Groningen
Loppersum	2-apr-21	01:41:12	0,8	3	243614	593435	Groningen
Huizinge	28-apr-21	19:46:26	2,3	3	241198	598066	Groningen
Huizinge	29-apr-21	12:44:56	1,3	3	241265	598067	Groningen
Groningen	1-mei-21	17:43:29	0,8	3	237257	583192	Groningen
Loppersum	17-mei-21	12:28:58	1,4	3	245298	596026	Groningen
Wirdum	26-mei-21	15:57:42	0,6	3	248425	592858	Groningen

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte_km	Easting	Northing	Veld
Ten Boer	29-mei-21	02:55:20	1,2	3	242919	587745	Groningen
Westeremden	29-mei-21	07:34:51	0,6	3	242096	596301	Groningen
Uithuizermeeden	30-mei-21	04:08:00	0,3	3	245789	605275	Groningen
Loppersum	11-jun-21	23:29:27	2,0	3	246381	595156	Groningen
Stedum	19-jun-21	00:14:29	0,9	3	243154	593092	Groningen
Stedum	19-jun-21	01:03:55	2,3	3	243223	592982	Groningen
Wirdum	1-jul-21	15:38:14	2,2	3	249597	590877	Groningen
Wirdum	1-jul-21	20:07:30	0,4	3	249462	590986	Groningen
Winneweer	14-jul-21	04:10:36	0,2	3	245701	592361	Groningen
Muntendam	18-jul-21	06:58:32	0,3	3	255921	575532	Groningen
Garsthuizen	5-aug-21	06:33:40	0,6	3	243197	597991	Groningen
Hellum	5-aug-21	07:14:45	1,8	3	252143	583692	Groningen
Groningen	6-aug-21	03:52:40	0,6	3	236823	585188	Groningen
Meedhuizen	9-aug-21	19:35:30	0,9	3	258033	589381	Groningen
Stedum	19-aug-21	22:25:23	0,3	3	244089	592998	Groningen
Wirdum	26-aug-21	21:19:42	0,9	3	249431	592544	Groningen
Loppersum	5-sep-21	11:44:13	0,3	3	246117	595040	Groningen
Delfzijl	14-sep-21	01:26:52	0,4	3	256791	594476	Groningen
Zeerijp	18-sep-21	19:07:38	0,9	3	245623	596478	Groningen
Meedhuizen	20-sep-21	20:51:08	1,2	3	258236	589274	Groningen
Overschild	29-sep-21	22:20:33	0,8	3	249666	590767	Groningen
Zeerijp	4-okt-21	02:59:08	2,5	3	245552	596699	Groningen
Appingedam	4-okt-21	13:33:45	1,8	3	251117	591575	Groningen
Zeerijp	4-okt-21	20:47:42	2,2	3	245484	596809	Groningen
Zeerijp	6-okt-21	18:57:56	1,3	3	245488	596587	Groningen
Zeerijp	7-okt-21	11:53:20	0,6	3	245548	596922	Groningen

RAPPORTAGE SEISMICITEIT GRONINGEN – NOVEMBER 2021

Plaats	Datum	Time hh:mm:ss	Magnitude	Diepte_km	Easting	Northing	Veld
Zeerijp	15-okt-21	15:04:21	1,1	3	244853	598467	Groningen
Sint Annen	18-okt-21	16:56:55	1,1	3	240952	589490	Groningen
Zeerijp	22-okt-21	21:11:20	0,8	3	245492	596364	Groningen
Eppenhuisen	27-okt-21	00:28:00	0,5	3	242626	600096	Groningen
Zeerijp	27-okt-21	09:13:39	0,4	3	245017	596800	Groningen
Garrelsweer	31-okt-21	21:36:42	0,7	3	245911	591808	Groningen

Appendix B – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 2,5 bij Zeerijp op 4 oktober

Hier volgt een evaluatie van de opnames gemaakt met het seismisch meetnet geopereerd door KNMI van de aardbeving bij Zeerijp op 4 oktober. De evaluatie is gemaakt door het laboratorium van Shell in Amsterdam gebruikmakend van de geautomatiseerde Full-Wave-Form inversie.

Aan deze aardbeving is nummer 39 toegekend.



Event 39 - Zeerijp

04 October 2021 02:59:08

4 October 2021

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	04 October 2021
Time	02:59:08.525000

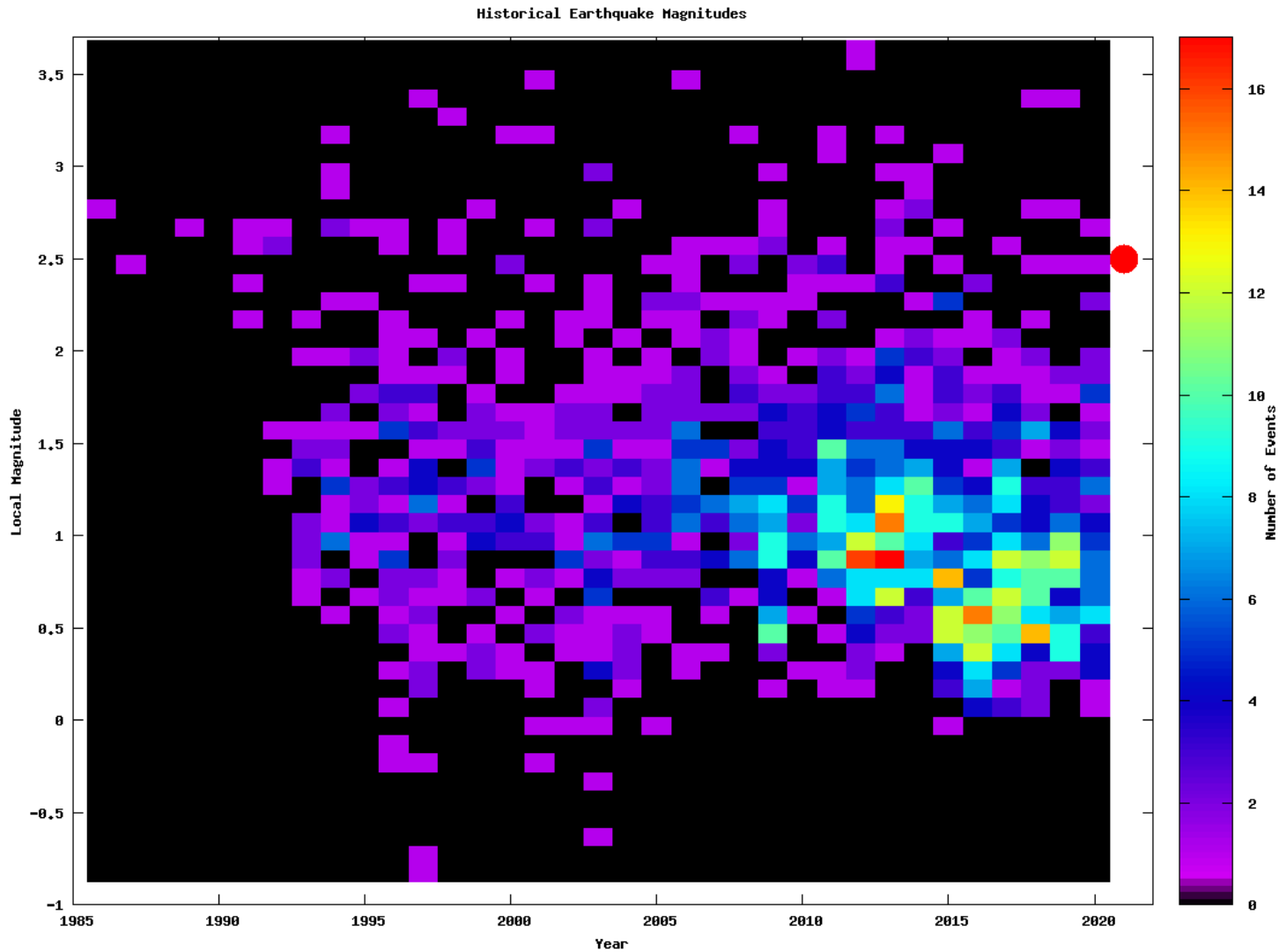
The event is located at:

Location	Zeerijp
Northing (m)	596750
Easting (m)	245550
Depth (m)	3000

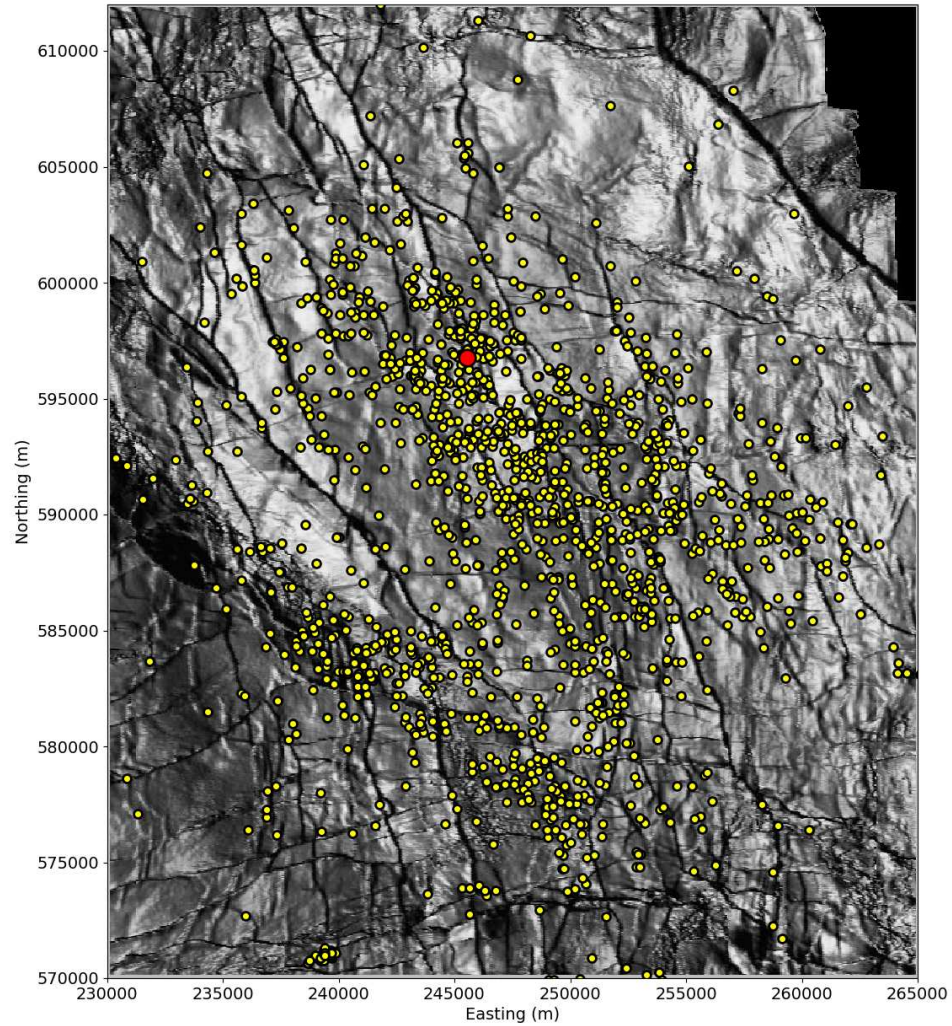
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	137.91	306.16
Dip angle (degree)	24.93	68.43
Rake angle (degree)	-79.07	-94.93
Isotropic (percentage)	-28.76	-28.76
CLVD (percentage)	4.71	4.71
Magnitude M_L	2.50	2.50

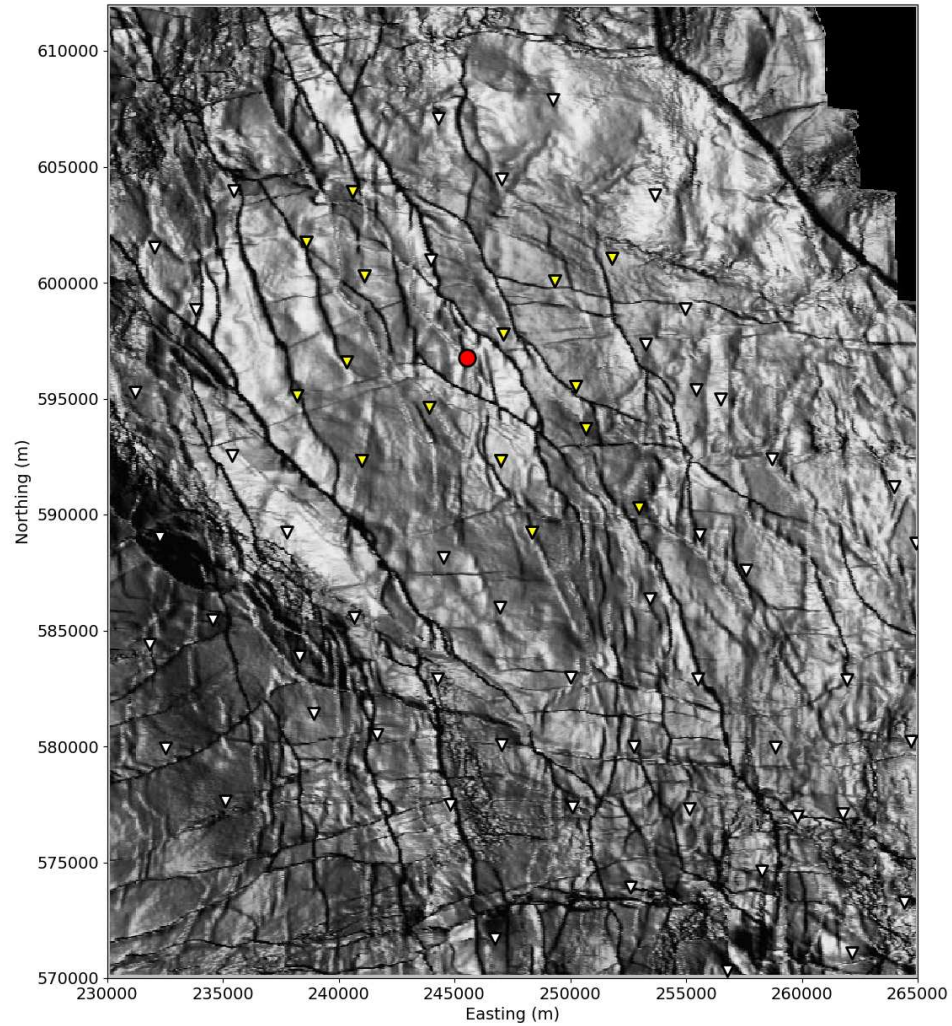
Magnitude summary



Regional and historical map

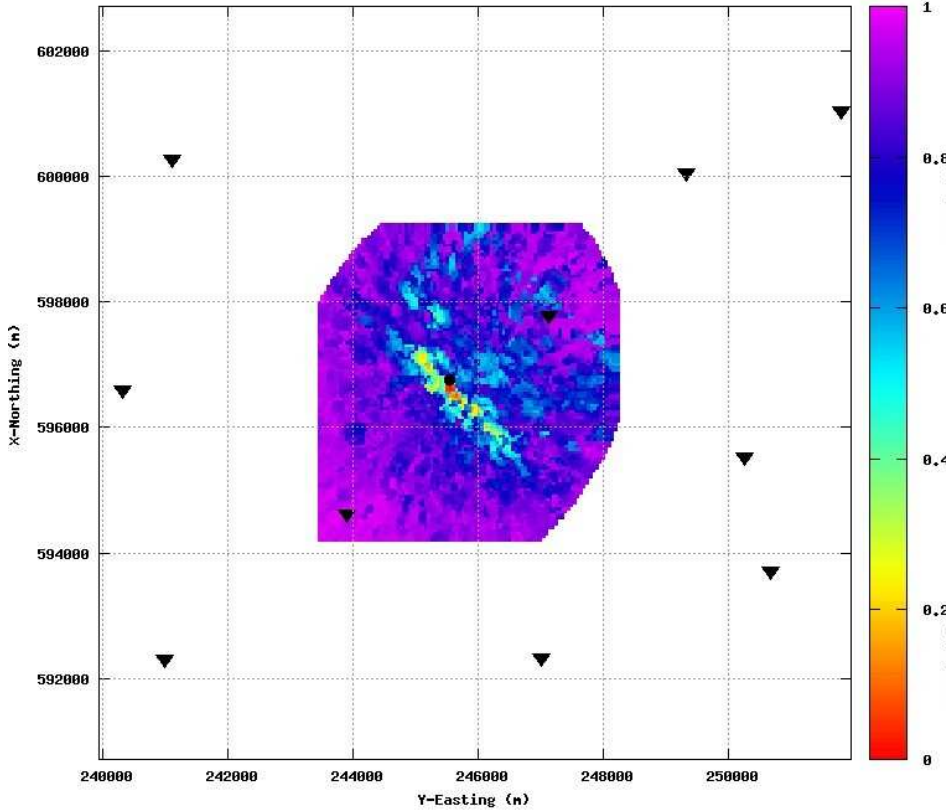


Event location - Map

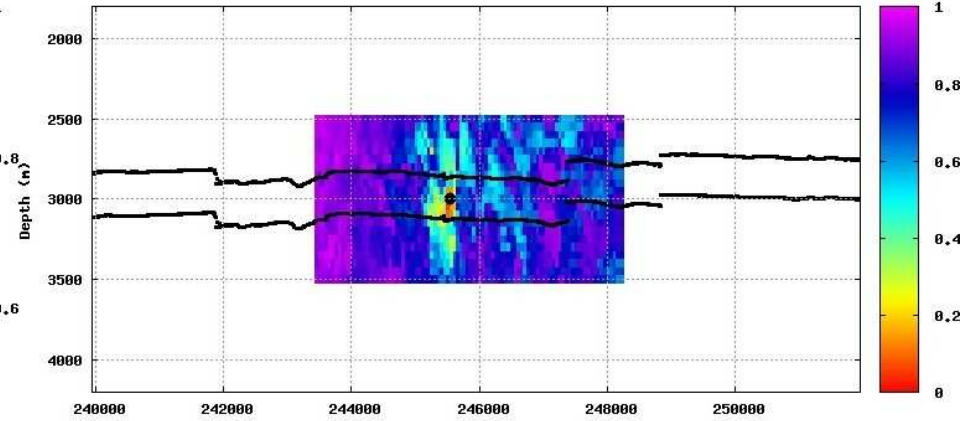


Event location and depth

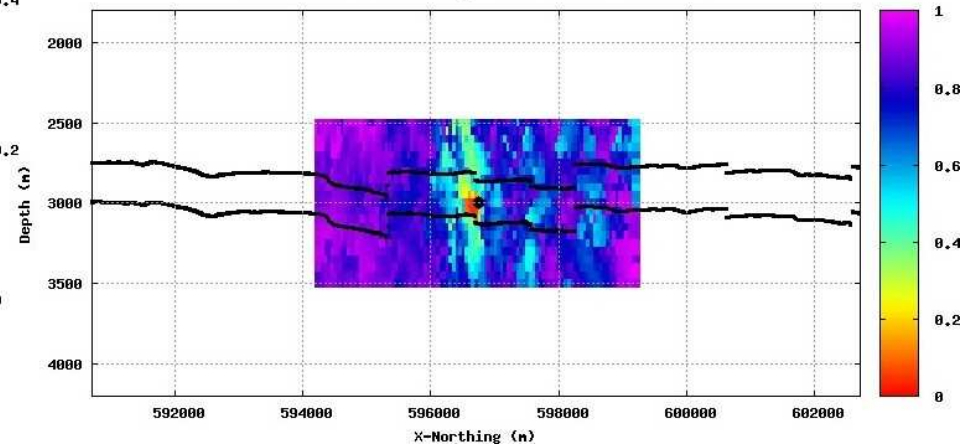
CORRVL, depth slice at ZSHT=3800m event:39 binnul:15



CORRVL, slice at X-Northing 596750m event:39 binnul:15

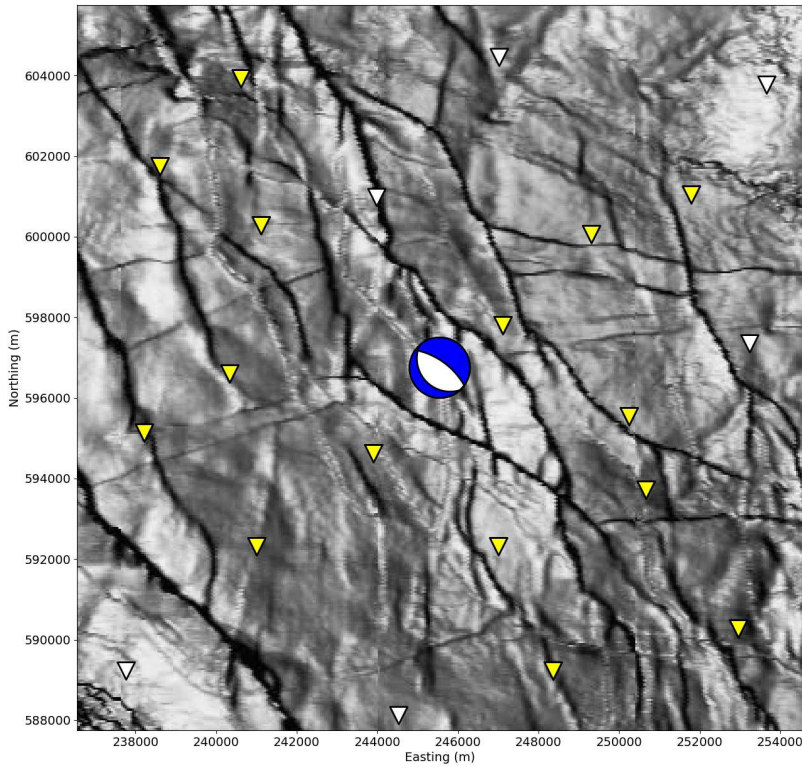


CORRVL, slice at Y-Easting 245550m event:39 binnul:15

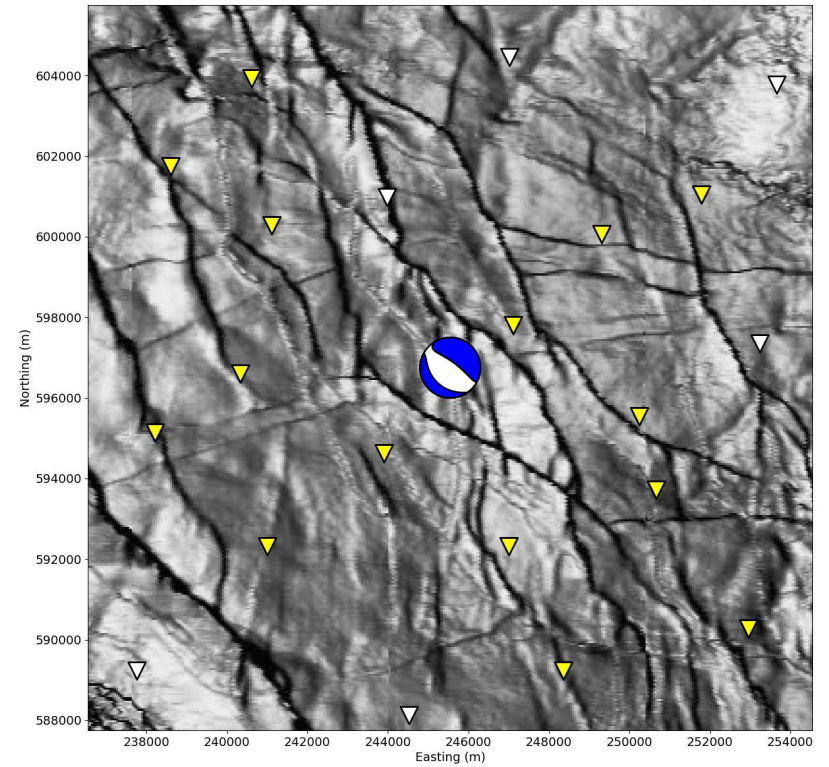


Moment tensor

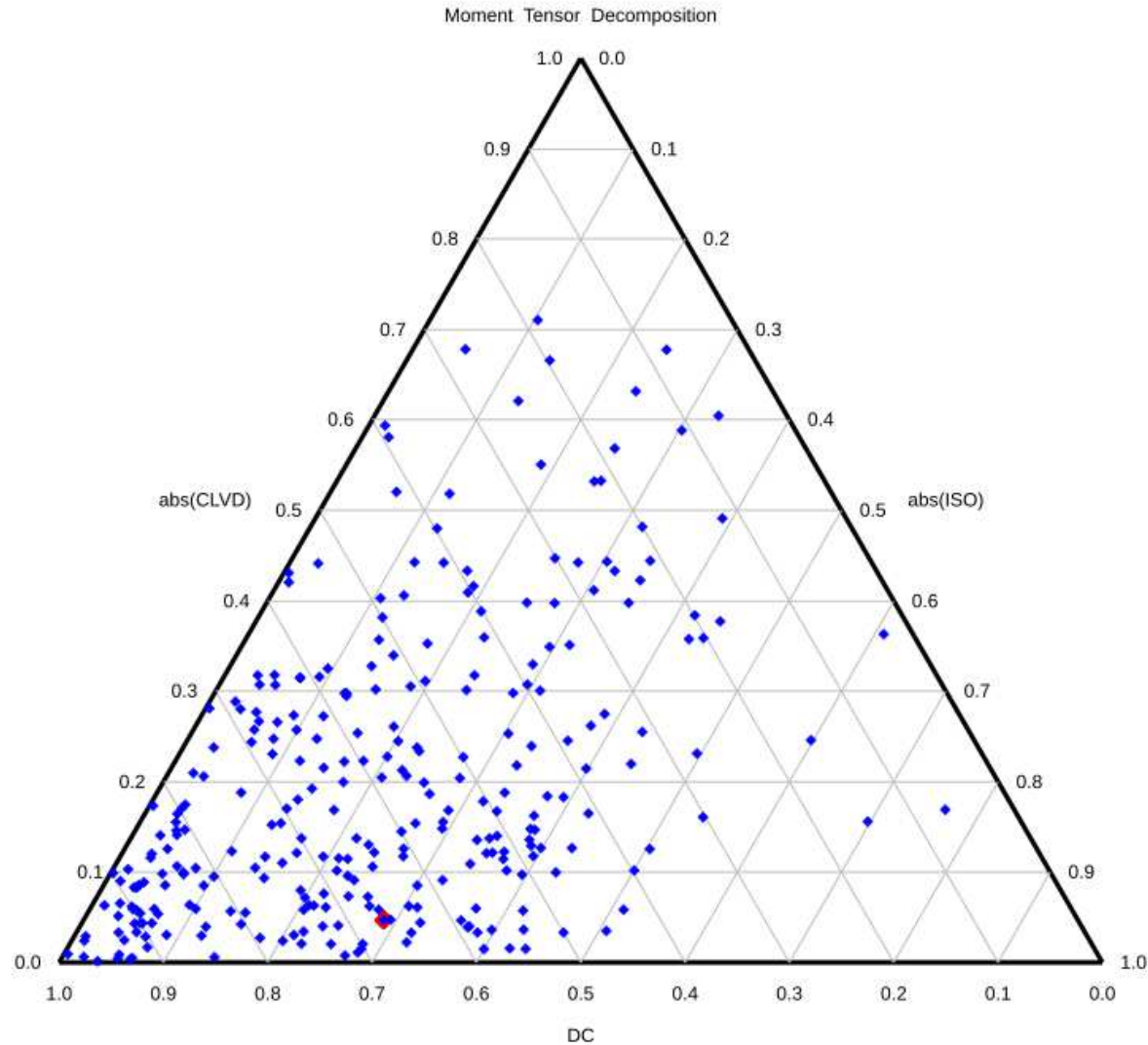
Double-coupled part



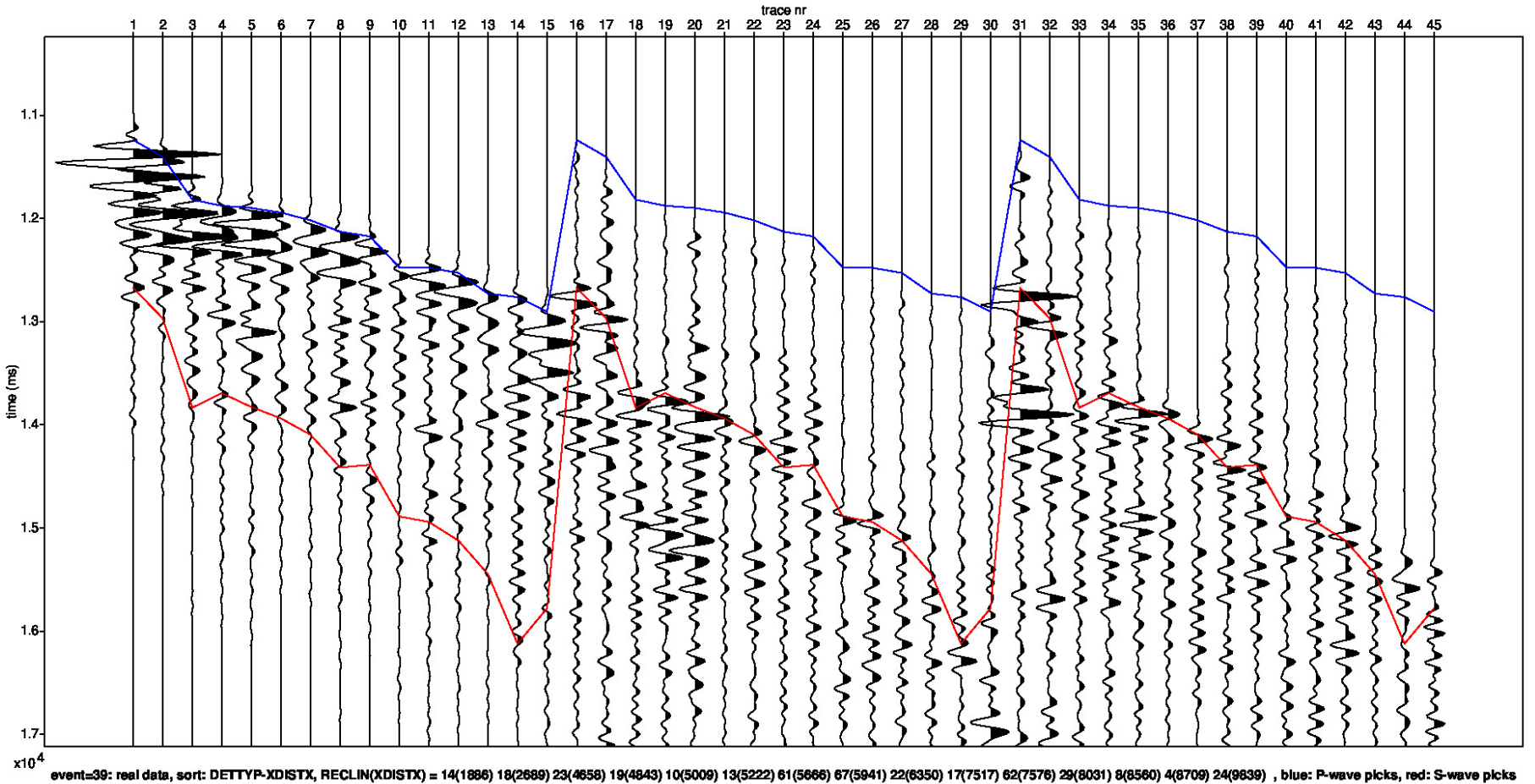
Full



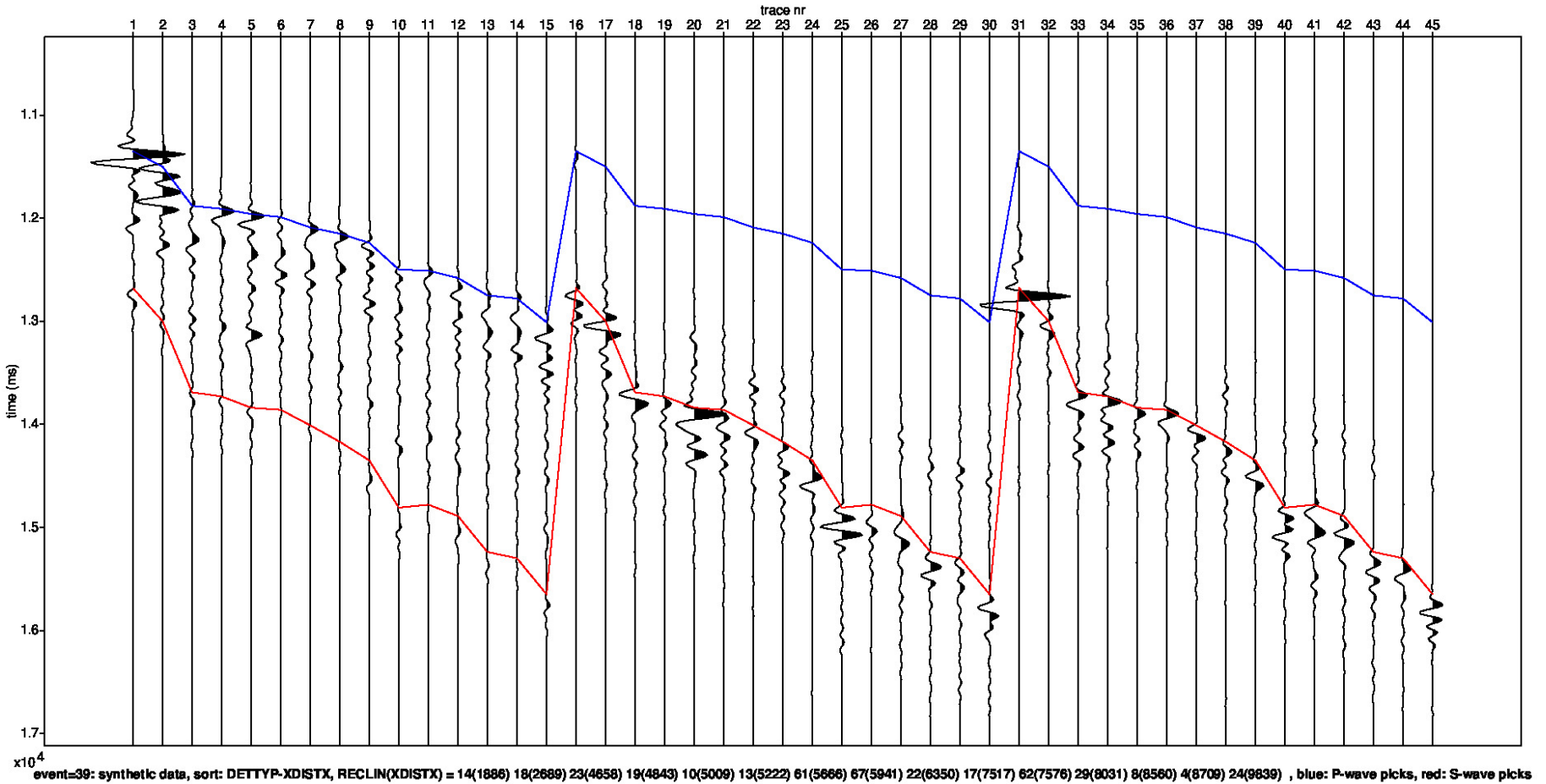
Moment Tensor: Decomposition



Field data traces



Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the current event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 10 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 11 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 12 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



Appendix C – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving bij Appingedam op 4 oktober

Hier volgt een evaluatie van de opnames gemaakt met het seismisch meetnet geopereerd door KNMI van de aardbeving bij Appingedam op 4 oktober. De evaluatie is gemaakt door het laboratorium van Shell in Amsterdam gebruikmakend van de geautomatiseerde Full-Wave-Form inversie.

Aan deze aardbeving is nummer 40 toegekend.



Event 40 - Appingedam

04 October 2021 13:33:45

5 October 2021

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	04 October 2021
Time	13:33:45.495000

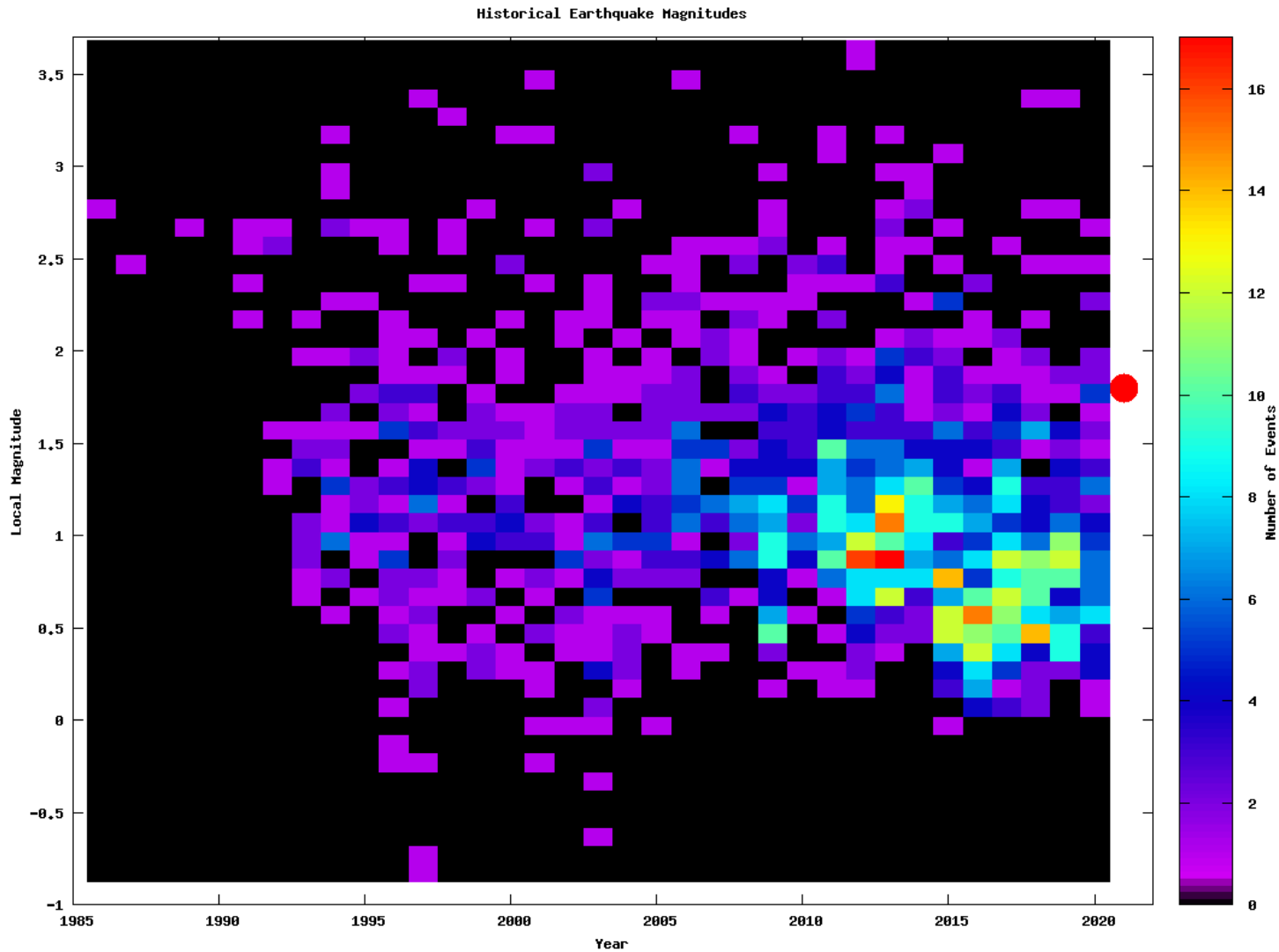
The event is located at:

Location	Appingedam
Northing (m)	591500
Easting (m)	251150
Depth (m)	2850

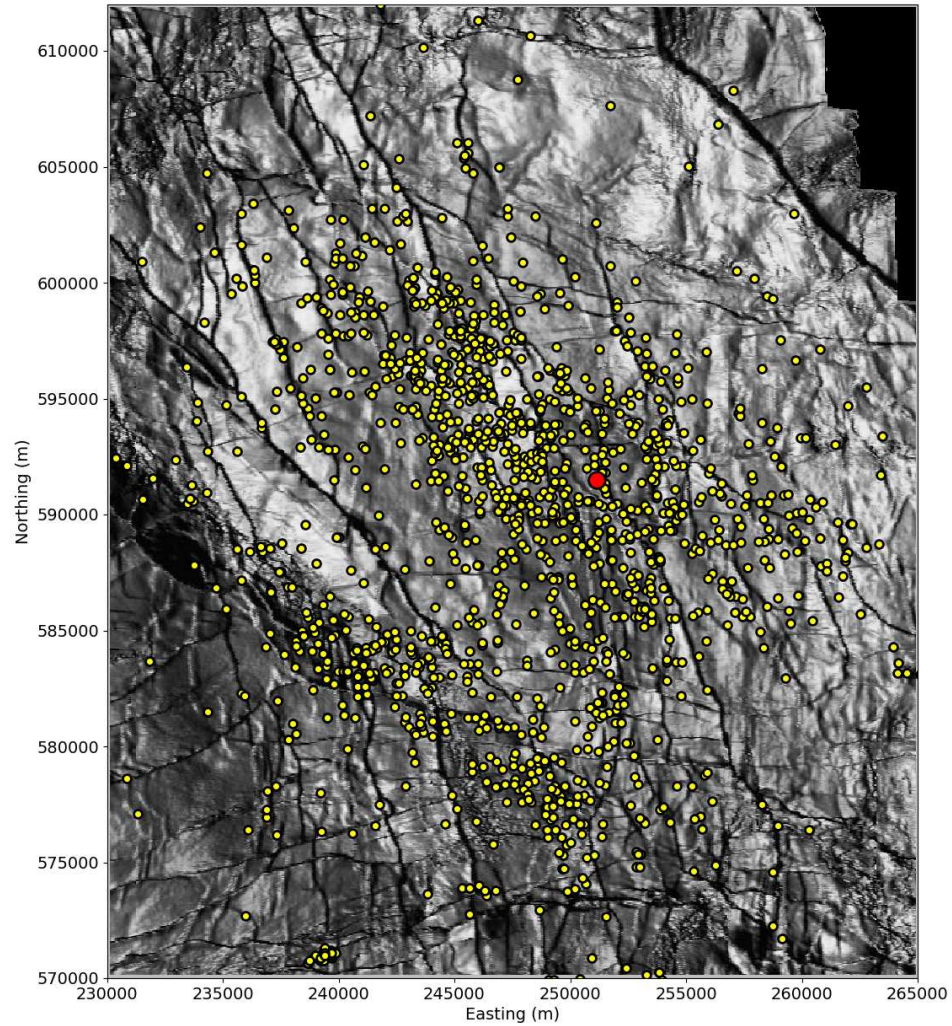
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	162.11	346.25
Dip angle (degree)	37.27	48.00
Rake angle (degree)	-93.09	-87.48
Isotropic (percentage)	-16.58	-16.58
CLVD (percentage)	-9.04	-9.04
Magnitude M_L	1.80	1.80

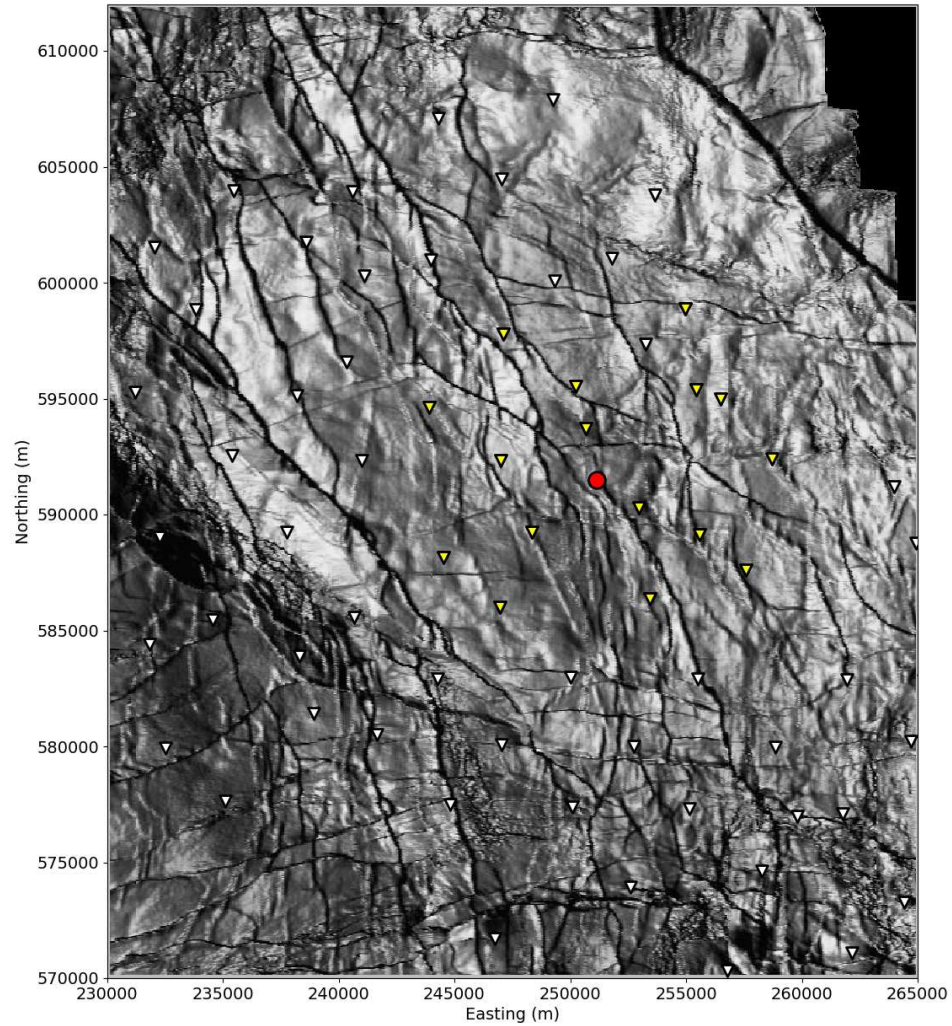
Magnitude summary



Regional and historical map

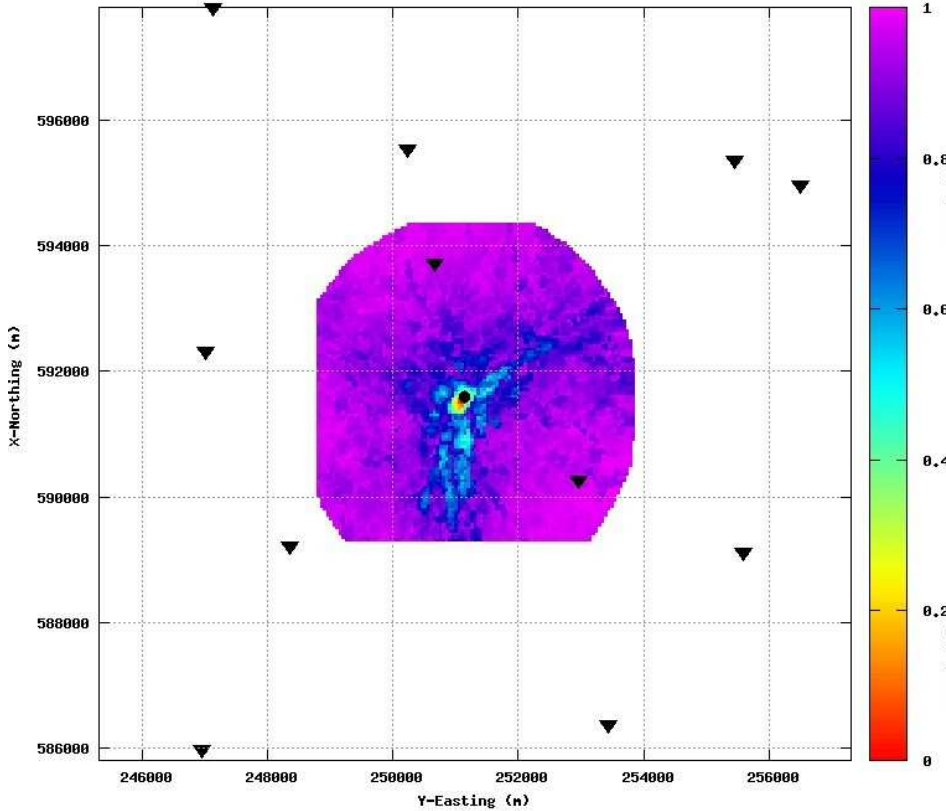


Event location - Map

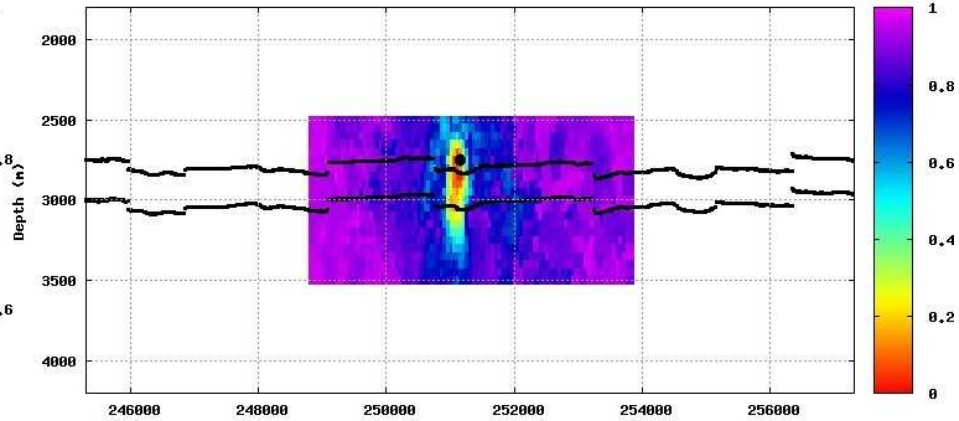


Event location and depth (initial)

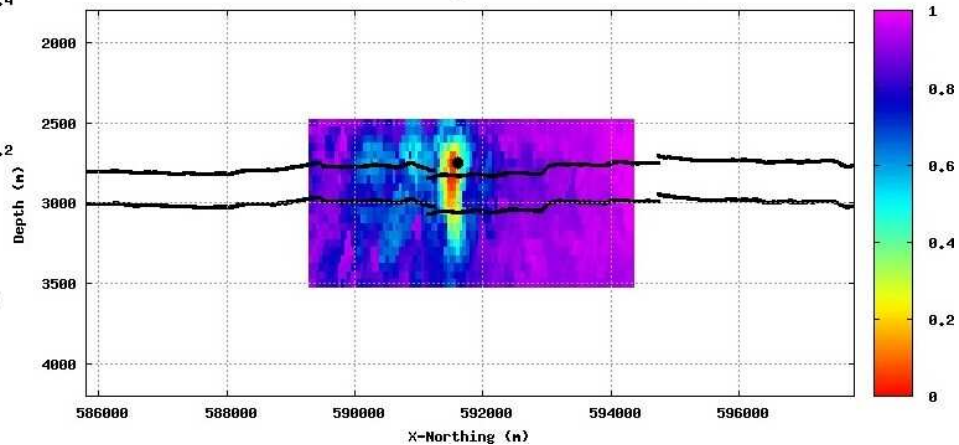
CORRVL, depth slice at ZSHT=2750m event:40 binnul:16



CORRVL, slice at X-Northing 591600m event:40 binnul:16

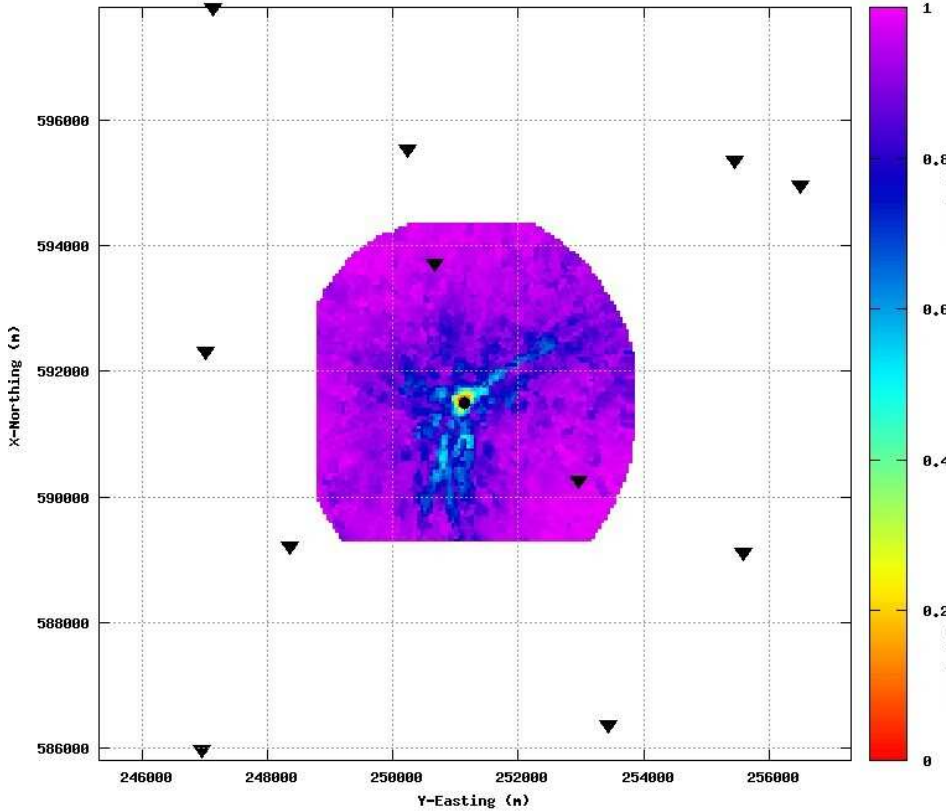


CORRVL, slice at Y-Easting 251150m event:40 binnul:16

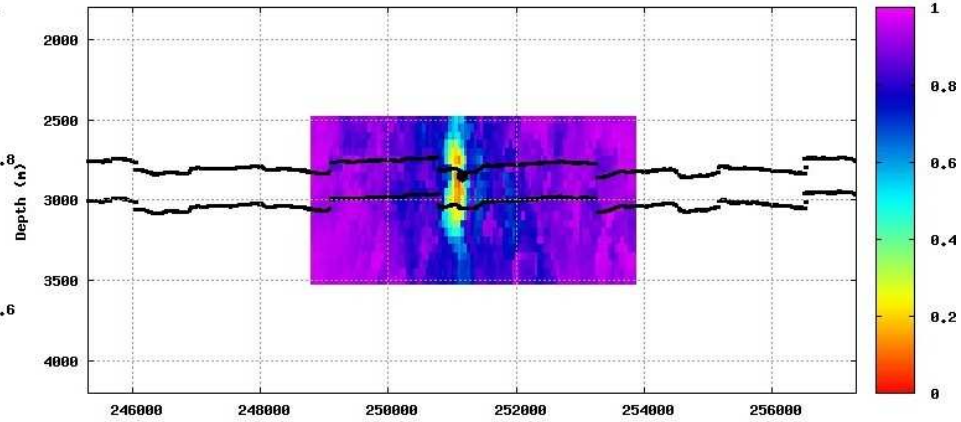


Event location and depth (final)

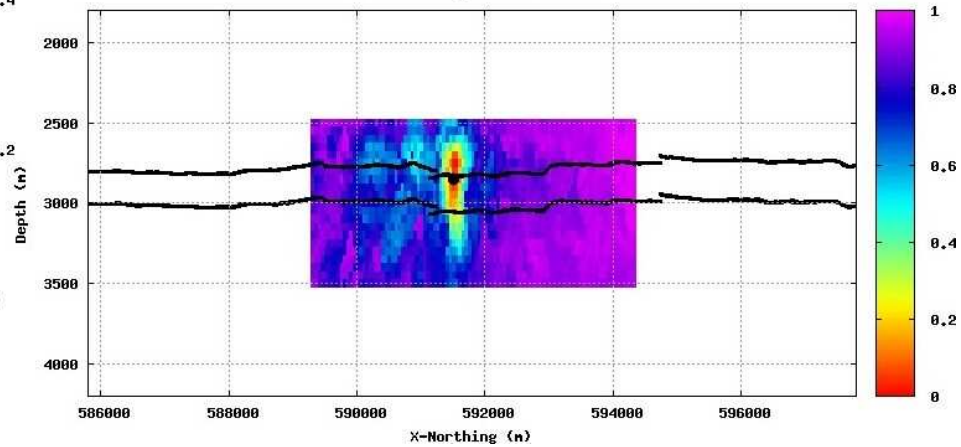
CORRVL, depth slice at ZSHT=2850m event:40 binnul:16



CORRVL, slice at X-Northing 591500m event:40 binnul:16

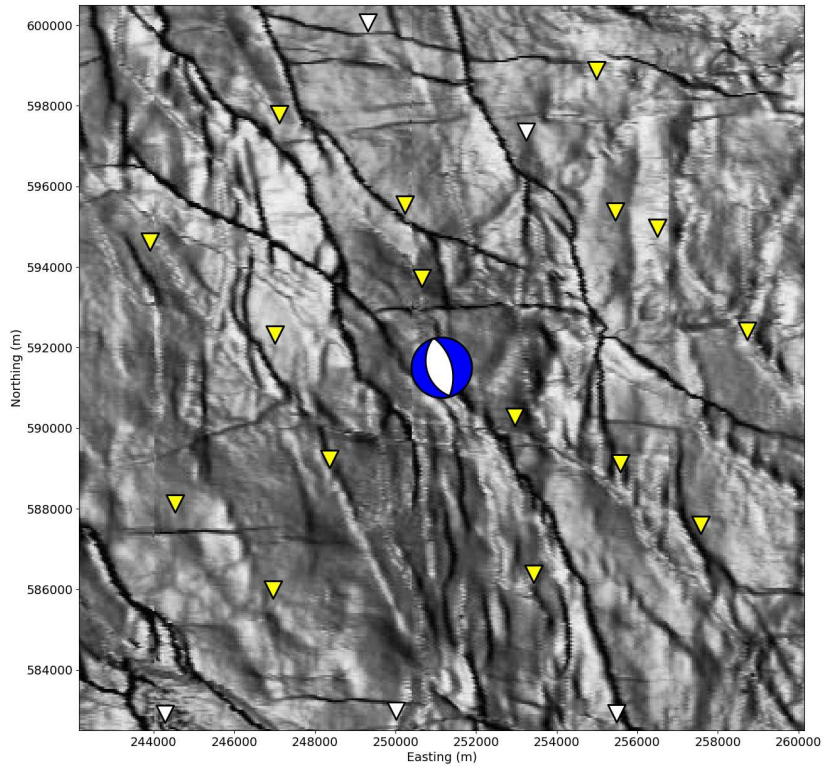


CORRVL, slice at Y-Easting 251150m event:40 binnul:16

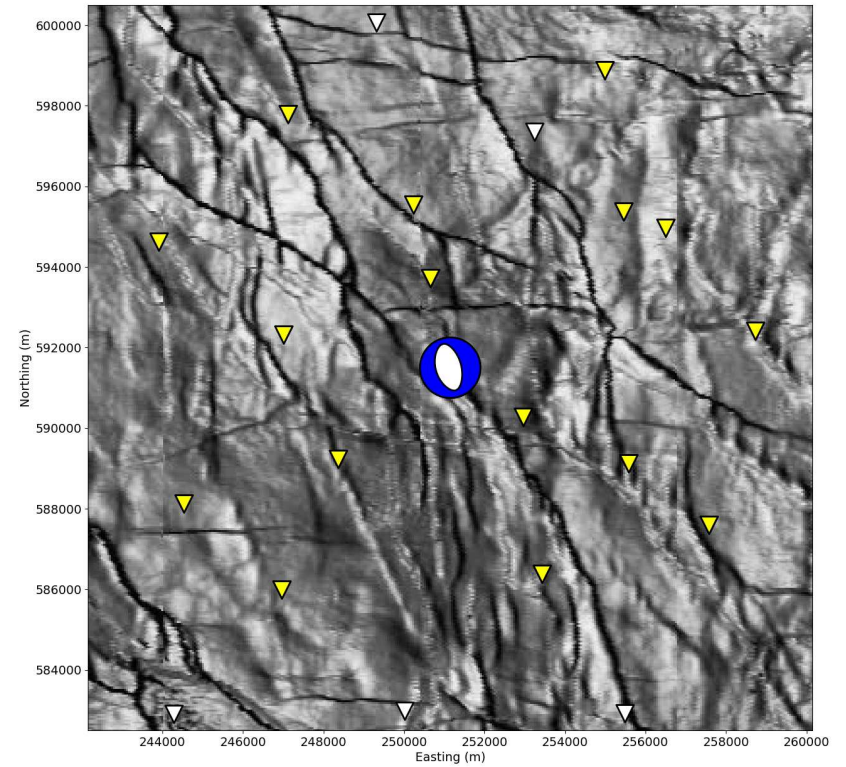


Moment tensor

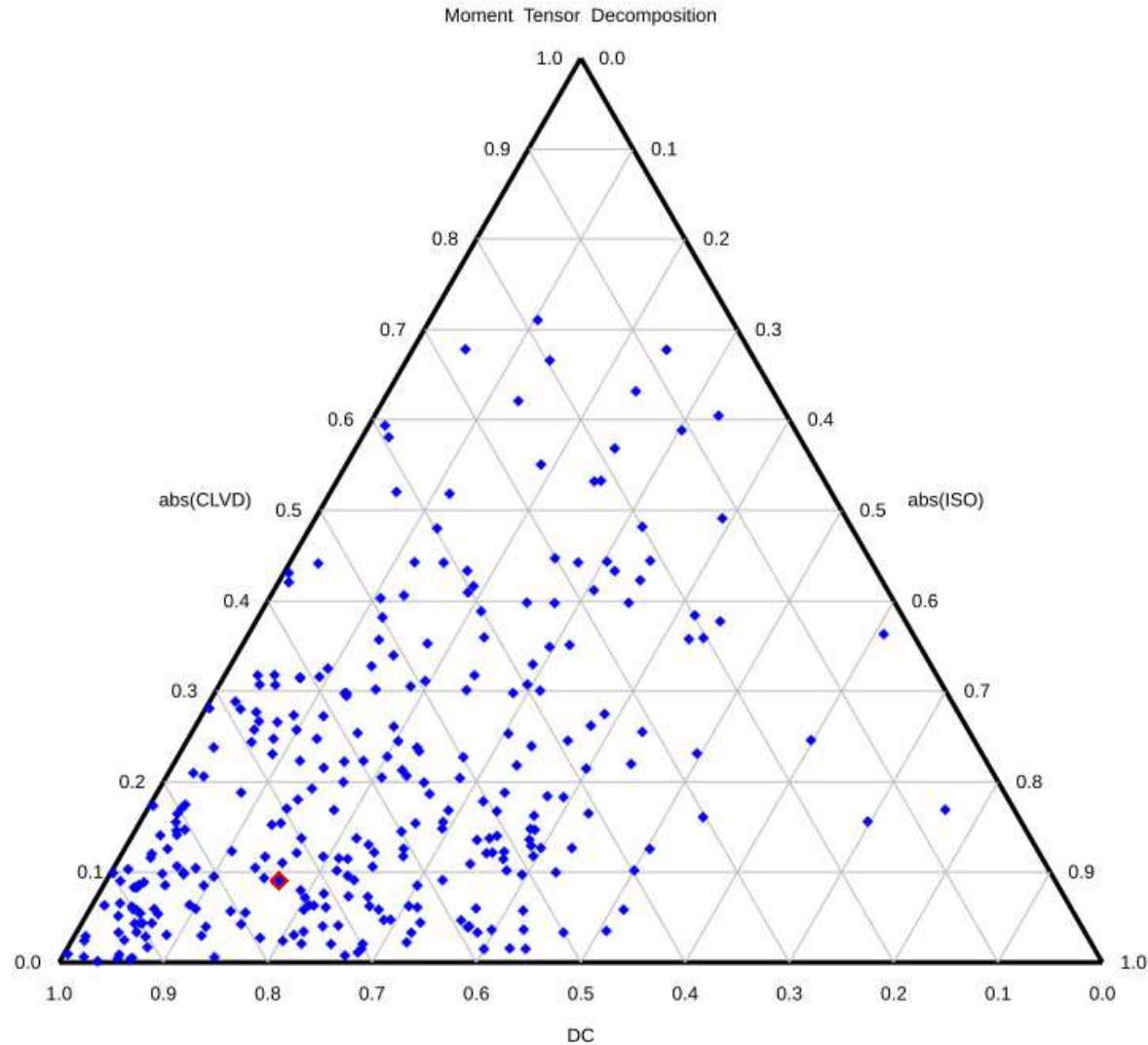
Double-coupled part



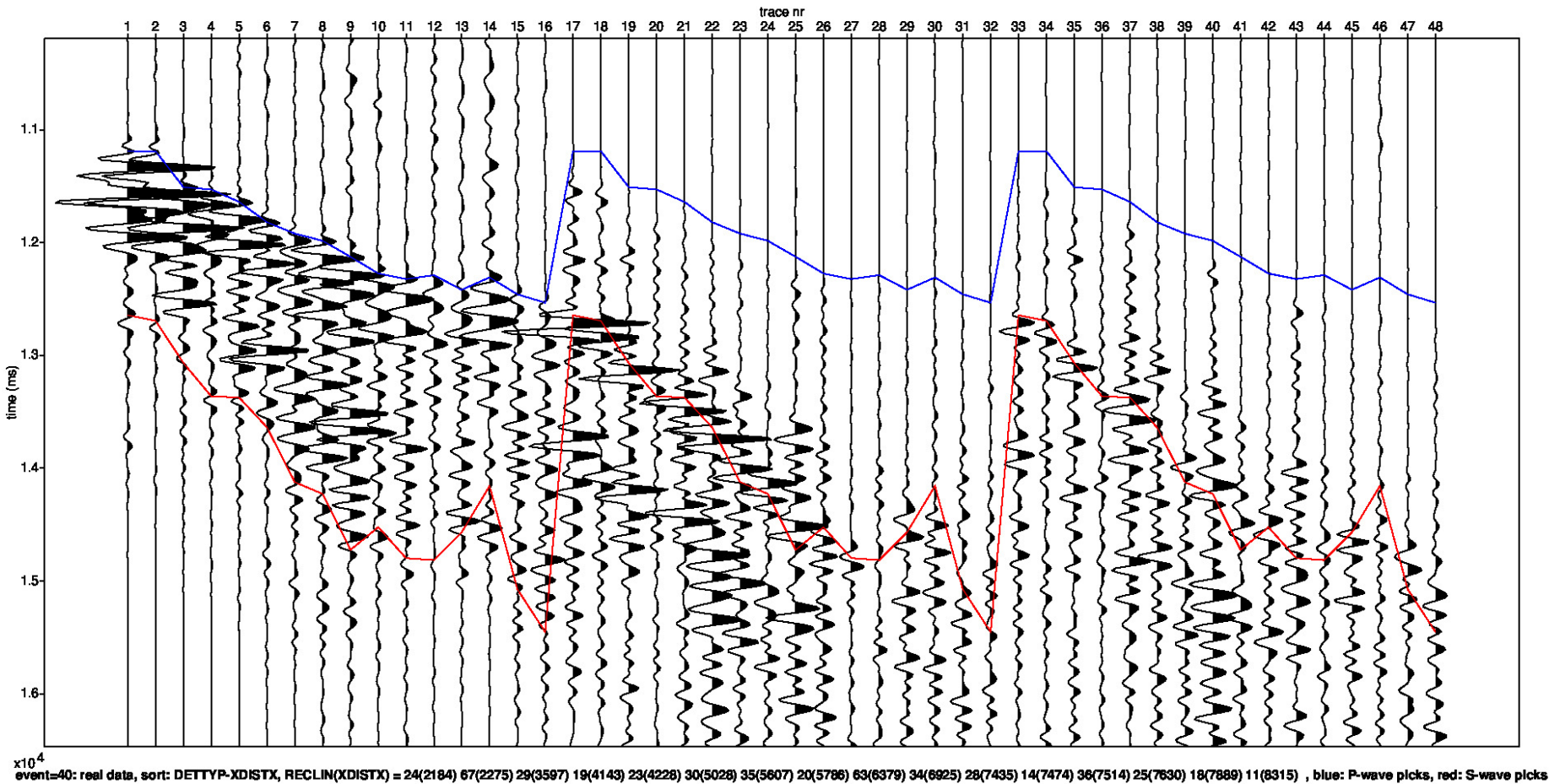
Full



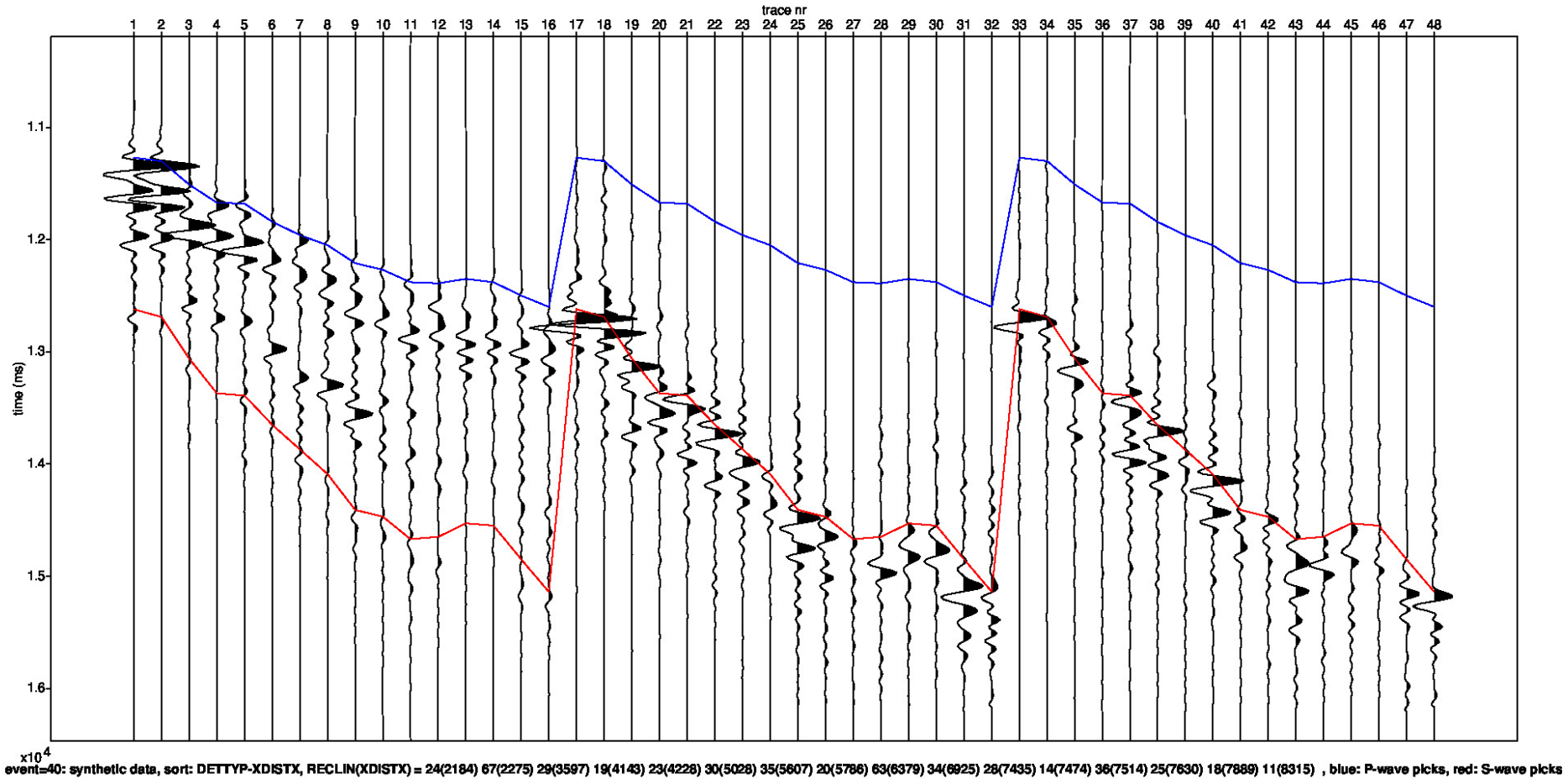
Moment Tensor: Decomposition



Field data traces



Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the initial event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 QC displays extracted from the objective function for the final event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.
- 10 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 11 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 12 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 13 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



Appendix D – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 2,2 bij Zeerijp op 4 oktober

Hier volgt een evaluatie van de opnames gemaakt met het seismisch meetnet geopereerd door KNMI van de aardbeving bij Zeerijp op 4 oktober. De evaluatie is gemaakt door het laboratorium van Shell in Amsterdam gebruikmakend van de geautomatiseerde Full-Wave-Form inversie.

Aan deze aardbeving is nummer 41 toegekend.



Event 41 - Zeerijp

04 October 2021 20:47:42

5 October 2021

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	04 October 2021
Time	20:47:42.910000

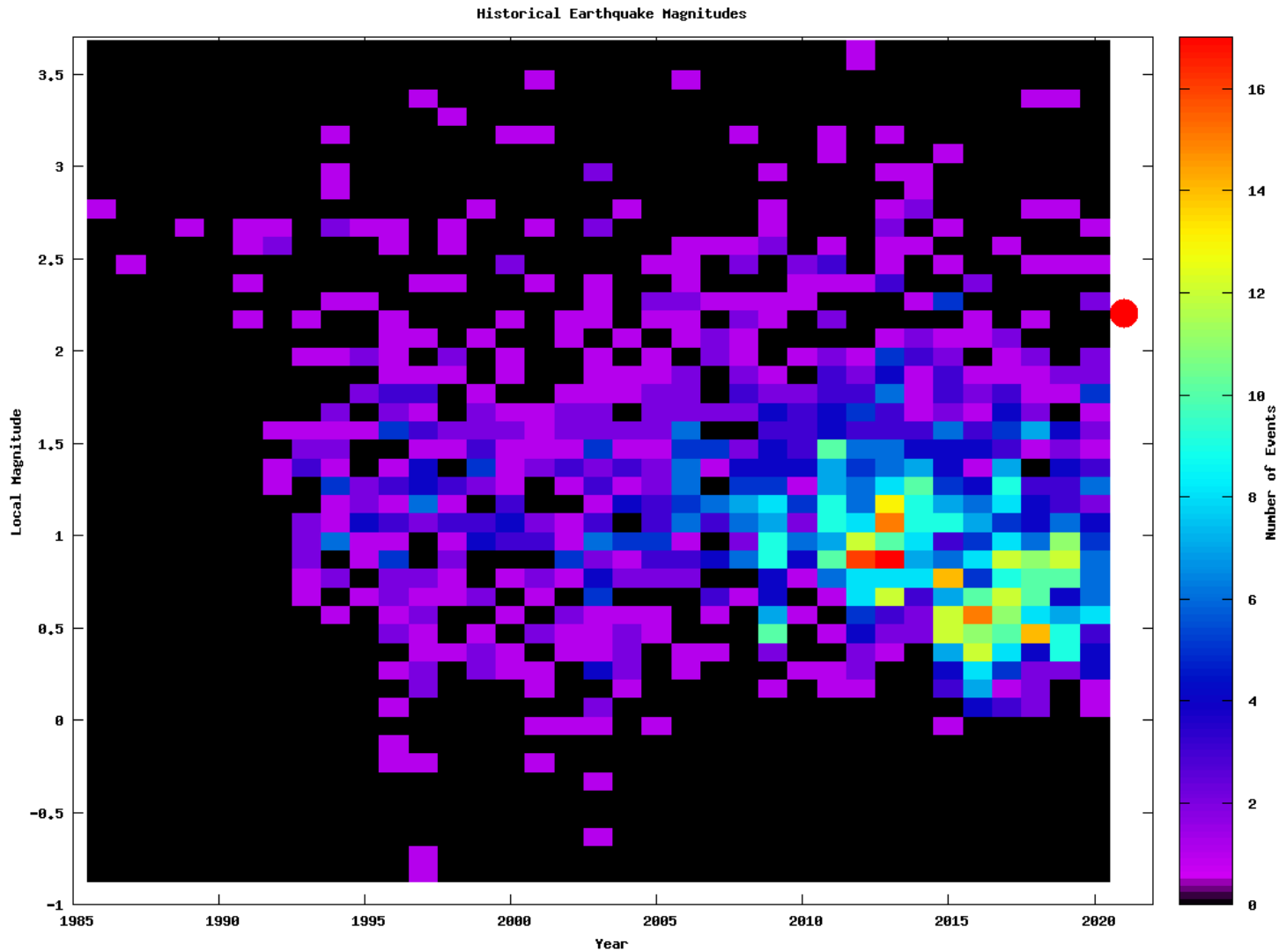
The event is located at:

Location	Zeerijp
Northing (m)	596700
Easting (m)	245550
Depth (m)	3050

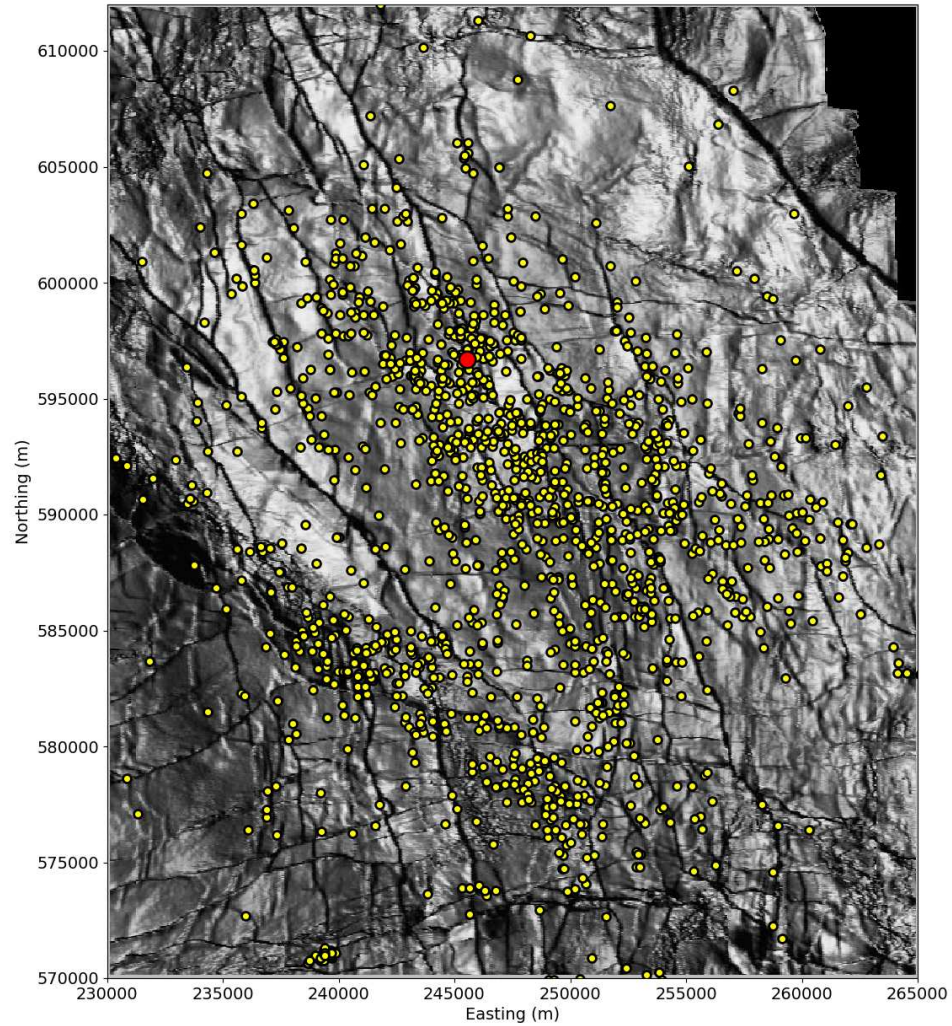
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	148.97	295.00
Dip angle (degree)	26.92	78.77
Rake angle (degree)	-56.03	-104.95
Isotropic (percentage)	-27.63	-27.63
CLVD (percentage)	17.64	17.64
Magnitude M_L	2.20	2.20

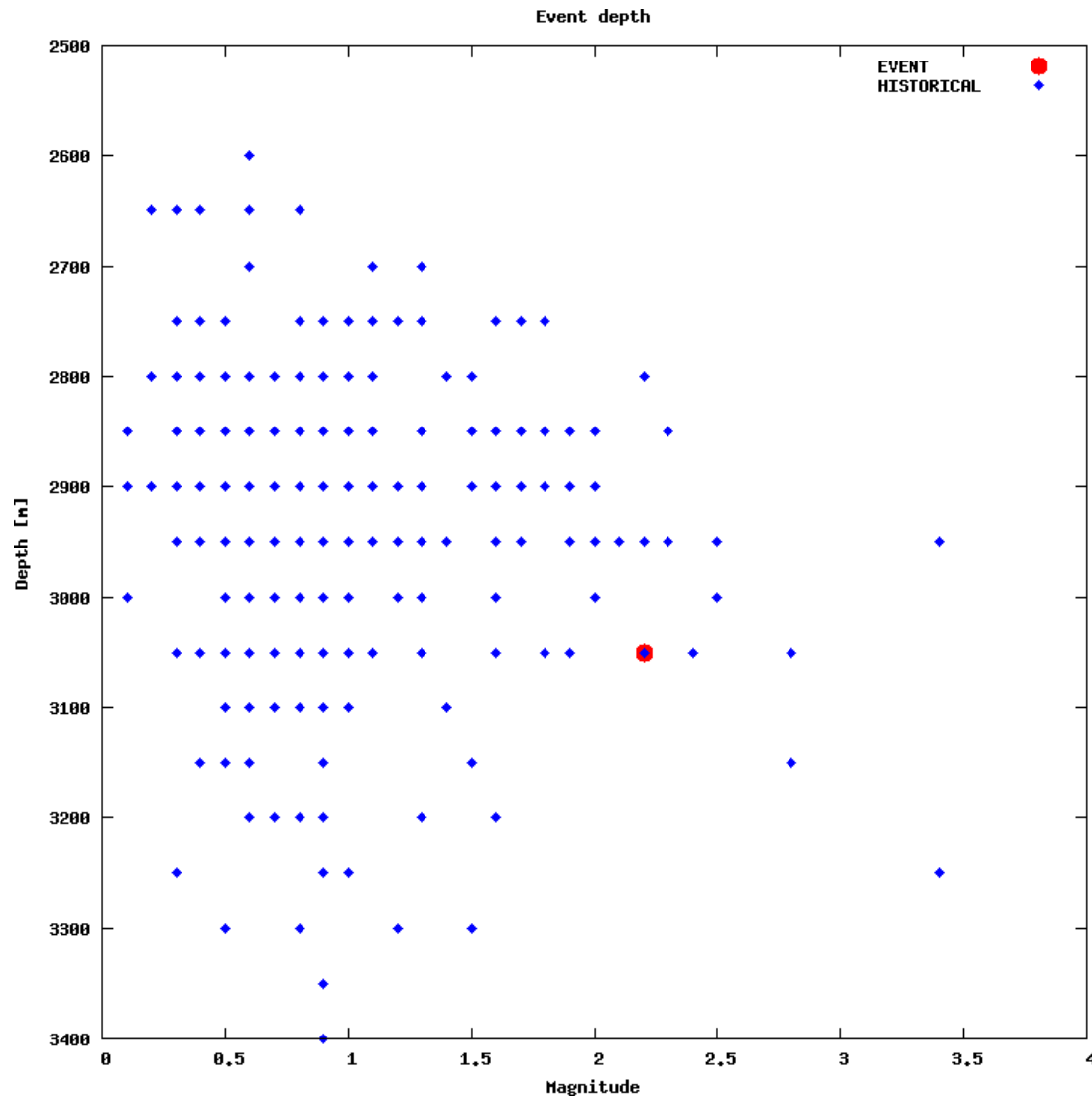
Magnitude summary



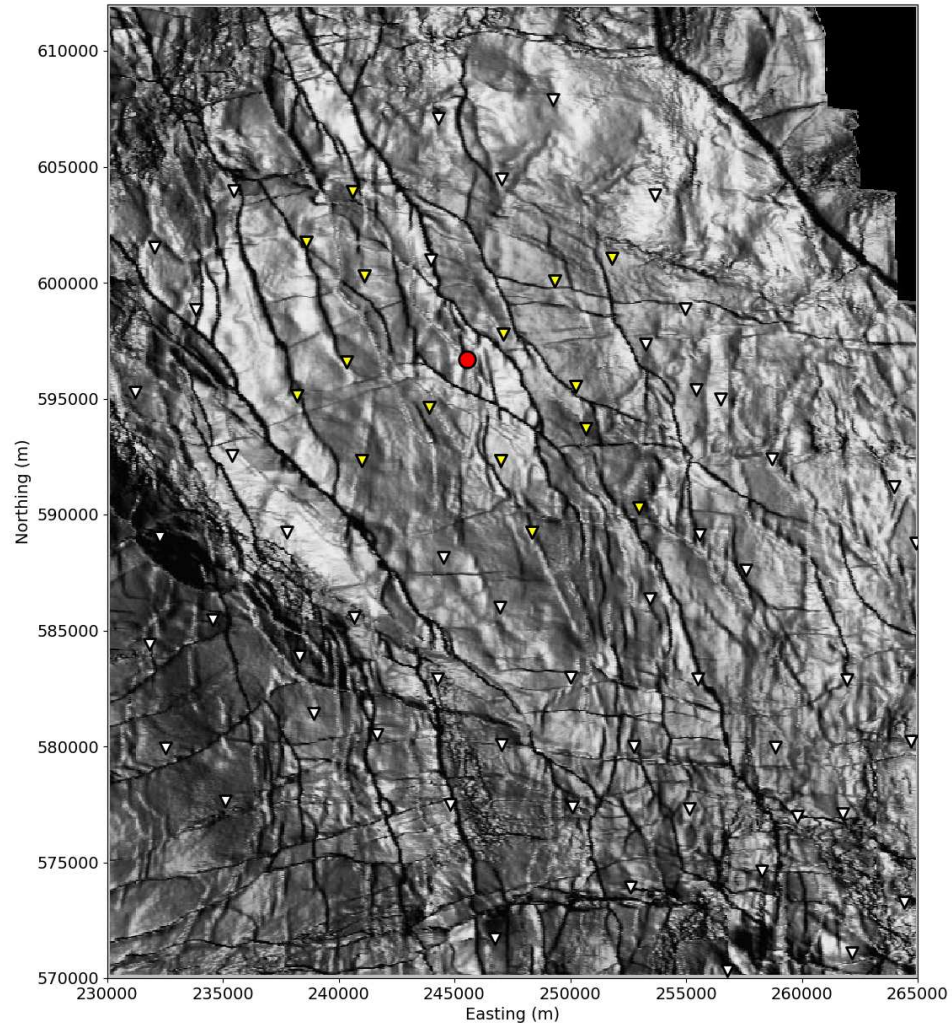
Regional and historical map



Event depth summary

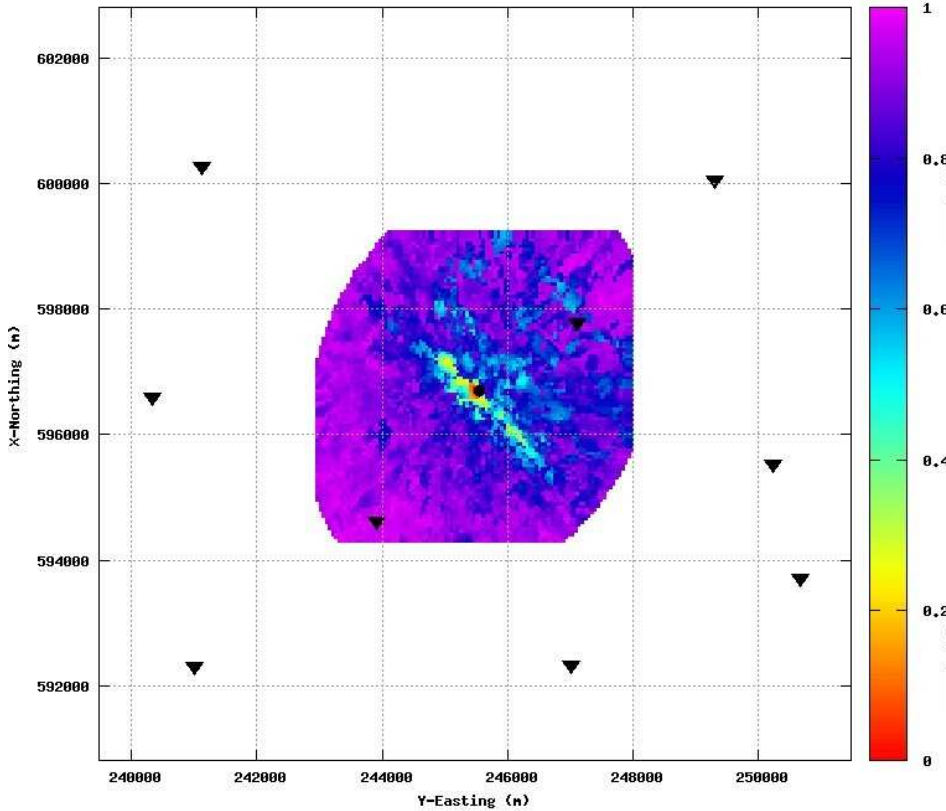


Event location - Map

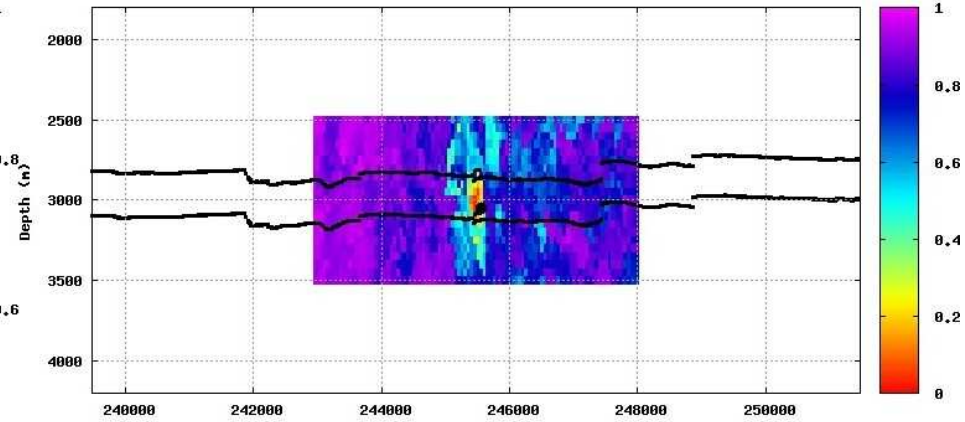


Event location and depth

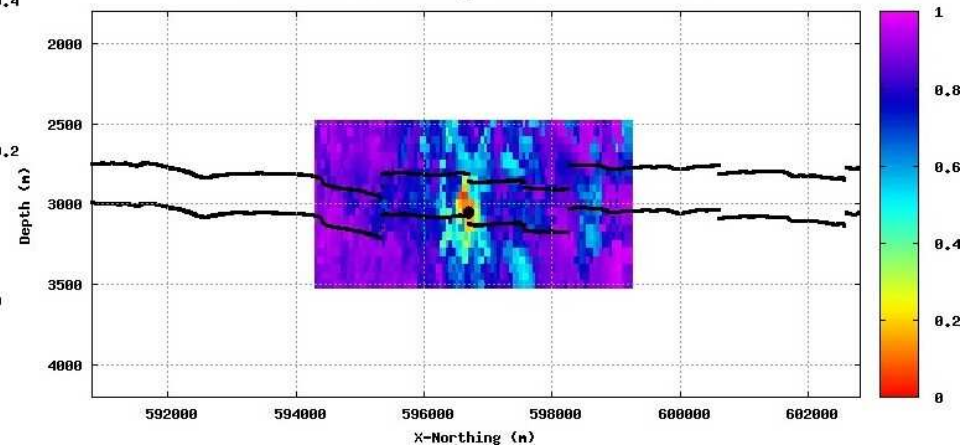
CORRVL, depth slice at ZSHT=3050m event:41 binnul:15



CORRVL, slice at X-Northing 596700m event:41 binnul:15

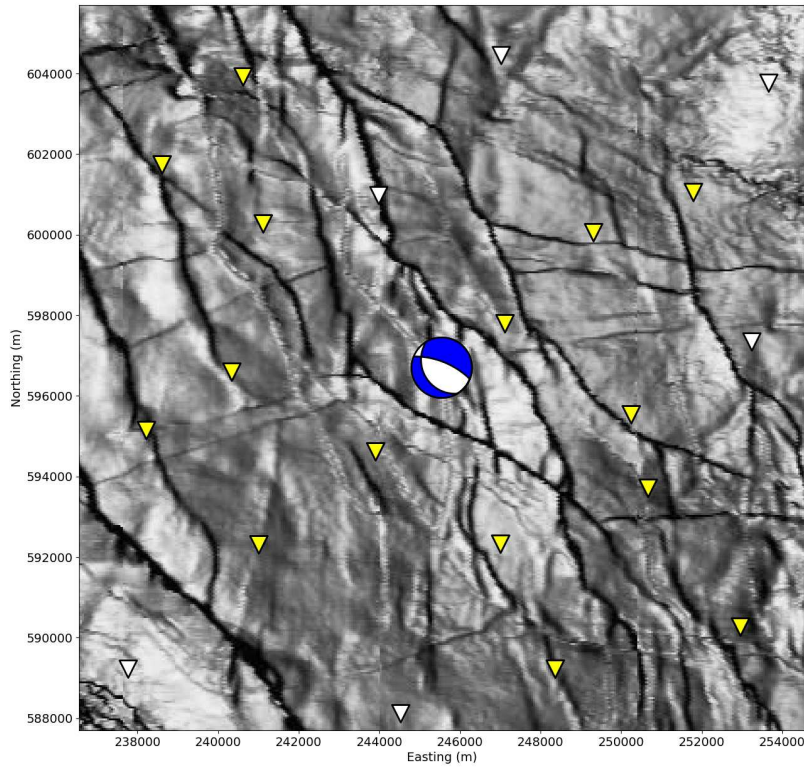


CORRVL, slice at Y-Easting 245550m event:41 binnul:15

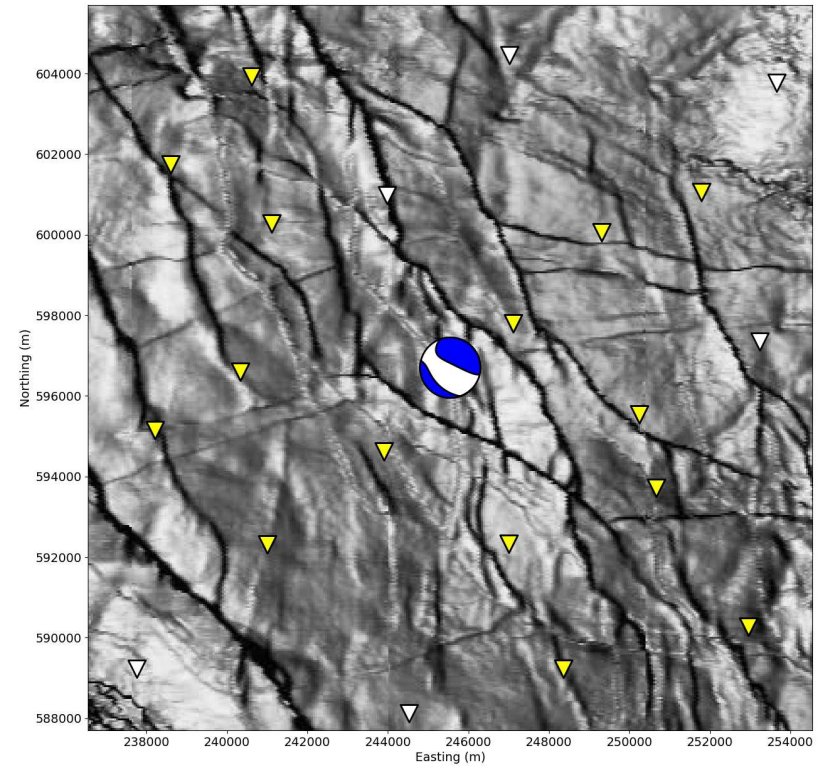


Moment tensor

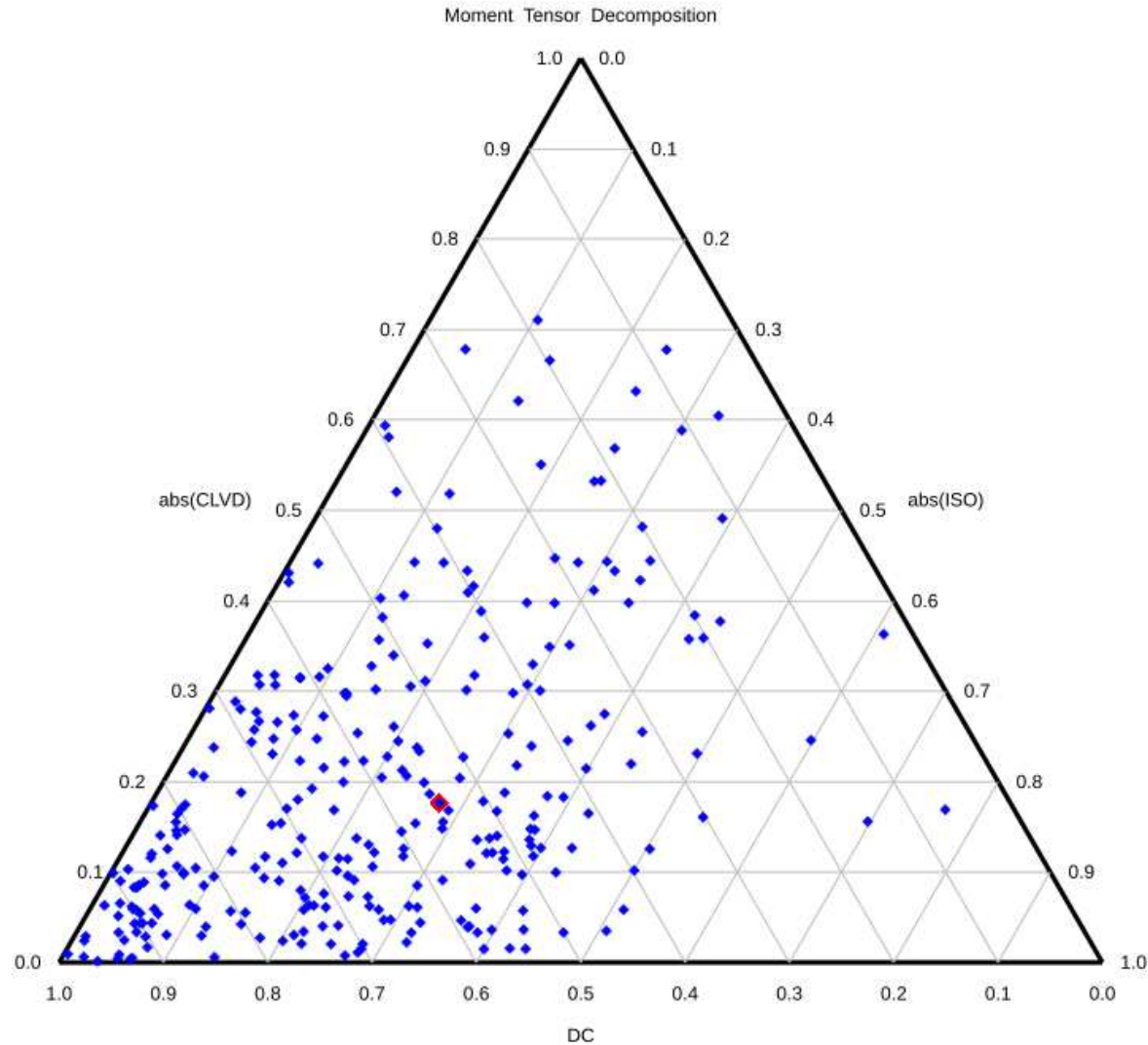
Double-coupled part



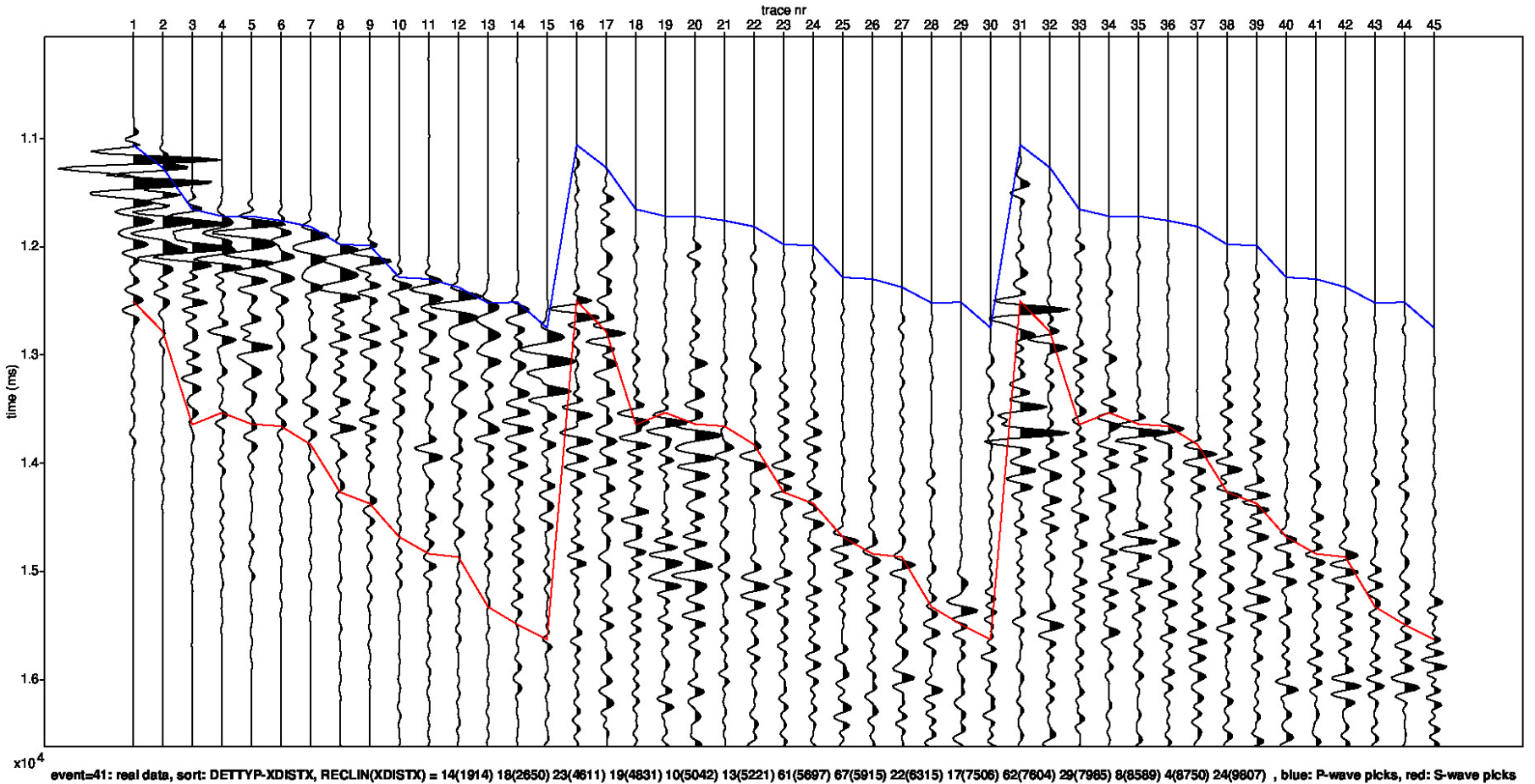
Full



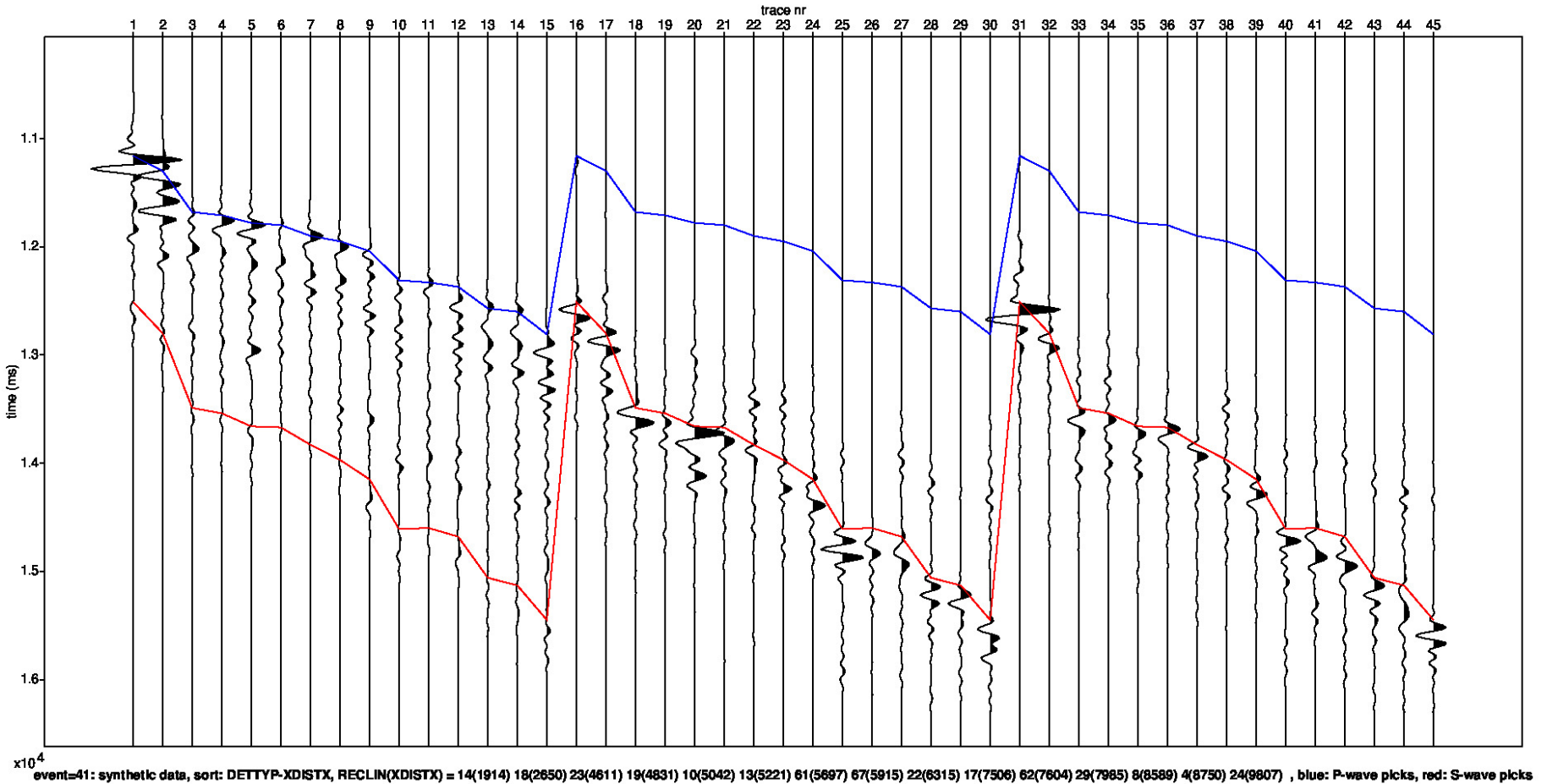
Moment Tensor: Decomposition



Field data traces



Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the current event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 10 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 11 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 12 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



Appendix E – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 1,3 bij Zeerijp op 6 oktober

Hier volgt een evaluatie van de opnames gemaakt met het seismisch meetnet geopereerd door KNMI van de aardbeving bij Zeerijp op 4 oktober. De evaluatie is gemaakt door het laboratorium van Shell in Amsterdam gebruikmakend van de geautomatiseerde Full-Wave-Form inversie.

Aan deze aardbeving is nummer 42 toegekend.



Event 42 - Zeerijp

06 October 2021 18:57:56

7 October 2021

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	06 October 2021
Time	18:57:56.725000

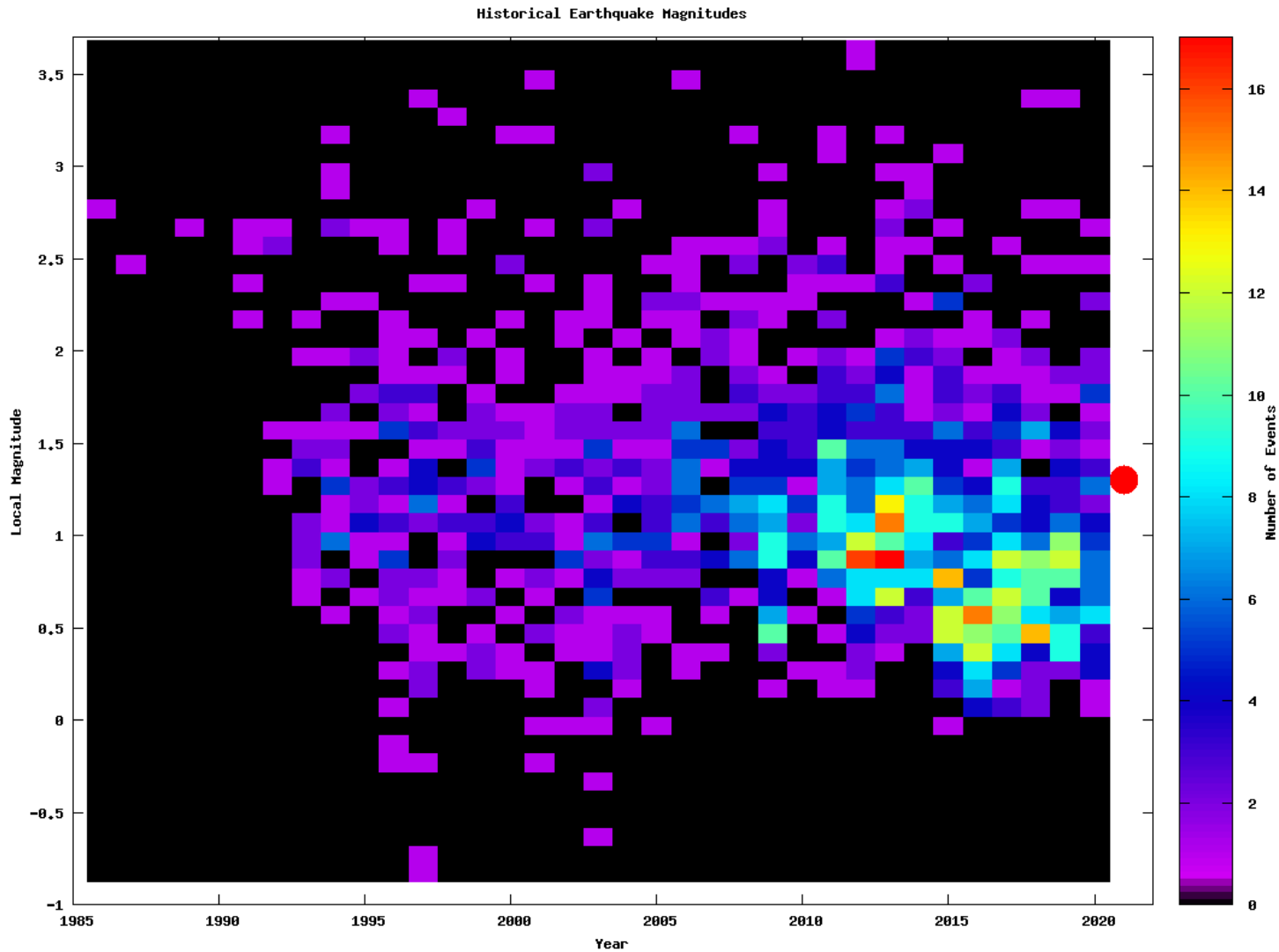
The event is located at:

Location	Zeerijp
Northing (m)	596600
Easting (m)	245450
Depth (m)	2850

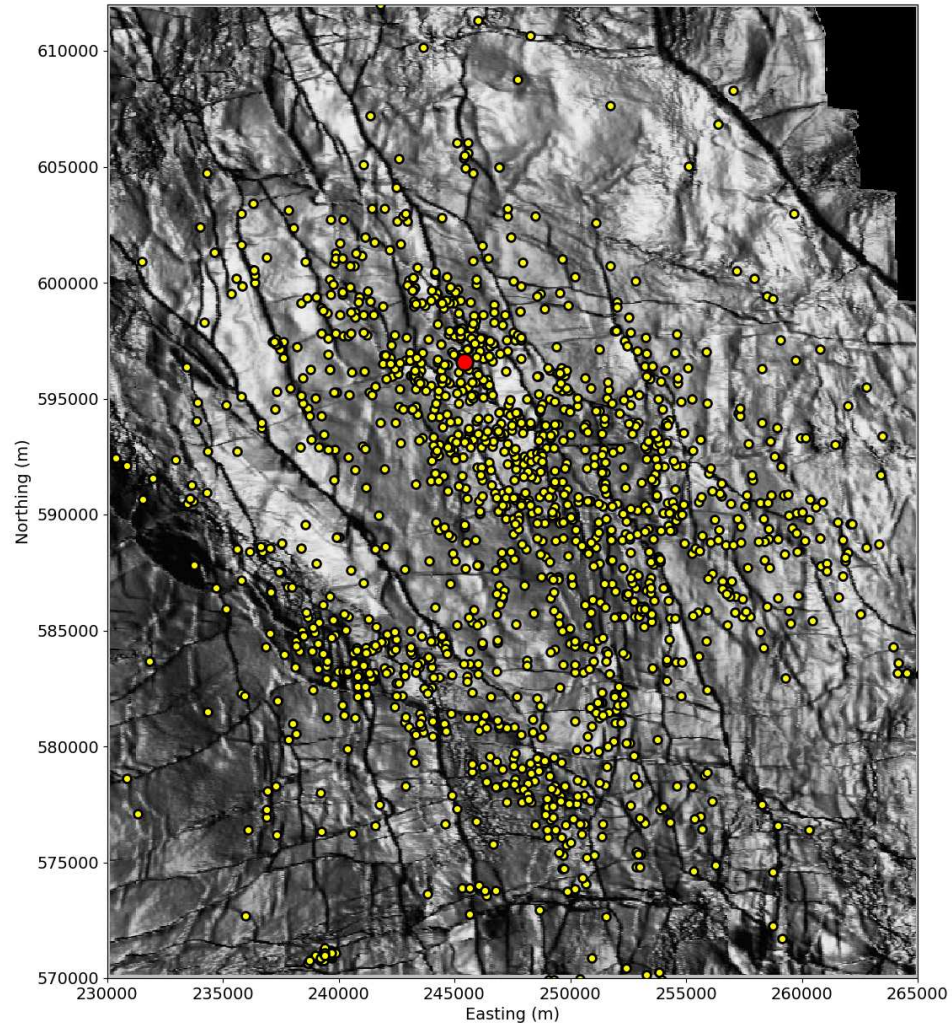
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	185.36	14.02
Dip angle (degree)	28.32	62.12
Rake angle (degree)	-97.65	-85.91
Isotropic (percentage)	-18.67	-18.67
CLVD (percentage)	0.30	0.30
Magnitude M_L	1.30	1.30

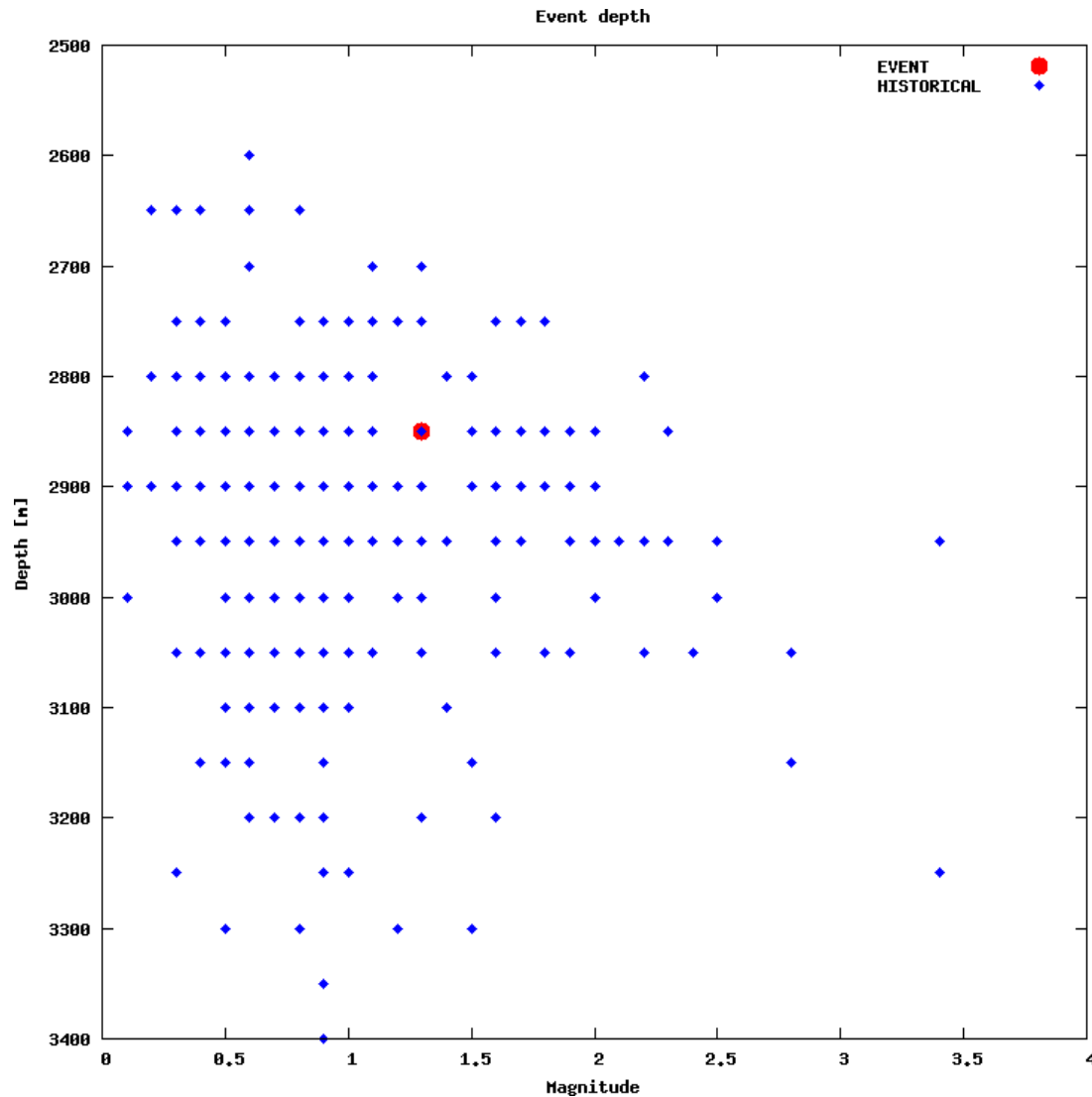
Magnitude summary



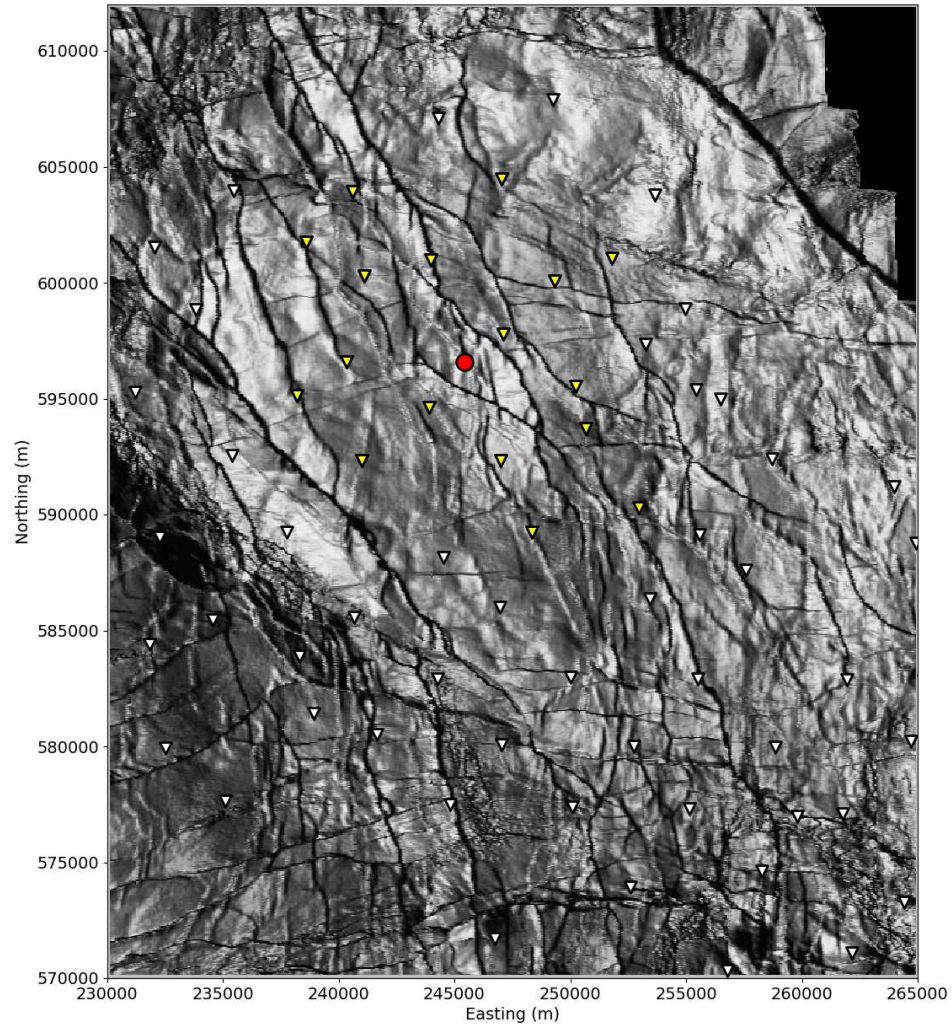
Regional and historical map



Event depth summary

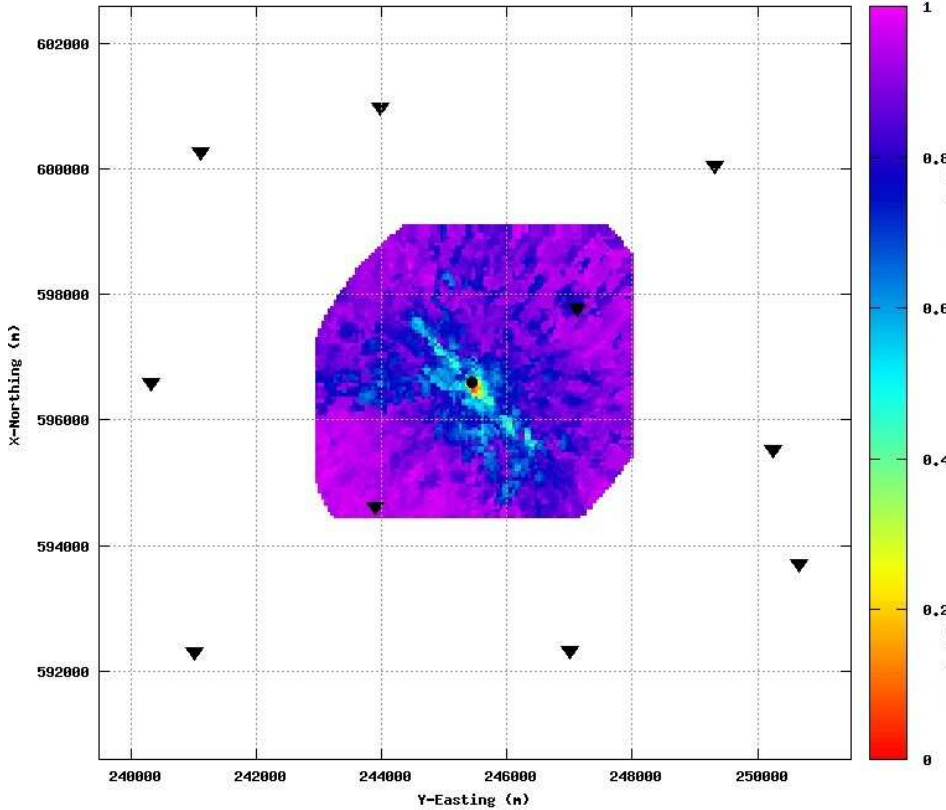


Event location - Map

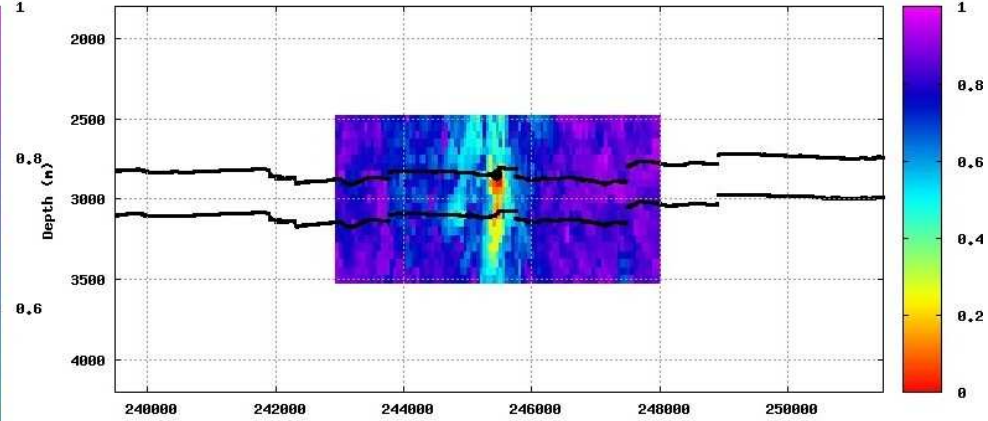


Event location and depth

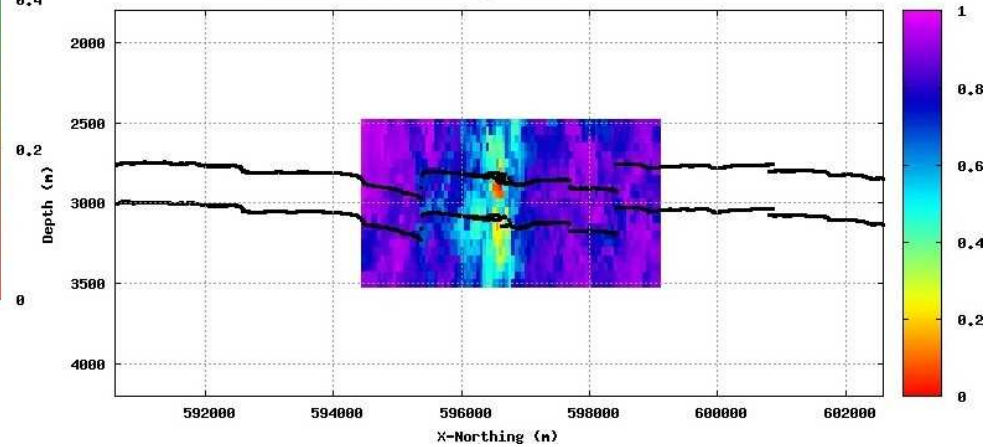
CORRVL, depth slice at ZSHT=2850n event:42 binnul:17



CORRVL, slice at X-Northing 596600n event:42 binnul:17

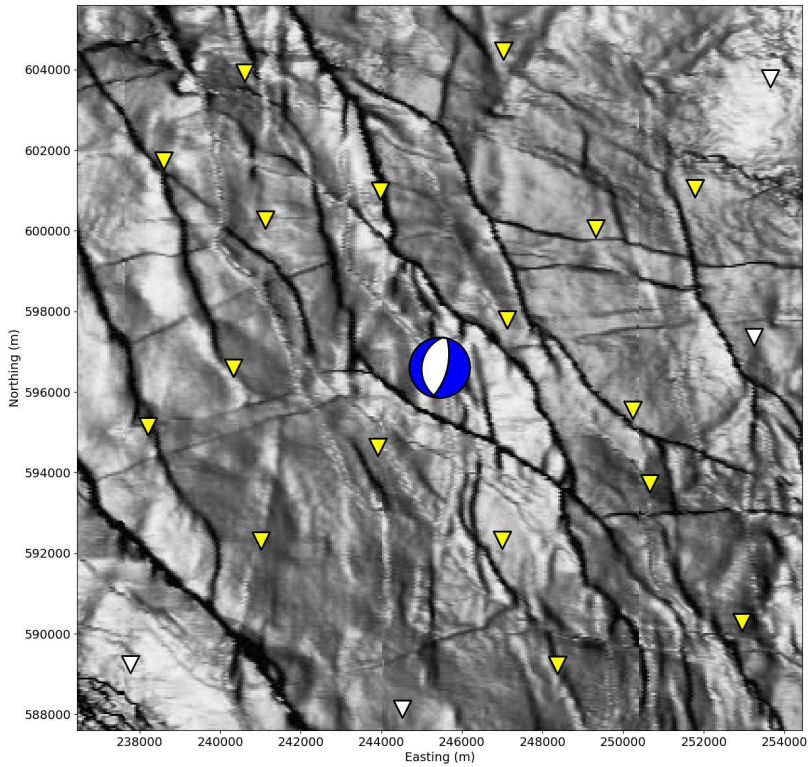


CORRVL, slice at Y-Easting 245450n event:42 binnul:17

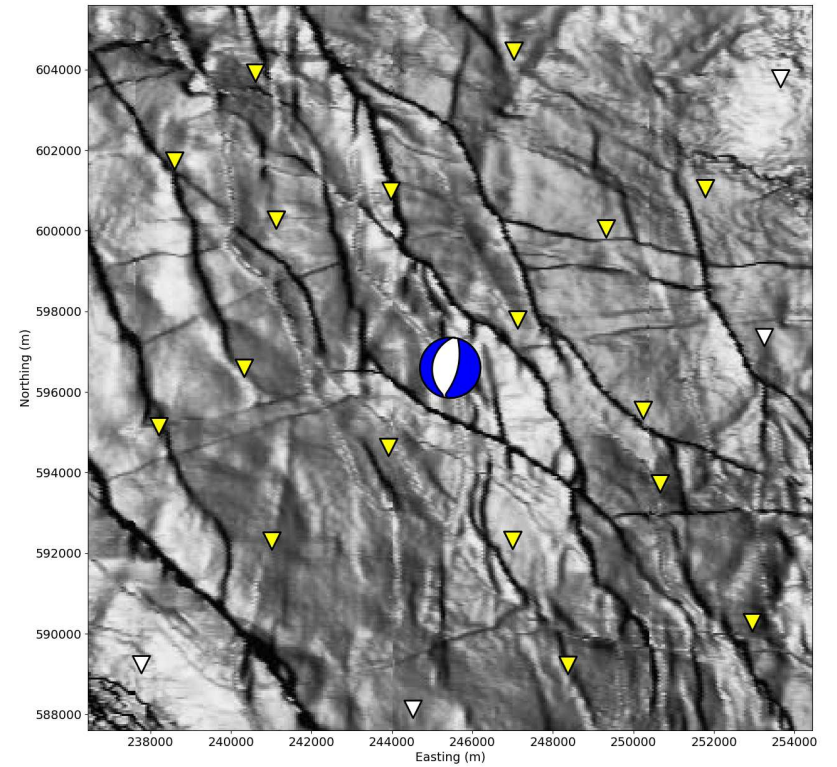


Moment tensor

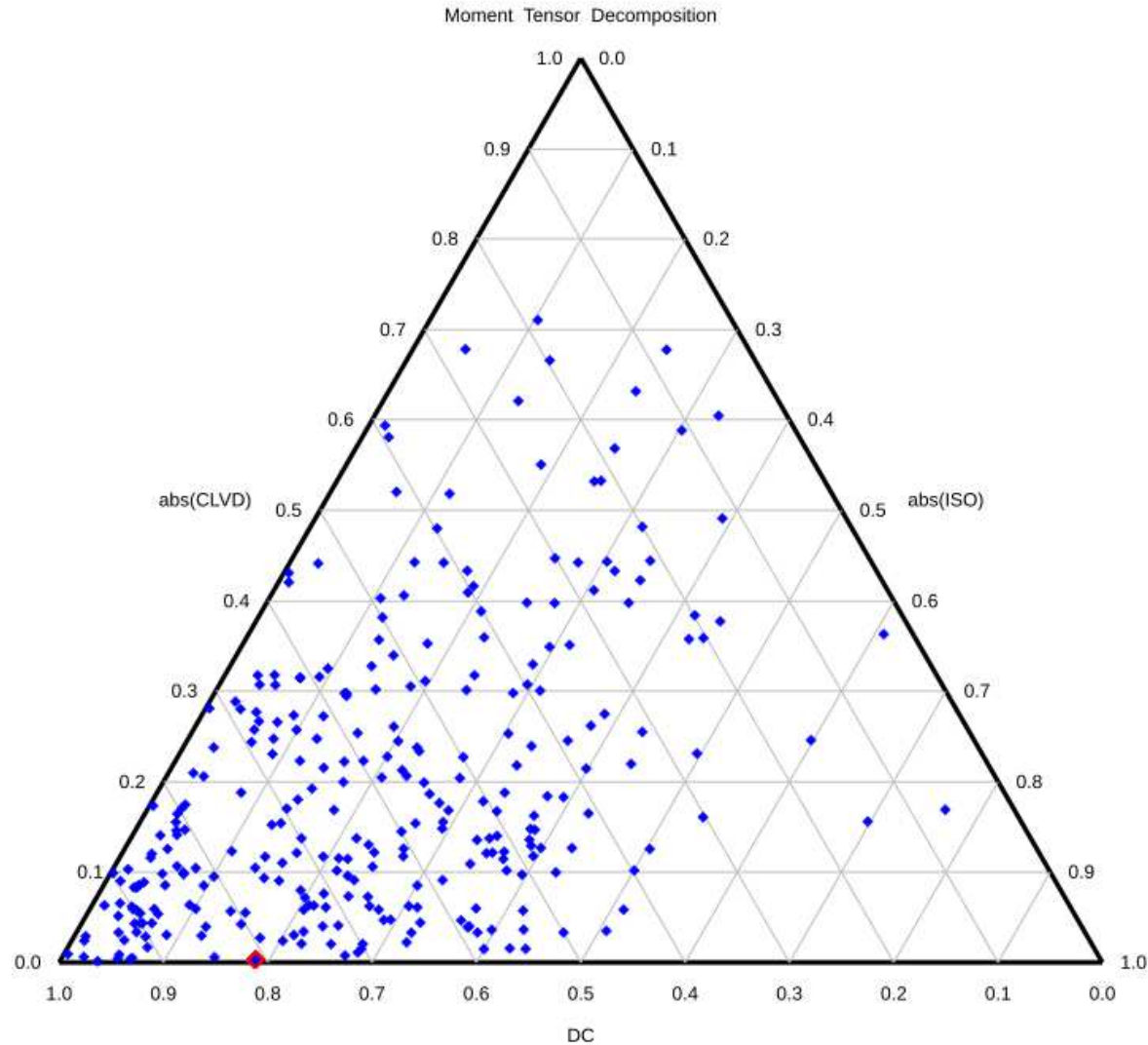
Double-coupled part



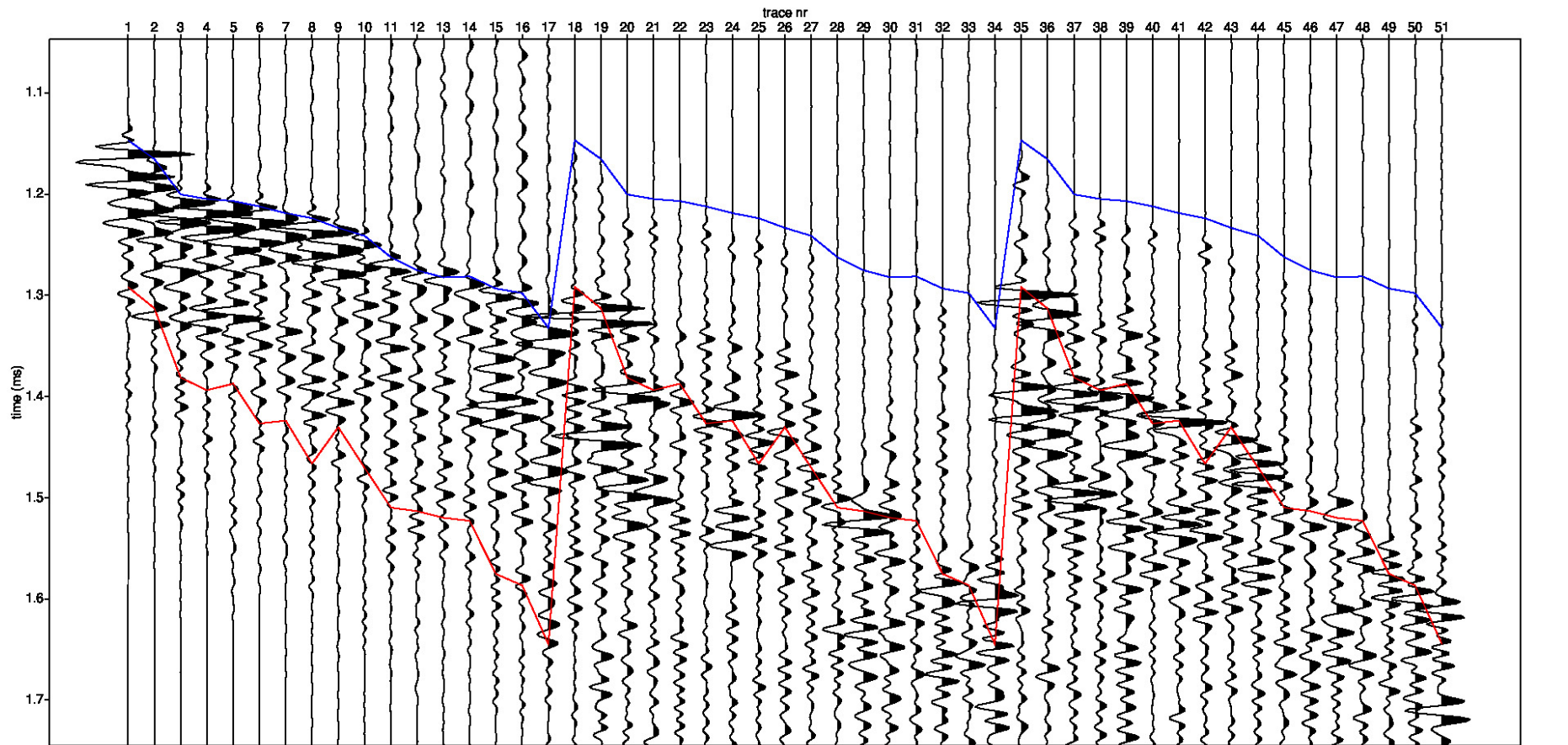
Full



Moment Tensor: Decomposition

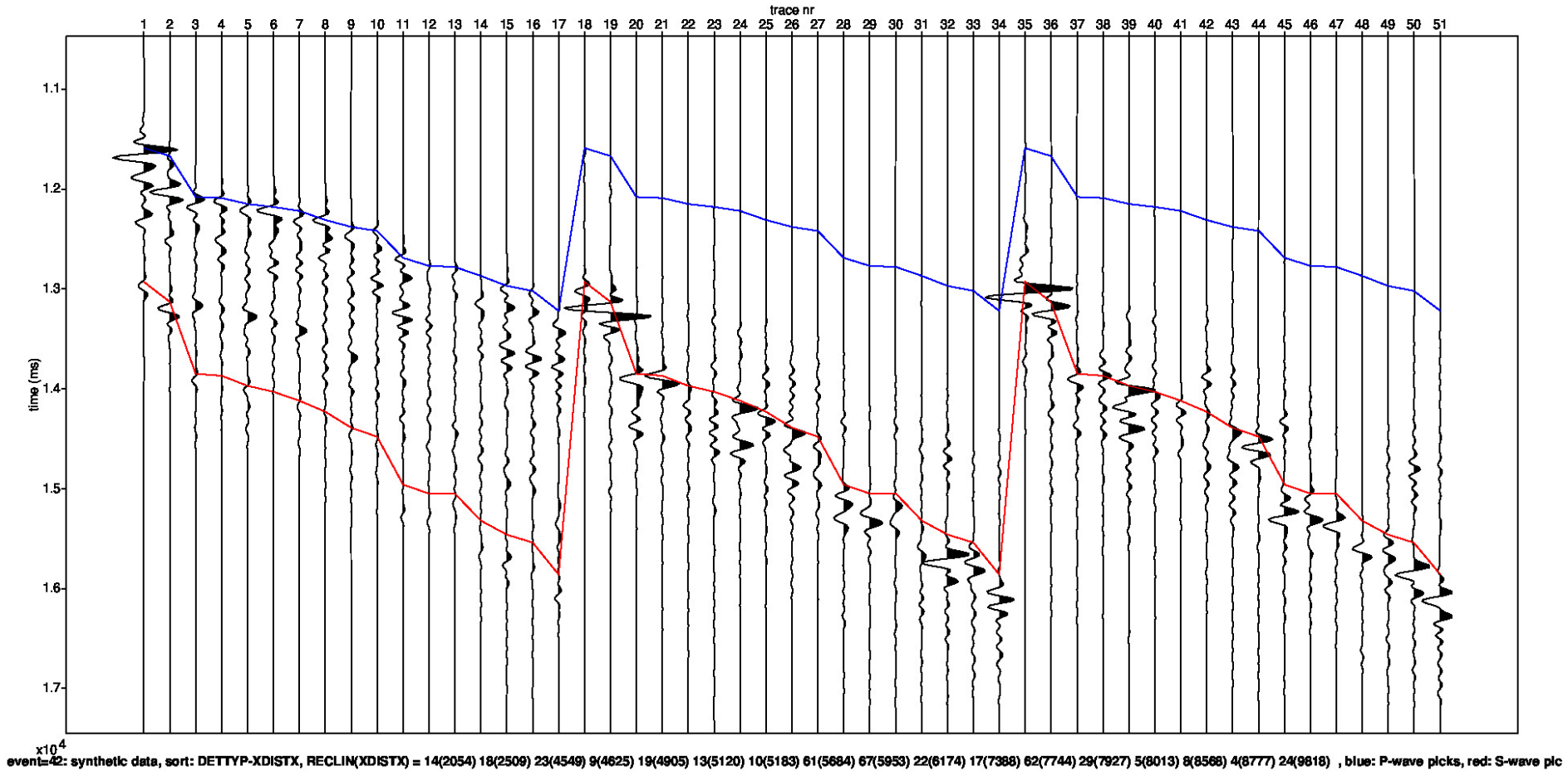


Field data traces



$\times 10^4$
event=42: real data, sort: DETTYP-XDISTX, RECLIN(XDISTX) = 14(2054) 18(2509) 23(4549) 9(4625) 19(4905) 13(5120) 10(5183) 61(5684) 67(5953) 22(6174) 17(7388) 62(7744) 29(7927) 5(8013) 8(8568) 4(8777) 24(9818) , blue: P-wave picks, red: S-wave picks

Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the current event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 10 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 11 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 12 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



Appendix F – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 0,6 bij Zeerijp op 7 oktober

Hier volgt een evaluatie van de opnames gemaakt met het seismisch meetnet geopereerd door KNMI van de aardbeving bij Zeerijp op 4 oktober. De evaluatie is gemaakt door het laboratorium van Shell in Amsterdam gebruikmakend van de geautomatiseerde Full-Wave-Form inversie.

Aan deze aardbeving is nummer 43 toegekend.



Event 43 - Zeerijp

07 October 2021 11:53:20

22 October 2021

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	07 October 2021
Time	11:53:20.265000

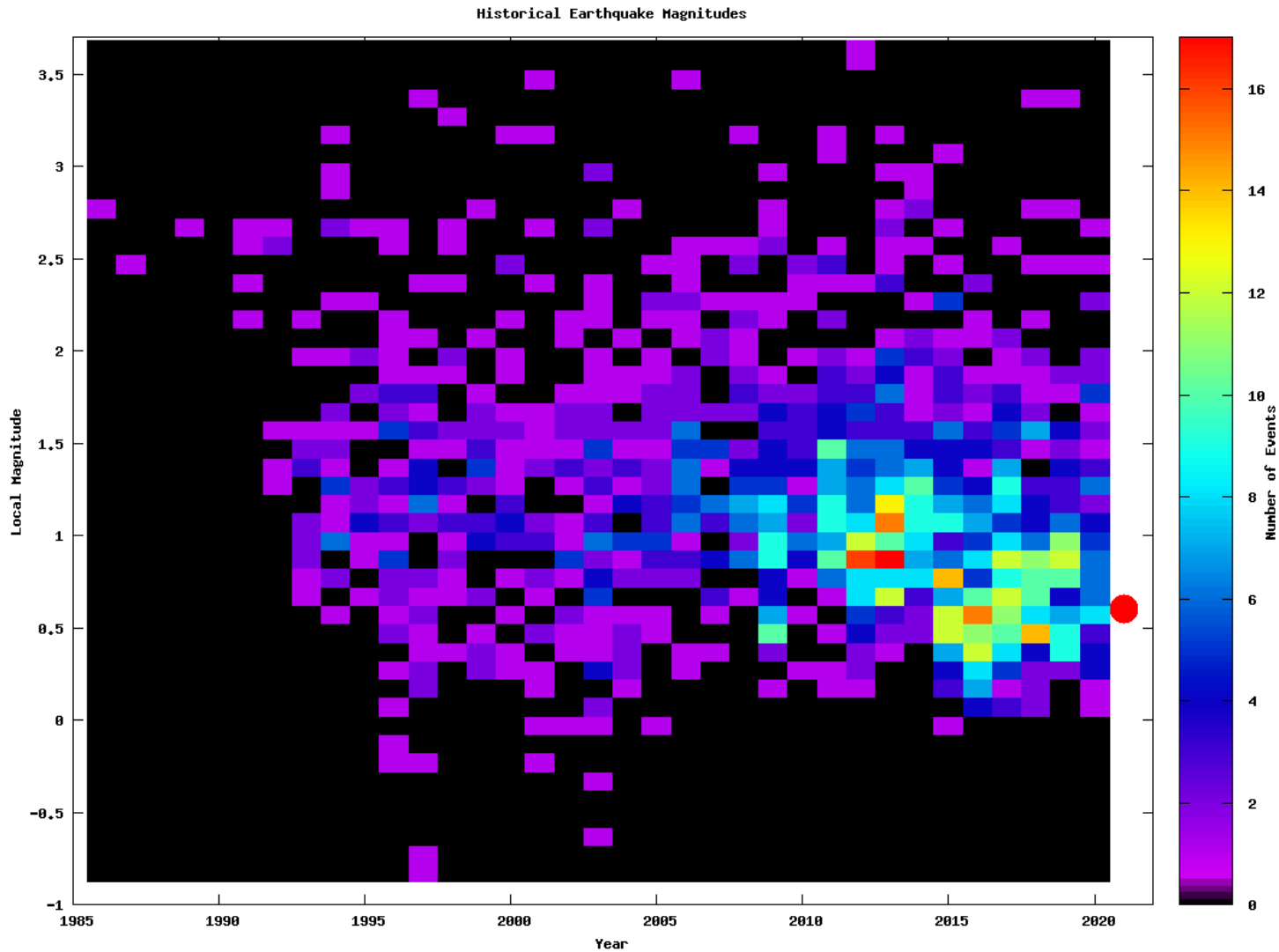
The event is located at:

Location	Zeerijp
Northing (m)	596650
Easting (m)	245550
Depth (m)	3000

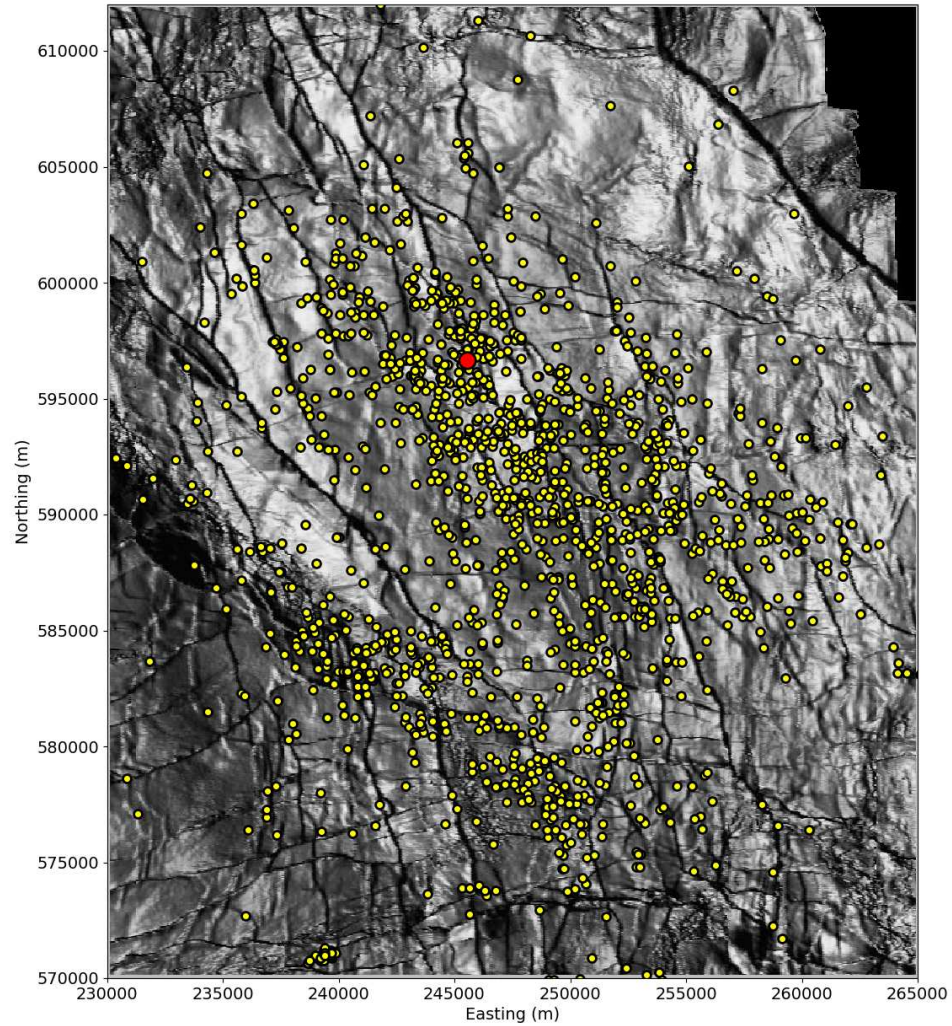
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	153.51	292.43
Dip angle (degree)	36.41	60.11
Rake angle (degree)	-55.27	-112.96
Isotropic (percentage)	-35.99	-35.99
CLVD (percentage)	-1.11	-1.11
Magnitude M_L	0.60	0.60

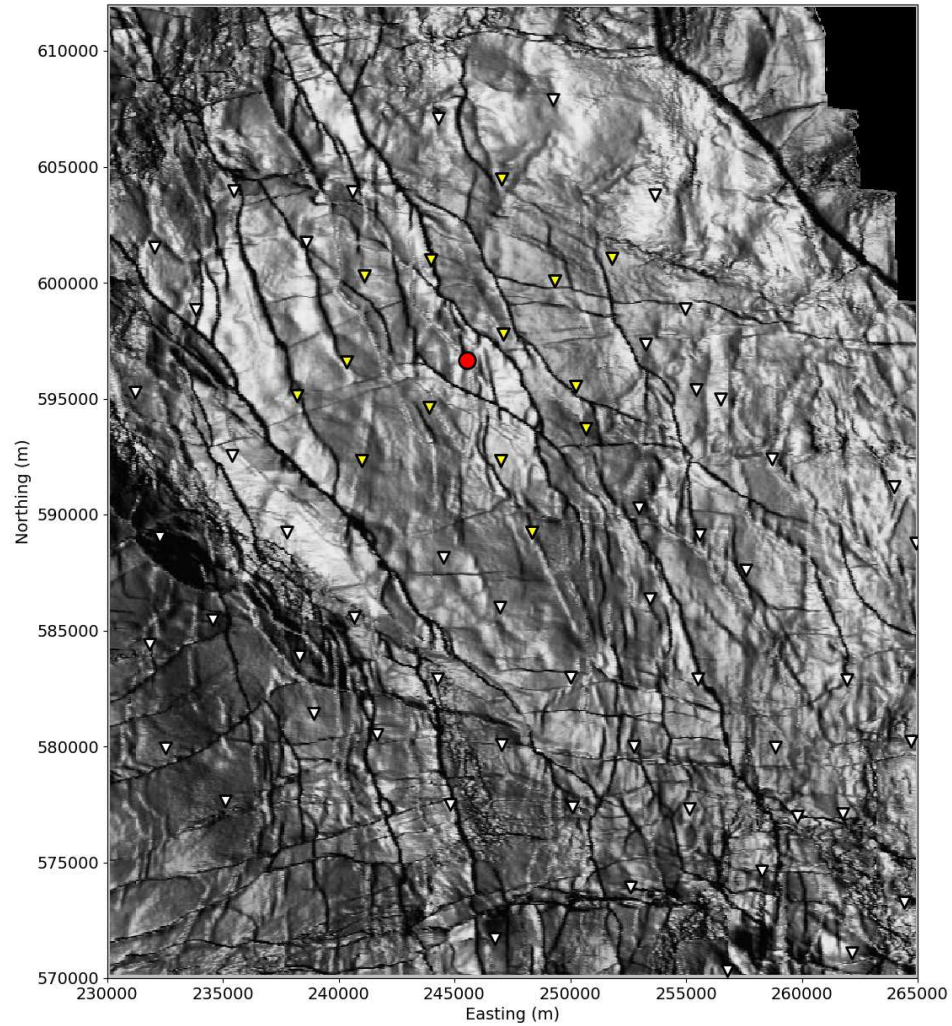
Magnitude summary



Regional and historical map

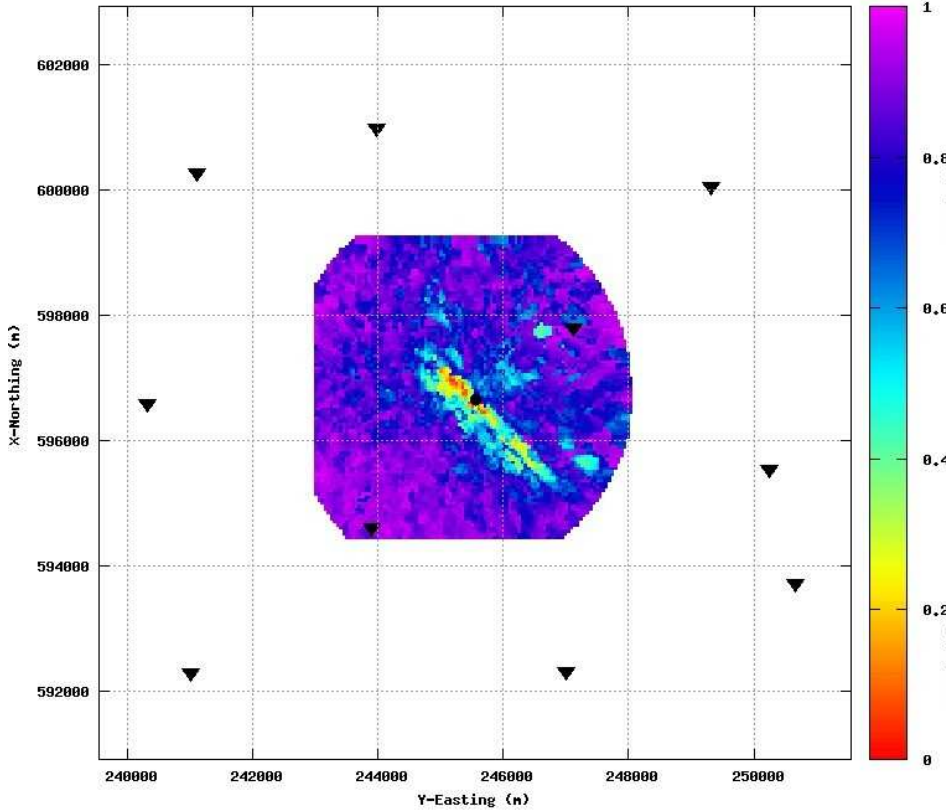


Event location - Map

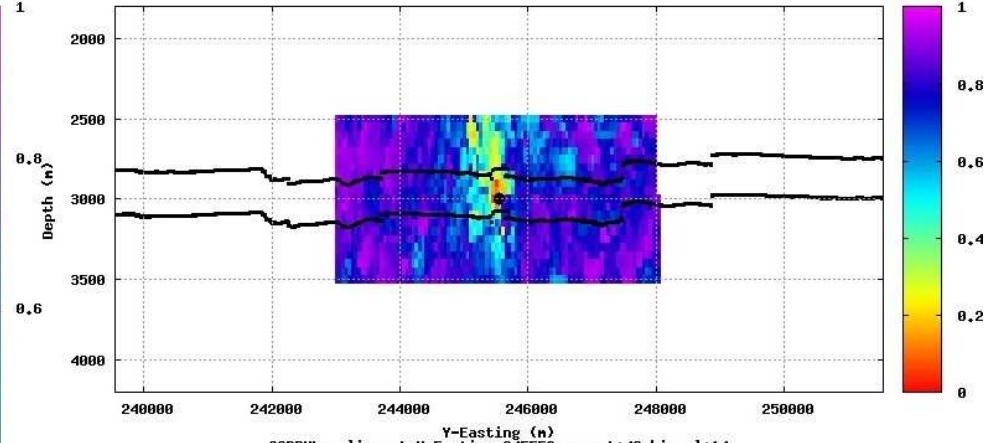


Event location and depth

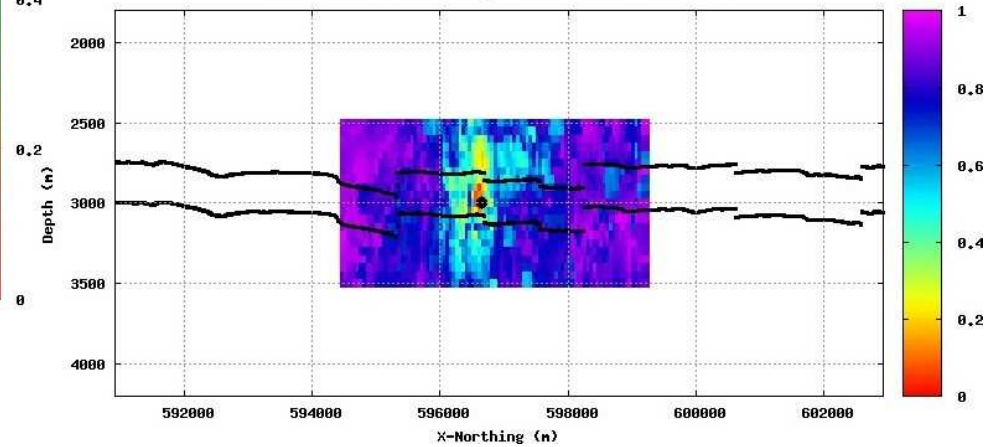
CORRVL, depth slice at ZSHT=3800m event:43 binnul:14



CORRVL, slice at X-Northing 596650m event:43 binnul:14

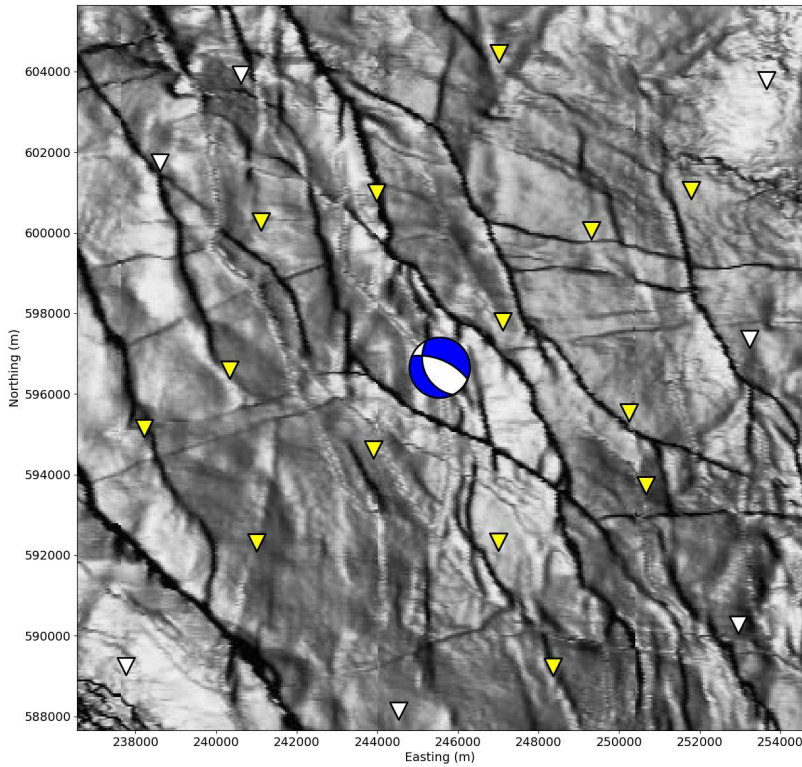


CORRVL, slice at Y-Easting 245550m event:43 binnul:14

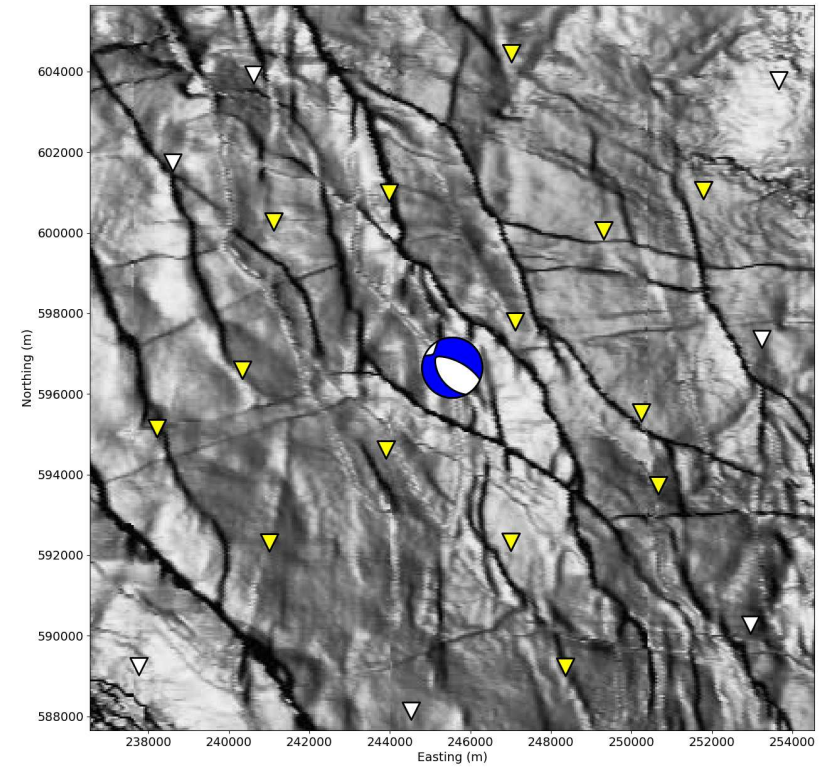


Moment tensor

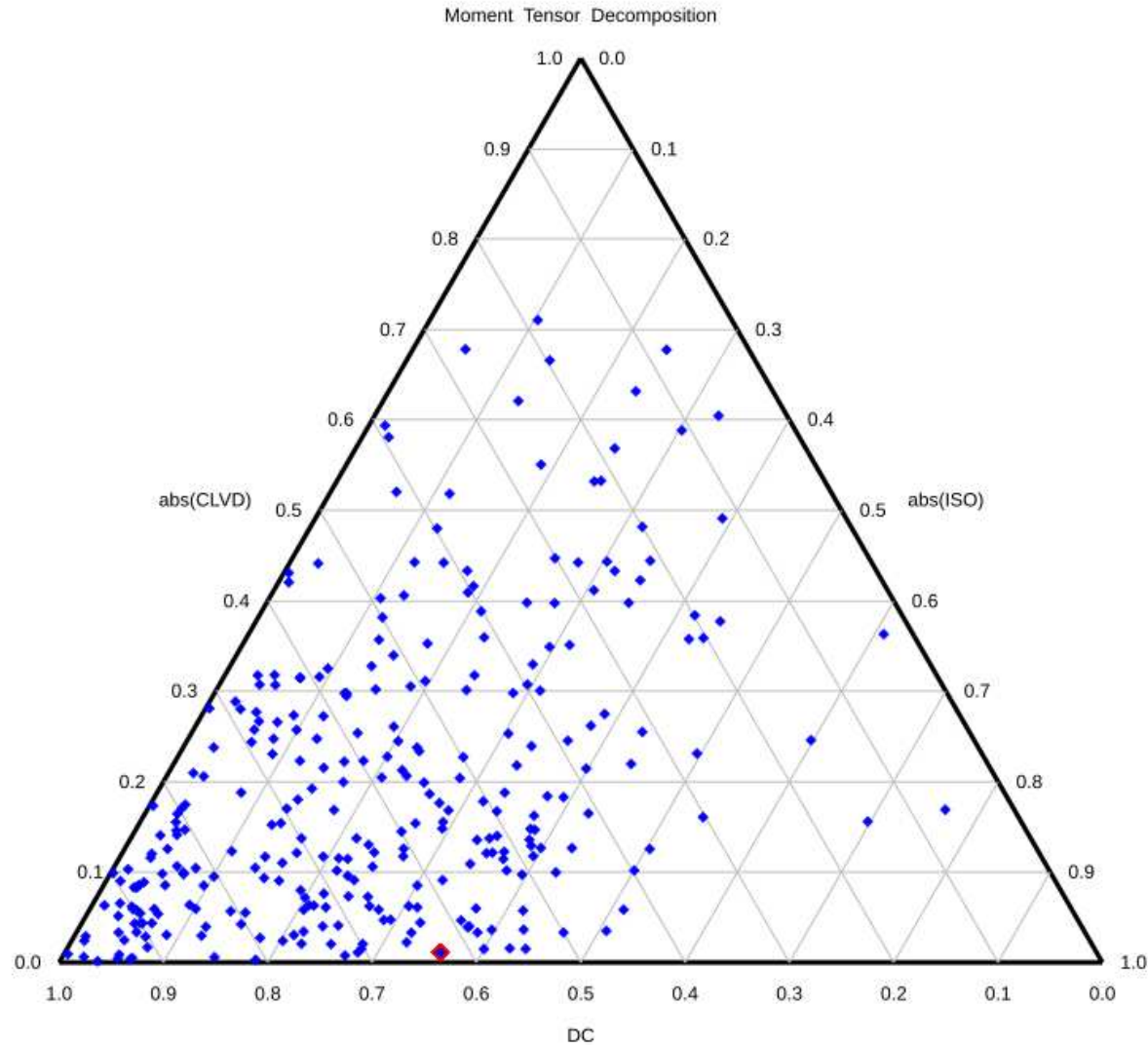
Double-coupled part



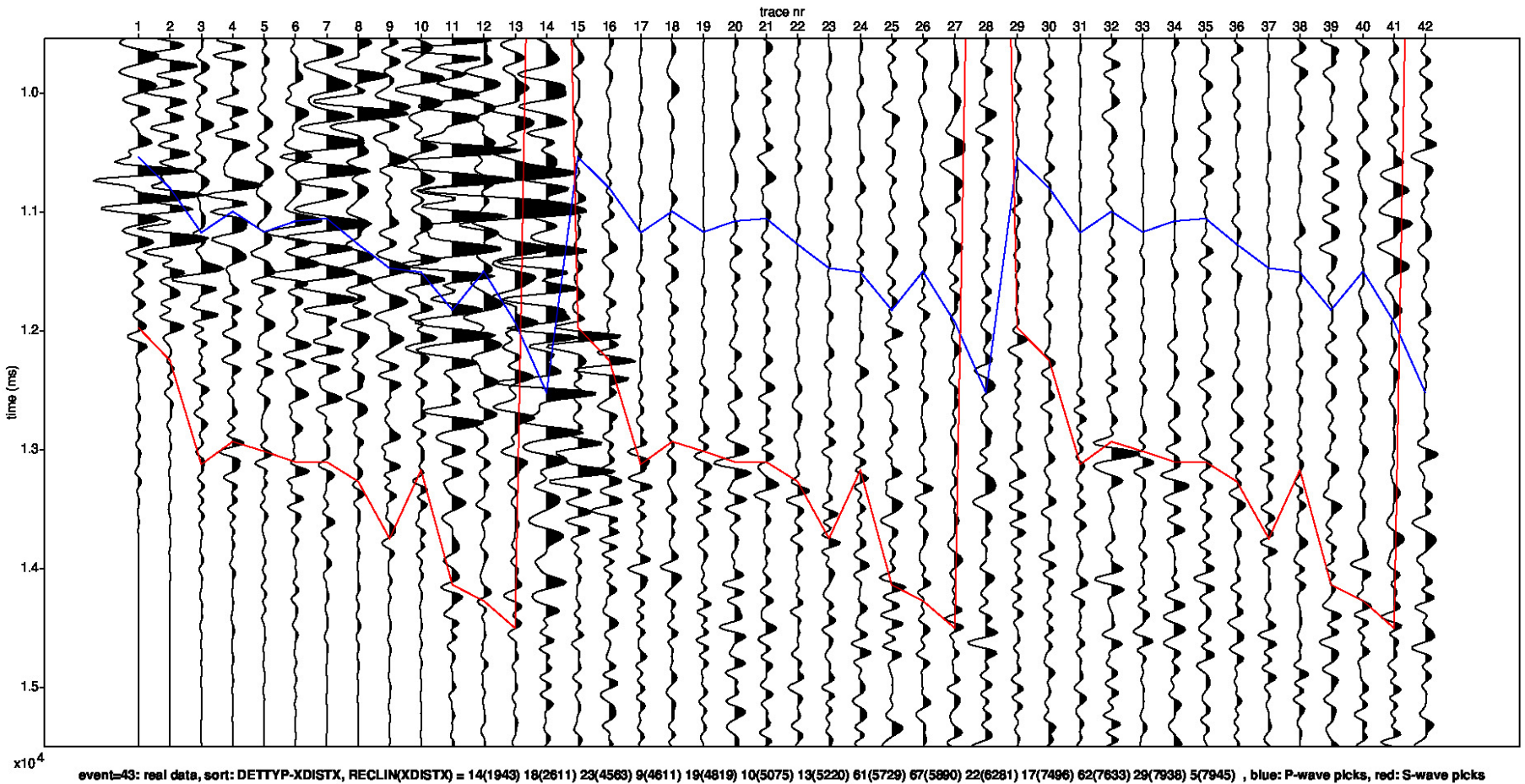
Full



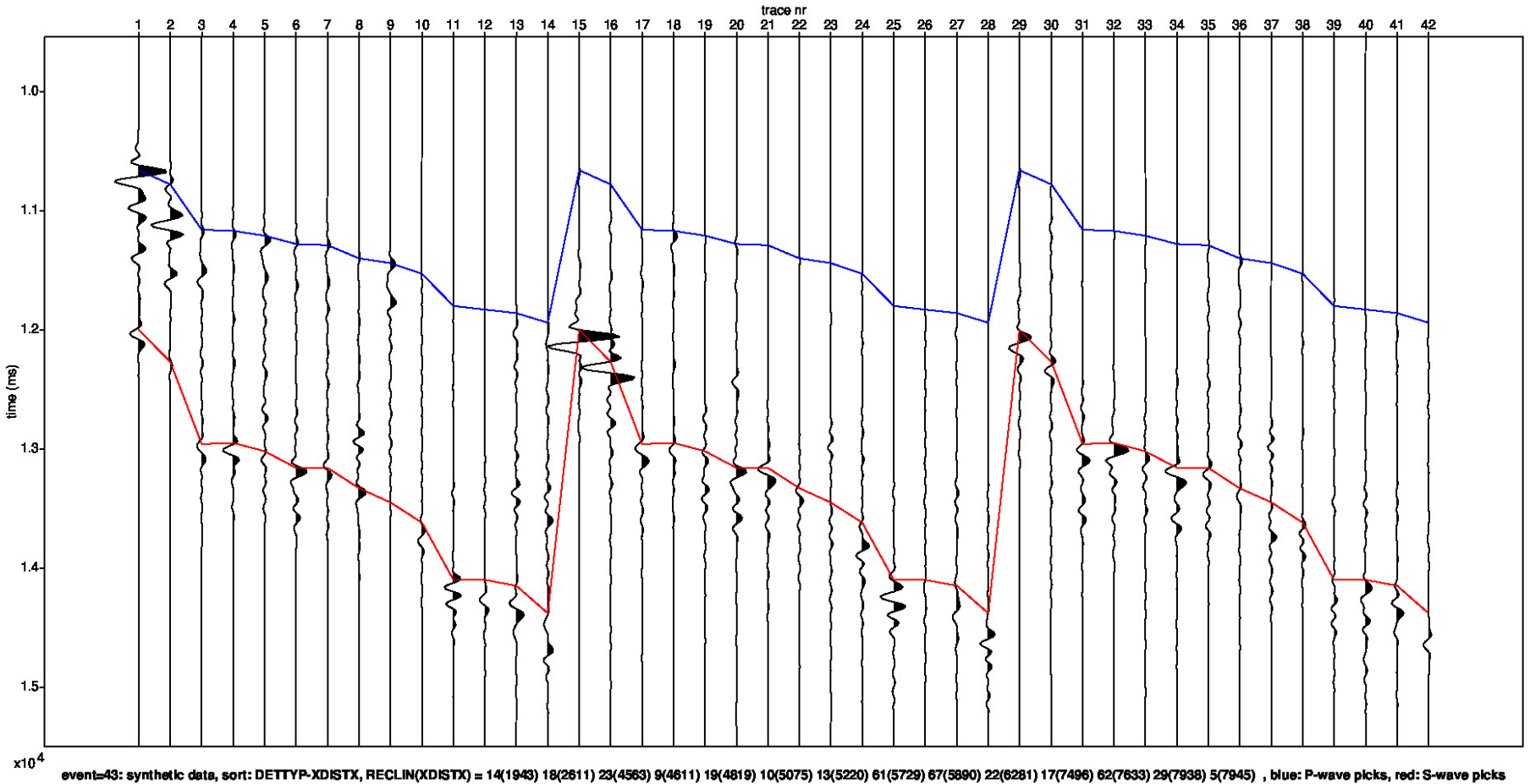
Moment Tensor: Decomposition



Field data traces



Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the current event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 10 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 11 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 12 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



Appendix G – Evaluatie van het hypocentre en het bronmechanisme van de aardbeving met een kracht van 0,8 bij Zeerijp op 22 oktober

Hier volgt een evaluatie van de opnames gemaakt met het seismisch meetnet geopereerd door KNMI van de aardbeving bij Zeerijp op 4 oktober. De evaluatie is gemaakt door het laboratorium van Shell in Amsterdam gebruikmakend van de geautomatiseerde Full-Wave-Form inversie.

Aan deze aardbeving is nummer 46 toegekend.



Event 46 - Zeerijp

22 October 2021 21:11:20

25 October 2021

Induced Seismicity Taskforce

Disclaimer

- The results presented in this report have been automatically generated using an unconstrained full waveform, event location and moment tensor inversion workflow, developed by the Induced Seismicity Taskforce at Shell.
- These results have not been previously reviewed.
- For questions related to the results then you should contact:
 - Chris Willacy (Christopher.Willacy@Shell.com) or
 - Jan-Willem Blokland (Jan-Willem.Blokland@Shell.com)

Event summary

The event happened at:

Date	22 October 2021
Time	21:11:20.640000

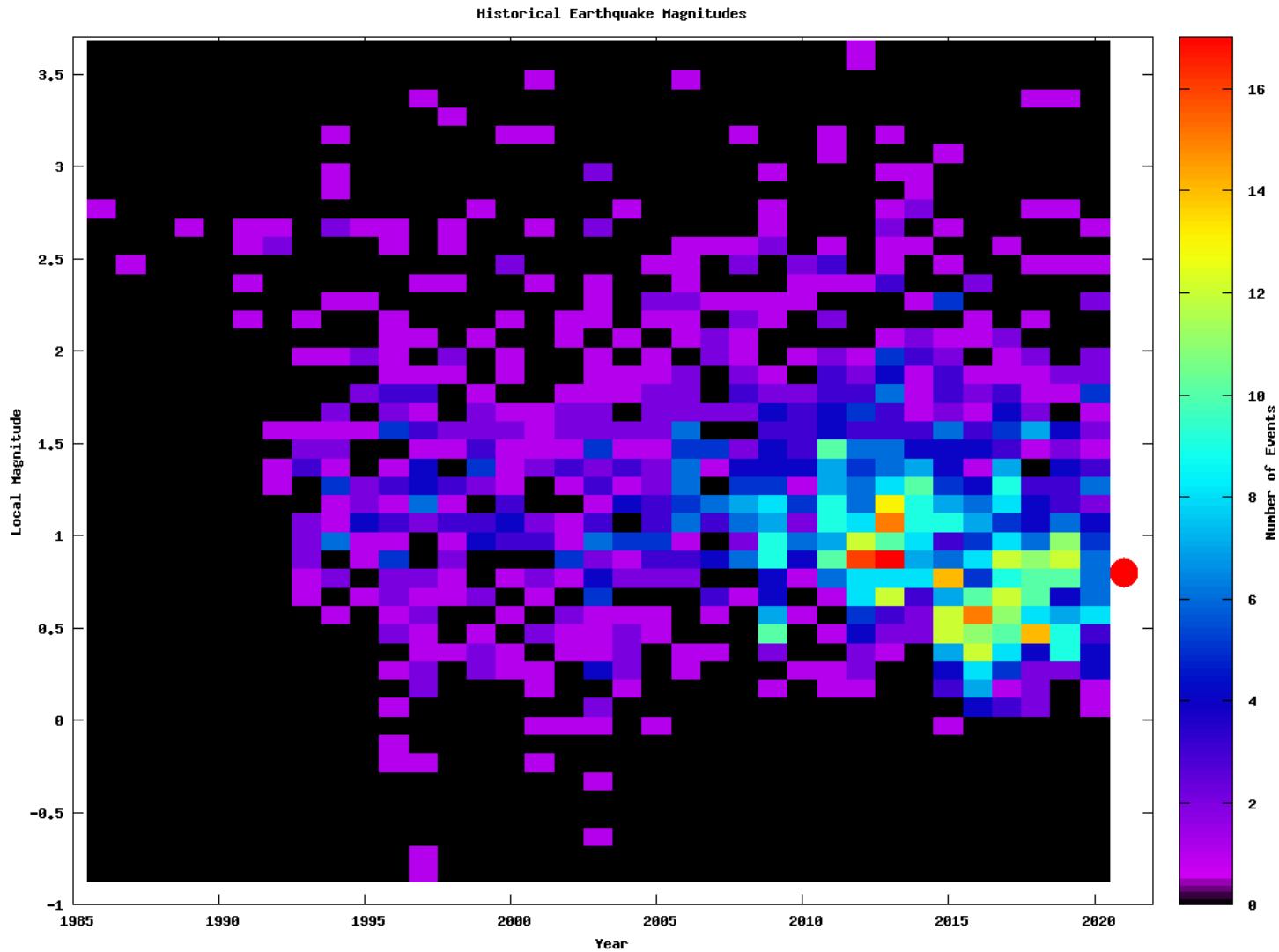
The event is located at:

Location	Zeerijp
Northing (m)	596400
Easting (m)	245550
Depth (m)	2850

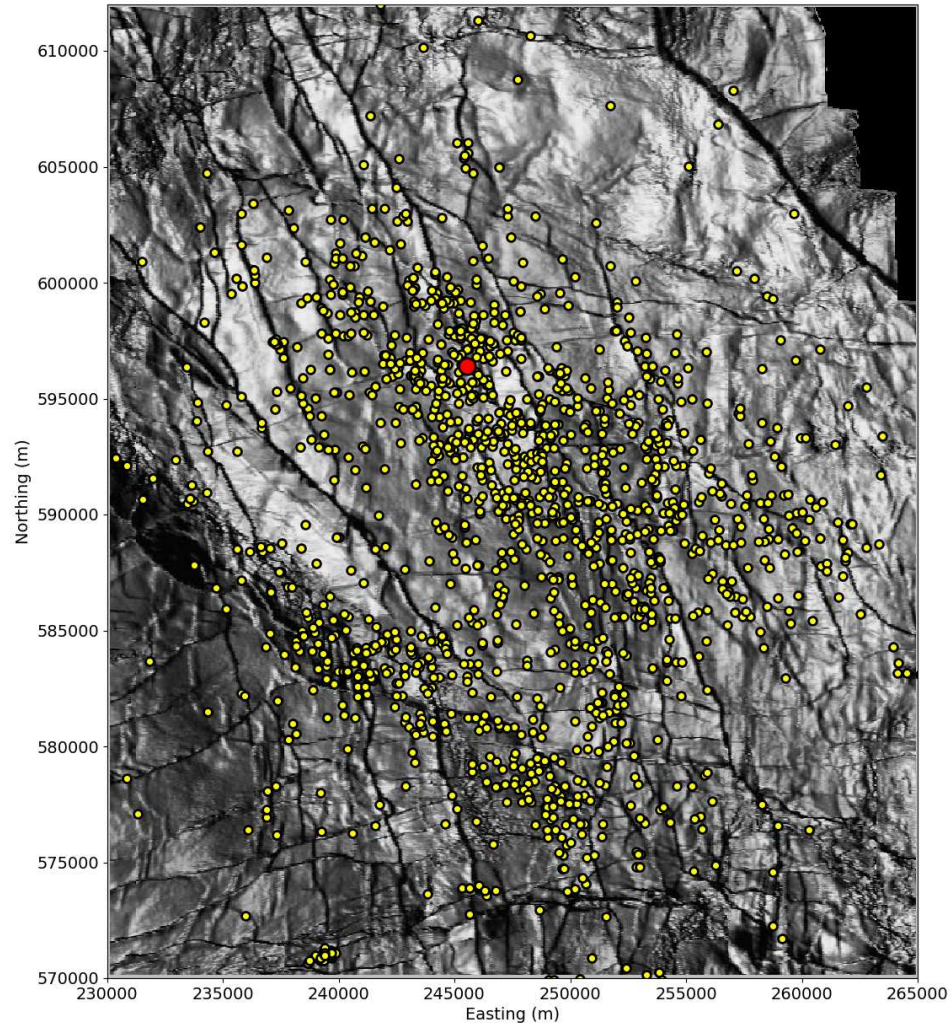
The source characteristics are:

	Solution 1	Solution 2
Strike angle (degree)	160.37	13.80
Dip angle (degree)	47.04	58.69
Rake angle (degree)	-118.52	-65.86
Isotropic (percentage)	-39.34	-39.34
CLVD (percentage)	12.85	12.85
Magnitude M_L	0.80	0.80

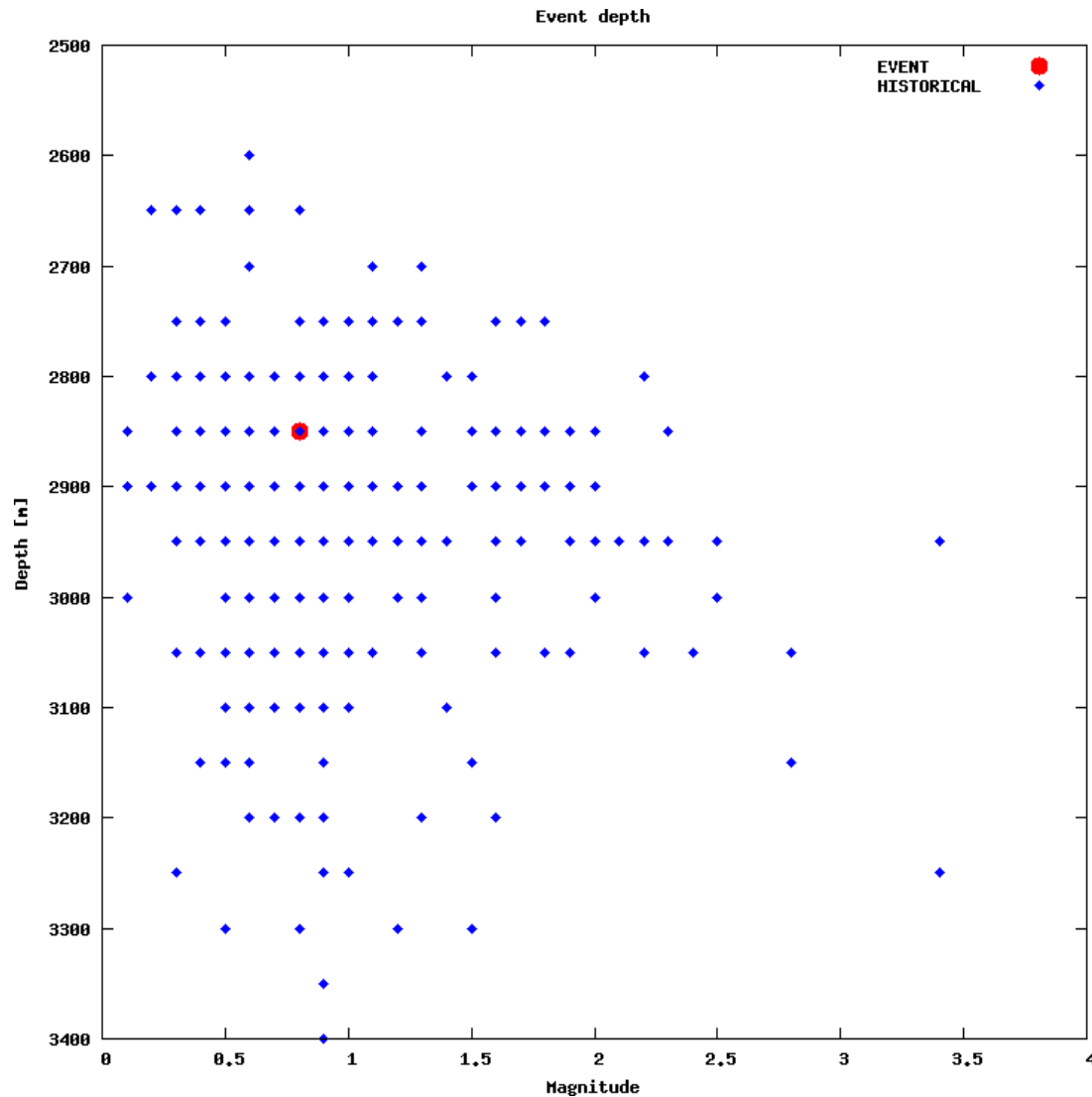
Magnitude summary



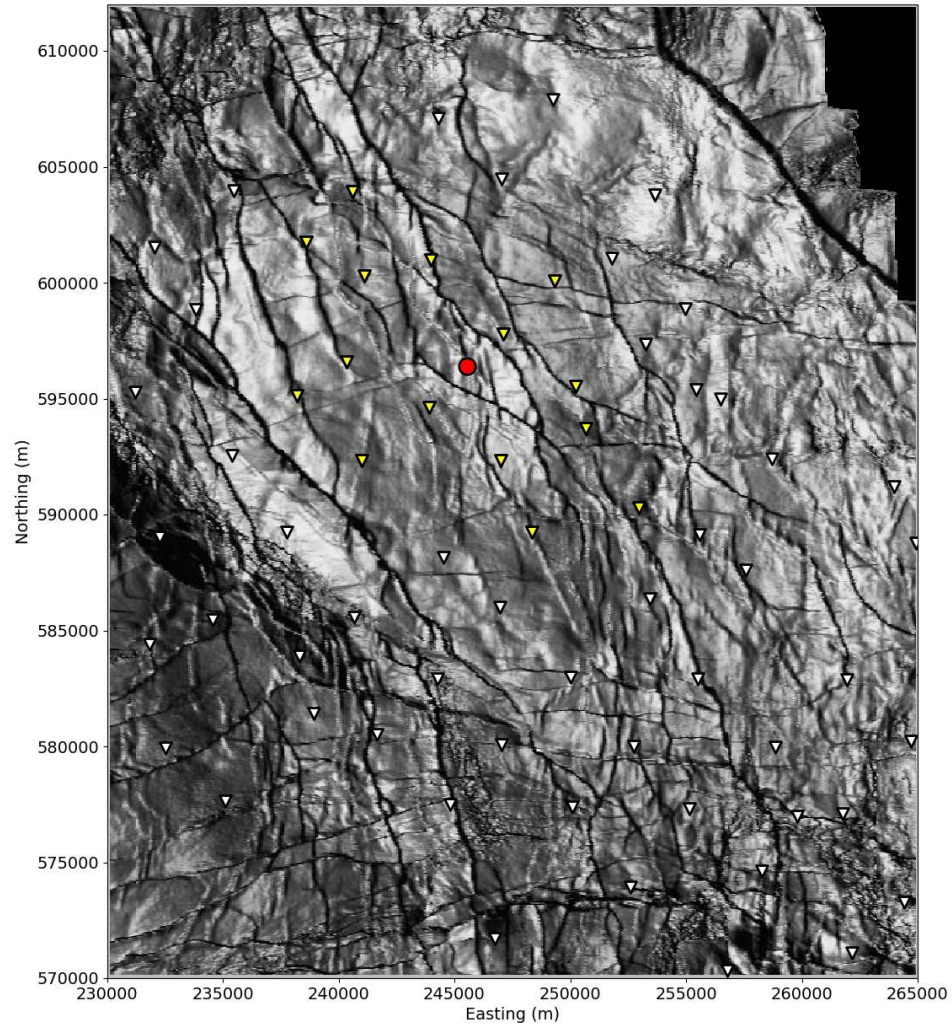
Regional and historical map



Event depth summary

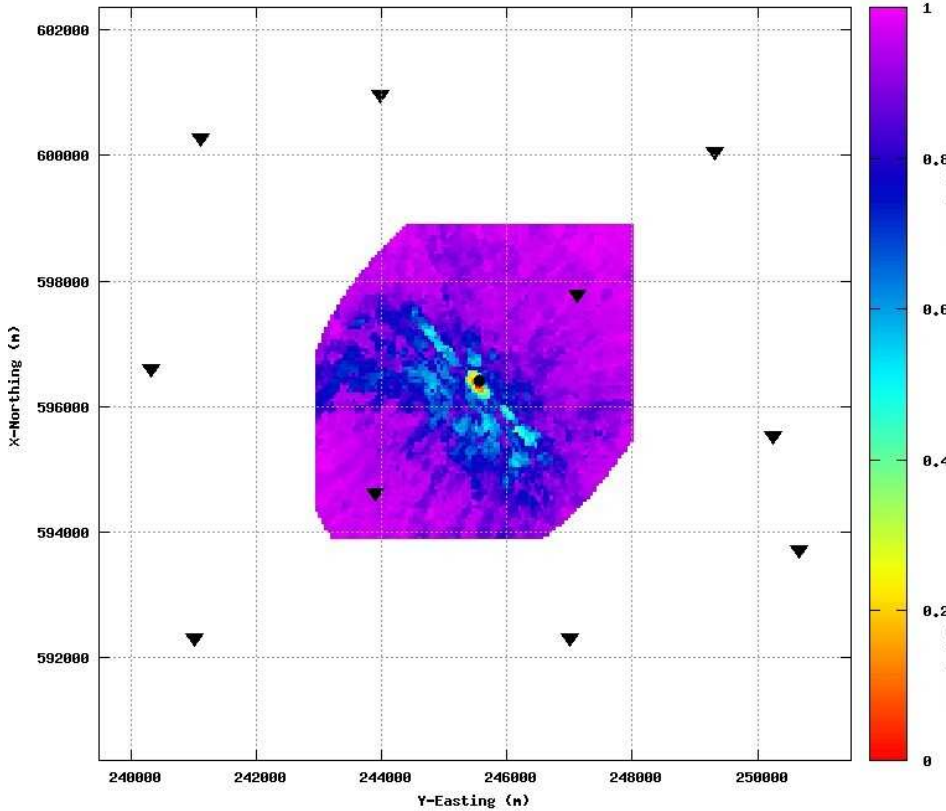


Event location - Map

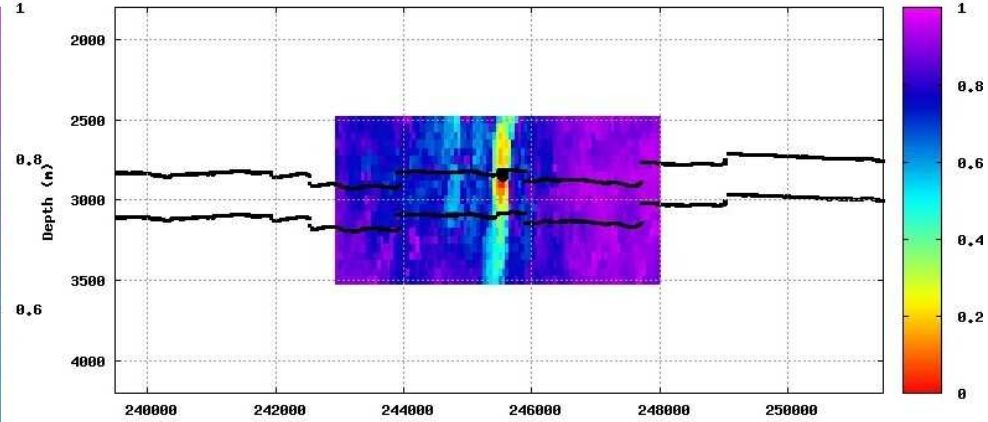


Event location and depth

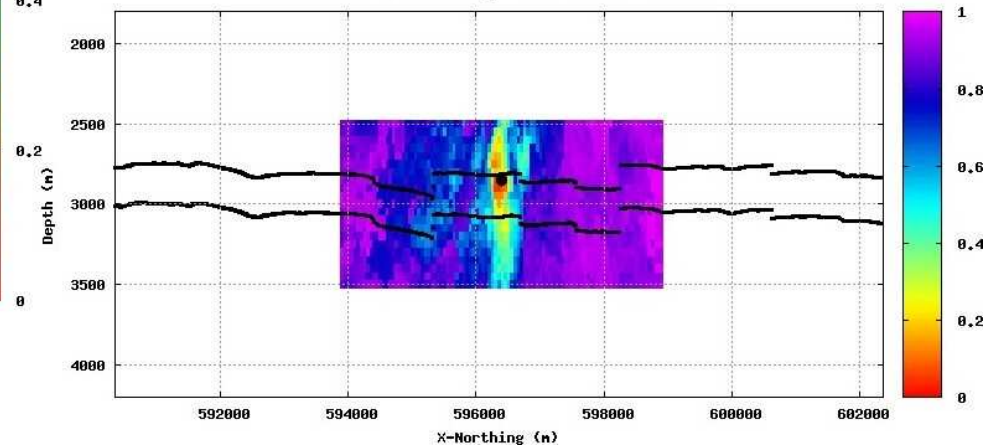
CORRVL, depth slice at ZSHT=2850n event:46 binnul:15



CORRVL, slice at X-Northing 596400n event:46 binnul:15

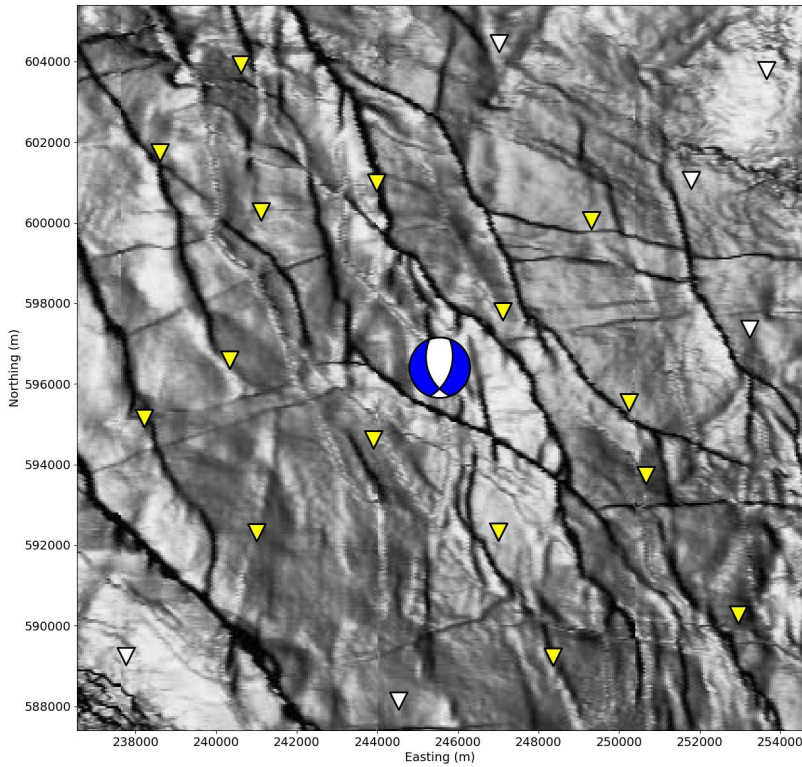


CORRVL, slice at Y-Easting 245550n event:46 binnul:15

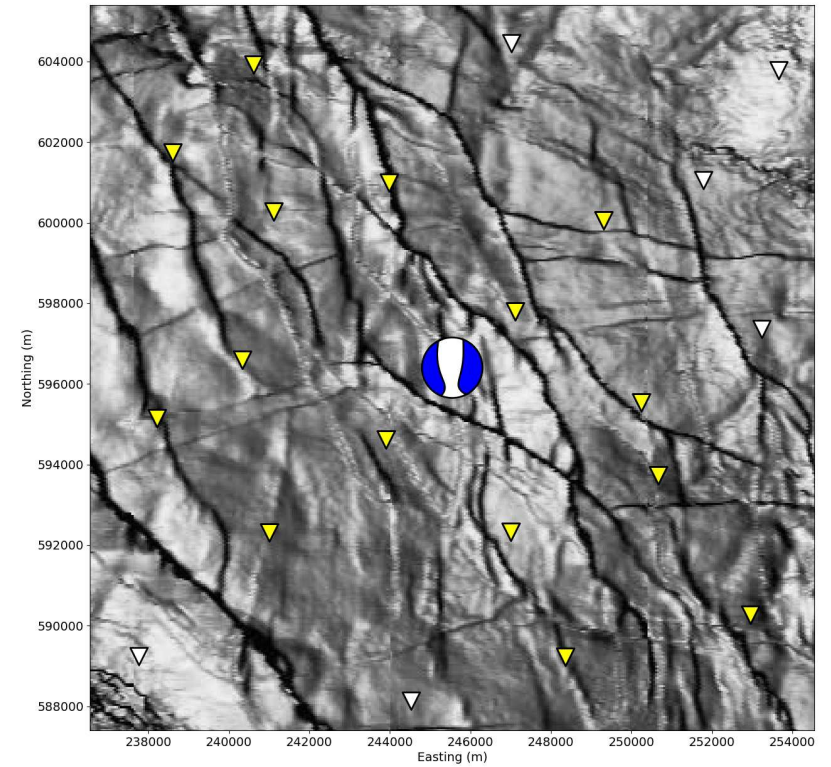


Moment tensor

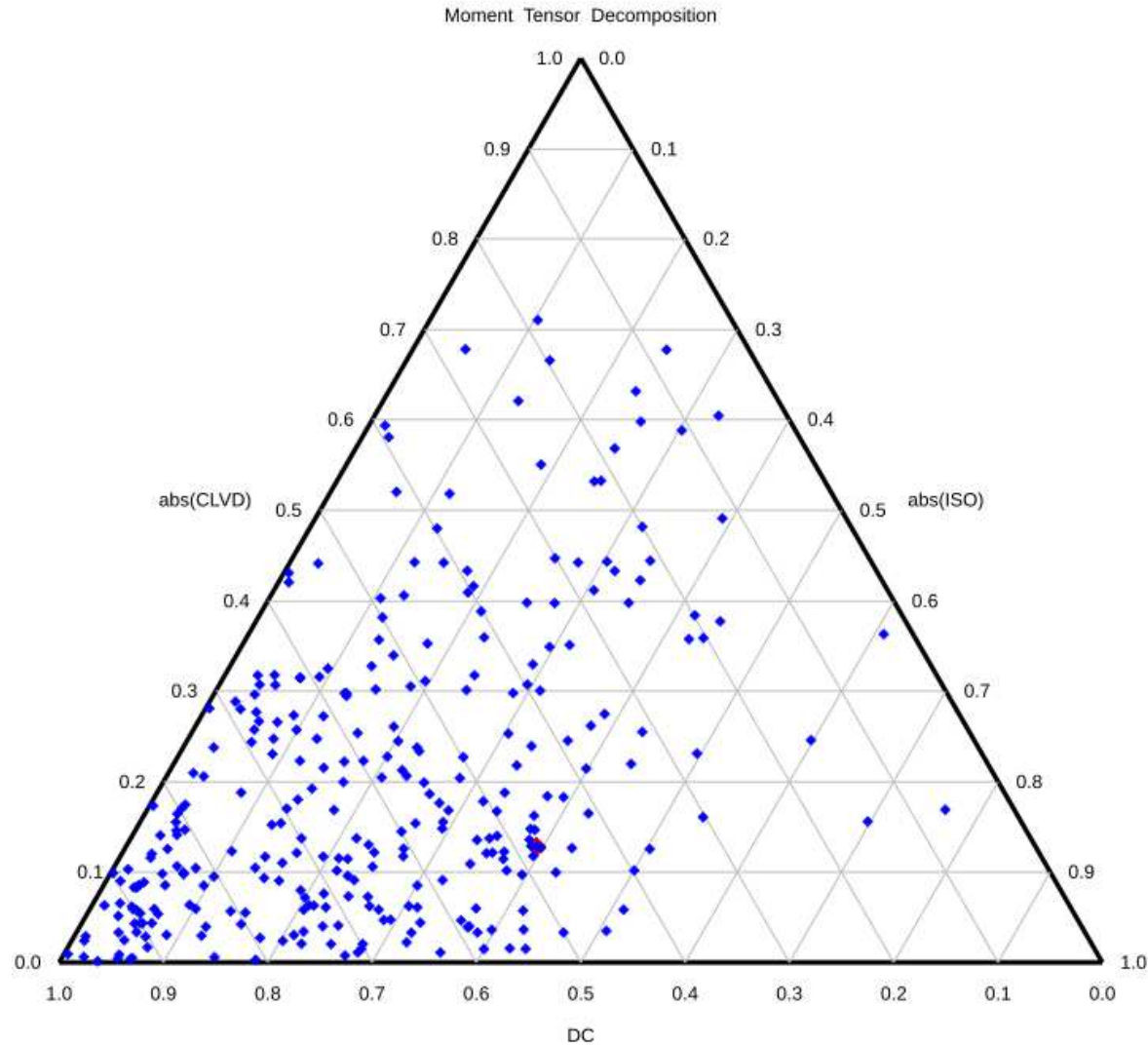
Double-coupled part



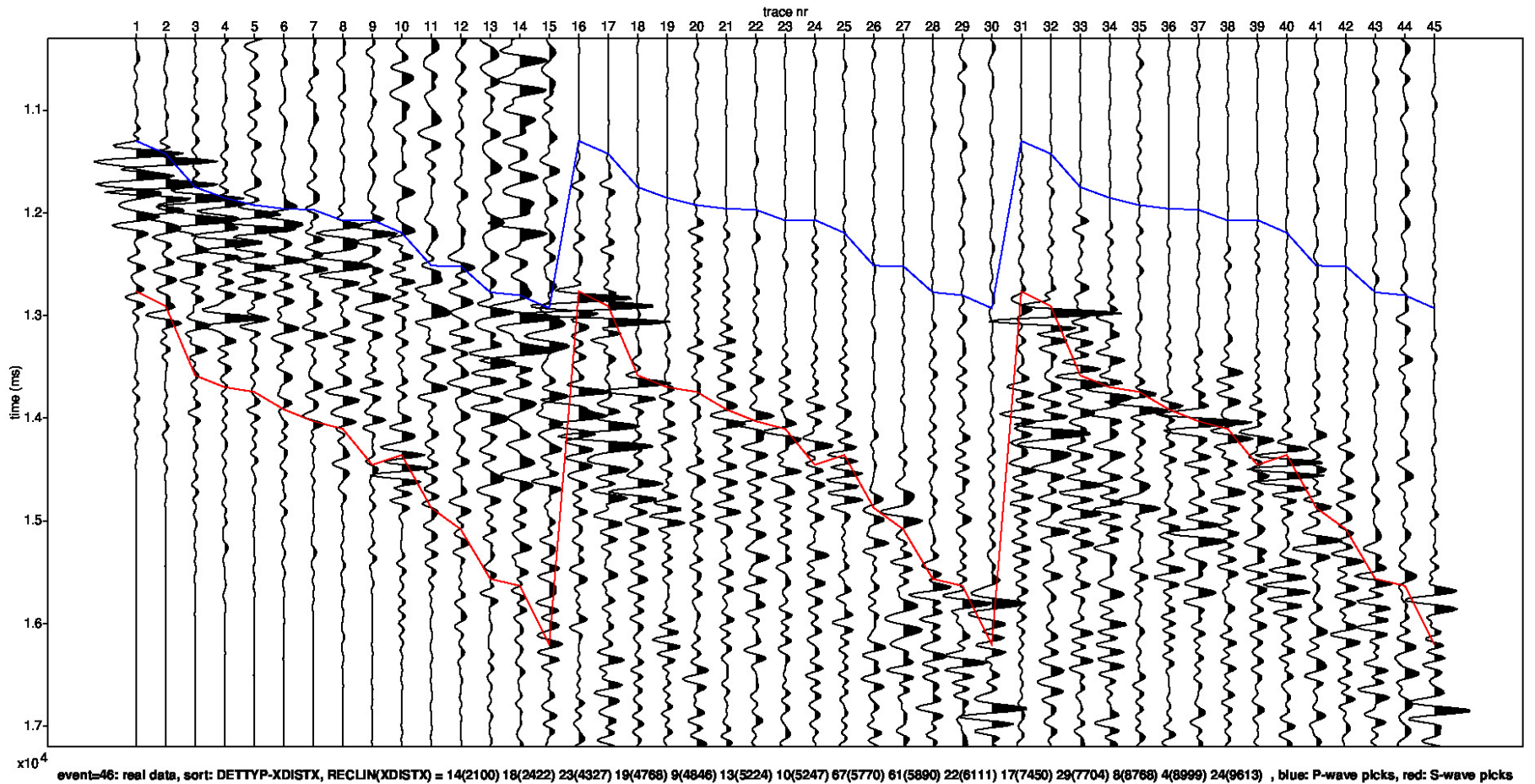
Full



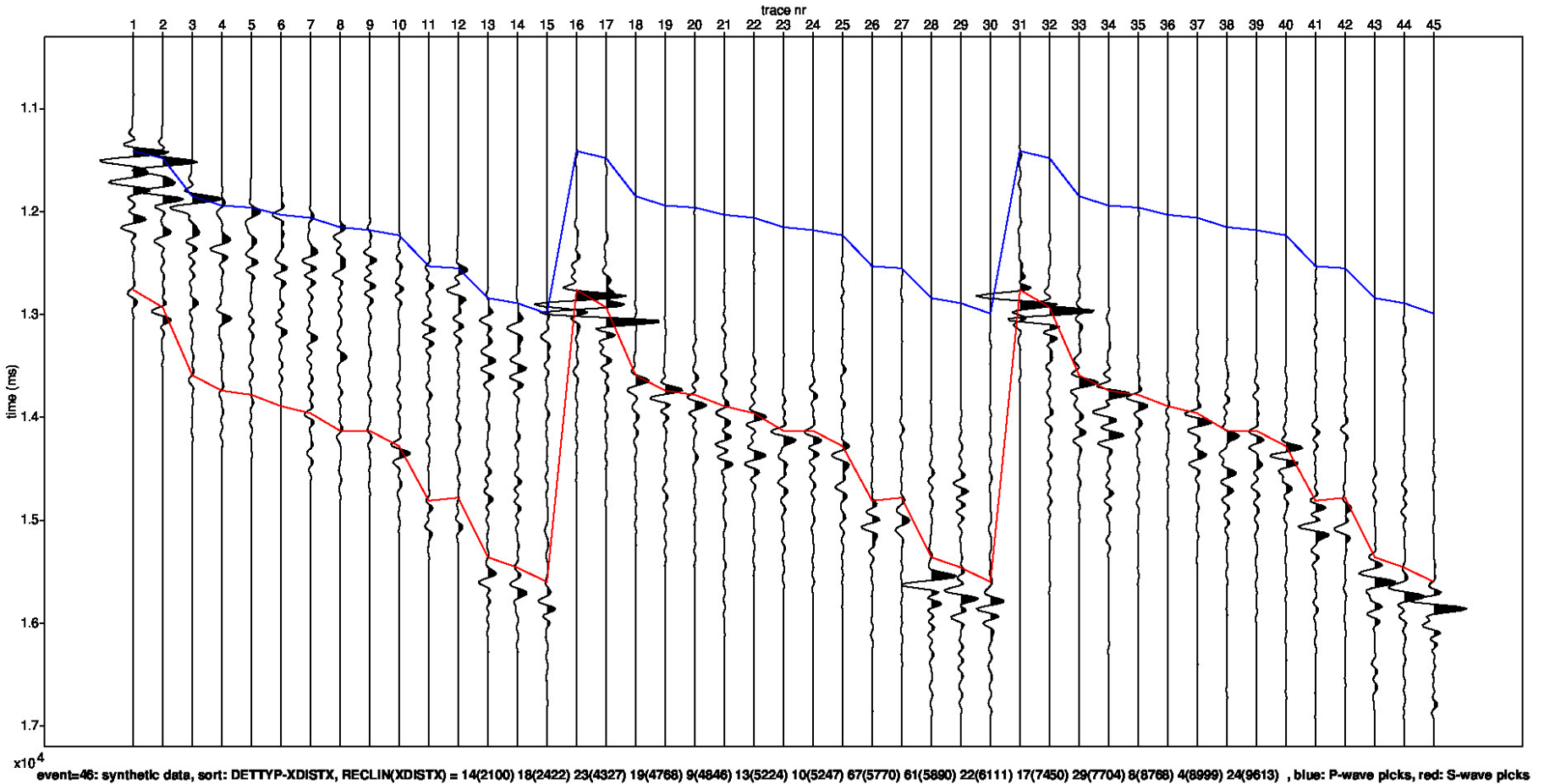
Moment Tensor: Decomposition



Field data traces



Modelled data traces



Appendix - Figure Captions

Page

- 3 Detailed parameter summary for the event. Both primary and secondary focal plane solutions are provided from the moment tensor inversion.
- 4 Magnitude summary. Prior years are displayed as a “heat map” where the number of events for a given magnitude is displayed per grid cell. The current event is displayed in red.
- 5 Regional map showing the historical events from KNMI (1986-2019) in blue and the location of the current event in red.
- 6 Event depth summary. Depths from our automatic workflow (2018-2020) are shown in blue and the current event depth is shown in red. The resolution of the vertical grid is 50m.
- 7 Event location details for the current event, superimposed on the top Rotliegend depth horizon. Station locations as shown as inverted triangles. Blue triangles are the actual stations used to locate the event whose epicentre is shown by the red dot.
- 8 QC displays extracted from the objective function for the current event location. The colour attribute displayed is 1 minus the normalized cross correlation between observed and synthetic waveforms. Station locations are shown as black inverted triangles on the map and the event location is shown by the black dot (left plot). The west to east and north to south vertical profiles are shown on the right. The top and base reservoir are shown for reference as black lines.

Appendix - Figure Captions (continued)

Page

- 9 Moment tensor inversion results for the event. The double couple portion of the moment tensor is shown on the left and the full moment tensor is displayed on the right. Station locations used in the inversion are shown as inverted triangles.
- 10 Ternary diagram showing the moment tensor decompositions into relative double-couple(DC), isotropic (ISO) and compensated linear vector dipole (CLVD) contributions. The automatic Shell events (2018-2020) are shown in blue and the current event is highlighted in red.
- 11 Observed traces for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.
- 12 Modelled waveform data for each station and each component. The automatic picks for the P- and S-waves are indicated by the blue and red lines respectively.



