



NAM

Rapportage recente aardbevingen Wirdum en Garsthuizen 2016/2017

Datum 14 Maart 2017

Inhoudsopgave

1	Introductie	2
1.1	Aanleiding, context en motivatie voor deze rapportage	2
1.2	Overzicht bevingen omgeving Loppersum najaar 2016 en begin 2017	3
2	Welke data zijn bekeken en waarom.....	5
3	Verband tussen recente bevingen en bevingen uit het verleden ?.....	6
4	Verband tussen recente bevingen en de breuken-kaart?	7
5	Verband tussen bevingen en productie-inzet van naburige clusters?	10
6	Verband tussen bevingen en drukverdeling ?	12
7	Verband tussen bevingen en de dikte van de gaskolom?.....	15
8	Opvallend veel bevingen op dezelfde plek ?	15
9	Aanwijzingen voor terugkeer bevingen Loppersum gebied ?	16
9.1	Waarom worden de Loppersum clusters (LOPPZ) ingezet ?.....	19
10	Historisch perspectief op de aardbevings-dichtheid in Loppersum	20
10.1	Een versimpeld beeld van de Loppersum bevingen	22
11	Verder werk en voorlopige conclusies.....	24
11.1	Verder werk	24
11.2	Voorlopige conclusies	24
12	Mogelijke ingrepen indien drempelwaarde overschreden wordt.....	25
	Referenties.....	26

1 Introductie

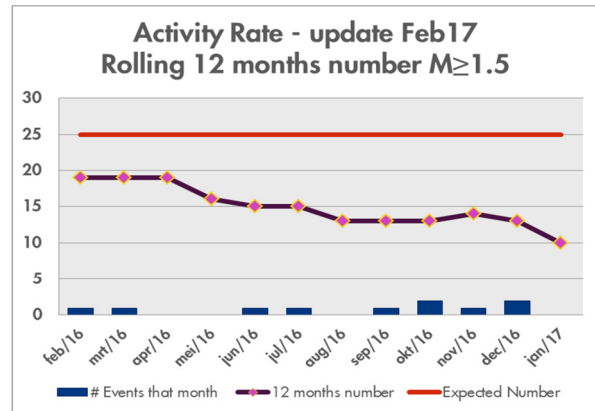
1.1 Aanleiding, context en motivatie voor deze rapportage

De directe aanleiding voor het maken van deze rapportage is dat er in de afgelopen maanden een clustering van bevingen is waargenomen in de gebieden rond Wirdum en Garsthuizen (zie sectie 1.2). SodM heeft NAM hierover vragen gesteld in december afgelopen jaar en januari dit jaar.

De vraag die centraal staat in deze rapportage is: zijn er opvallend veel bevingen in een klein gebied en zo ja, waar wordt dit door veroorzaakt? De specifieke vraag die SodM in zijn brief van 8 februari stelt is of hier een operationele oorzaak aan ten grondslag ligt.

In het Alarmeringssysteem (ref. Instemmingsbesluit, artikel 5 lid 4) wordt een grenswaarde voor clustering gehanteerd van 0,25 / km²/jaar (M>1). Deze waarde is weliswaar niet overschreden maar de waargenomen aardbevingsdichtheid zit daar wel dichtbij (0,22 /km²/jaar, d.d. 1 maart 2017).

De hogere aardbevingsdichtheid vindt plaats in een context waarin we het afgelopen jaar sterk dalende seismiciteit van bevingen met M > 1.5 waargenomen hebben in het Groningen veld als geheel (figuur 1); een lagere hoeveelheid bevingen dan op grond van modellering verwacht werd (rode lijn figuur 1). Deze lagere hoeveelheid aardbevingen heeft geleid tot gematigd optimisme over de regelbaarheid van het systeem en toegenomen vertrouwen in het positieve effect van de door overheid opgelegde productie-maatregelen (reductie jaar-volume, vlakke productie) om seismiciteit te beperken.



Figuur 1. Aantal aardbevingen in het Groningen veld 2016 (12-maanden getal).

Gepaard gaand met gestage afname van bevingen (M>1.5) en de mogelijkheid om kleinere bevingen betrouwbaar te meten (door uitbreiding van het meet-netwerk) is er ook meer aandacht voor de kleinere bevingen (microseismiciteit; niet voelbare bevingen beneden de M=1.5) en zijn er pogingen gedaan om de seismische activiteit in Groningen beter te begrijpen door zowel statistische als geomechanische analyses (e.g. Ref. 1-7). Sommige van deze studies bieden aanknopingspunten om individuele – maar ook clusters van – bevingen verder te analyseren.

Rapportages als deze worden ook mogelijk gemaakt door de verbeterde capaciteit om “hypo-centra” te bepalen; iets waar het KNMI grote stappen in heeft gemaakt.

Deze rapportage is gestructureerd rond tabel 2, sectie 2, waarin we uiteenzetten welke data we bekeken hebben en waarom. De voorlopige conclusies staan samengevat in tabel 4, sectie 11. Dit rapport is anders van karakter dan rapporten waarin een geomechanisch model of volledige statistische analyse gepresenteerd wordt; in deze notitie staan een aantal (lokale) waarnemingen centraal die we geprobeerd hebben in verband te brengen met relevante data.

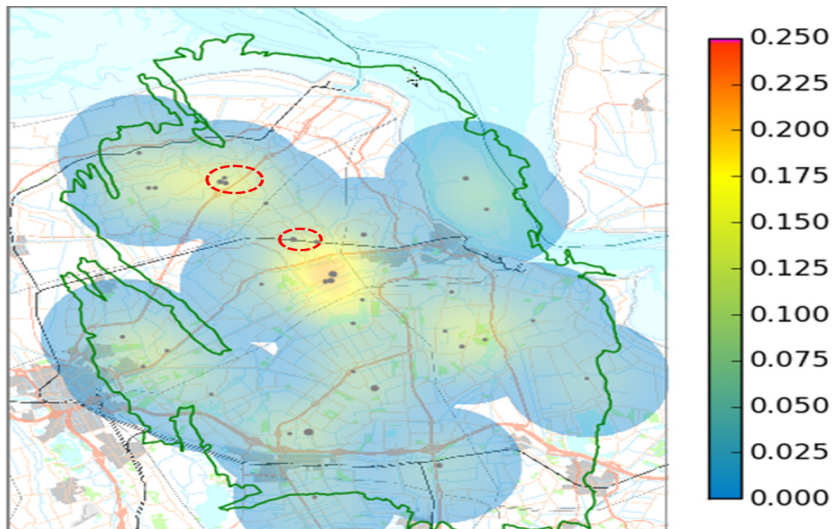
1.2 Overzicht bevingen omgeving Loppersum najaar 2016 en begin 2017

De bevingen die specifiek onderwerp zijn van deze notitie zijn weergegeven in tabel 1. De beving van Zeerijp (11-03-2017) is niet specifiek meegenomen in dit rapport maar zou de analyse praktisch niet beïnvloed hebben; de beving past binnen het patroon van bevingen dat we met de analyses in dit rapport bestudeerd hebben.

Locatie	Magnitude	Gemeente	Datum
Wirdum	1.4	Loppersum	26/02/2017 20:39
Zandeweer	1.2	Eemsmond	26/02/2017 05:25
Loppersum	1.3	Loppersum	25/02/2017 04:32
Zijldijk	1.4	Loppersum	19/02/2017 12:21
Startenhuizen	1.6	Eemsmond	15/02/2017 11:01
Startenhuizen	1.3	Eemsmond	12/02/2017 13:43
Kantens	1.3	Eemsmond	05/02/2017 14:49
Eems-Dollard (nabij Holwierde)	1.6	Delfzijl	15/12/2016 09:45
Loppersum	1.8	Loppersum	07/12/2016 00:52
Appingedam	1.6	Appingedam	20/11/2016 17:57
Wirdum	1.2	Loppersum	20/11/2016 16:58
Eenum	1.4	Loppersum	08/11/2016 10:23
Wirdum	2.2	Loppersum	31/10/2016 23:57
Wirdum	1.9	Loppersum	31/10/2016 23:12

Tabel 1. Bevingen in Loppersum gebied tussen oktober 2016 en maart 2017.

De bevingen zijn geclusterd rond Wirdum en Garsthuizen (zie figuur 2). Bijna alle bevingen hebben een magnitude van beneden de 2, met uitzondering van één van de oktober-bevingen in Wirdum (2.2).



Figuur 2. Aardbevingdichtheid in bevingen/km²/jaar.

2 Welke data zijn bekeken en waarom

Data element	Reden van beschouwing
Aardbevingsdichtheid kaart (12 maanden)	Bekijken of er een verschuiving in aardbevingsposities heeft plaatsgevonden, test op overschrijden grenswaarde (0.25 bevingen per km ² /jaar)
Aardbevingsdichtheid-kaart - historie	Testen of er een geheel nieuw gebied seismisch actief is geworden.
Hypo-centre lokatie	Bepalen of de bevingen geassocieerd zijn met een specifieke breuk of breuk-intersectie. Dit zou analyse kunnen focuseren en eventuele beheersmaatregelen kunnen suggereren.
Fault Off-set kaart	Bepalen of bevingen correleren met bepaalde breuken. Geomechanische studies geven aan dat breuken met een offset van ongeveer de reservoir dikte aanleiding zouden kunnen geven tot hogere seismiciteit.
Recente productie individuele clusters	Ramp-up van productie-cluster zou in theorie een stress-verandering teweeg kunnen brengen die op zijn beurt een beving zou kunnen veroorzaken. Hier zijn ook statistische aanwijzingen voor.
Druk-kaarten van het Loppersum gebied	De fysica van vloeistofstroming in een poreus medium wordt beschreven door een diffusief proces wat er voor zorgt dat een piek in productie van een bepaald cluster zich vertaalt in een in de ruimte (en tijd) sterk verspreide druk-verstoring; m.a.w. een scherpe stap omhoog in productie van een cluster zorgt al op korte afstand van dat cluster in een heel gelijkmatig verdeelde drukverstoring in het reservoir.
Stroomlijnen patroon	Poging om vast te stellen welk productie-cluster de meeste invloed heeft op het drukverloop van een bepaalde locatie
Reservoir-drukvermindering per tijds-eenheid.	Bepalen of de vermindering in de druk in het Loppersum gebied gevarieerd heeft in de tijd en of dat correleert met de ontwikkelende seismiciteit
HC kolom thickness map	Voor een gelijke reservoir-druk daling is dit het gebied waar je de meeste compactie verwacht en waar je misschien ook meer seismiciteit zou kunnen verwachten; met andere woorden, een gelijke druk-daling heeft in een gebied met een grotere gas-kolom waarschijnlijk meer effect op de compactie dan in gebieden met een kleinere kolom.
Dalings-grafiekje in het Wirdum gebied	Bekijken of er een anomaal dalings-patroon vastgesteld kan worden in het gebied dat meer bevingen heeft laten zien.

Tabel 2. Overzicht van de uitgevoerde analyses en waarom die uitgevoerd zijn.

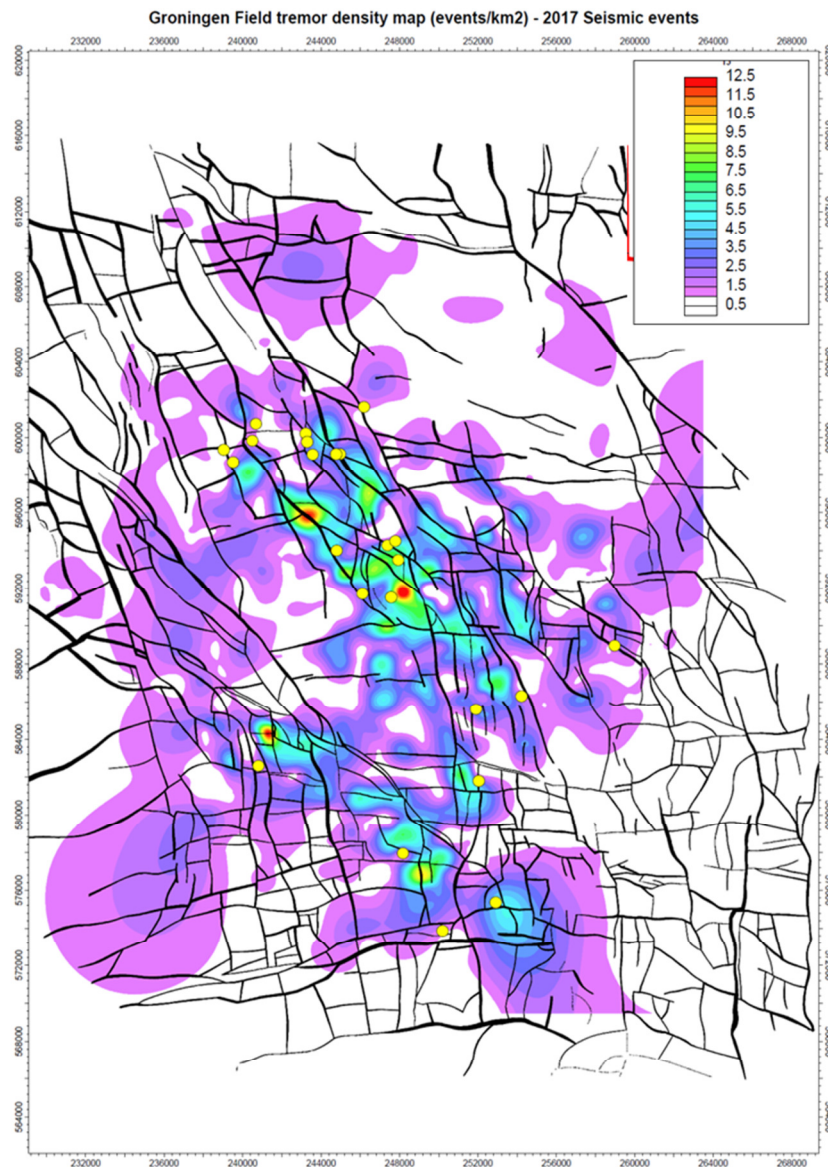
De bovenstaande tabel geeft aan welke data we bekeken hebben en waarom. De rechtvaardiging van deze analyses komt uit recent studiewerk (Ref. 1-5).

We hebben geen pogingengedaan om naschokken (“after-shocks”) eruit te filteren. Dit zou ertoe kunnen leiden dat we een clustering van events beschouwen als aparte events terwijl dit in seismische termen in de literatuur normaliter als één event gezien wordt. Dit zou ook vooral van belang worden wanneer de seismische events met één enkele breuk geassocieerd zouden zijn (zie ook sectie 4).

3 Verband tussen recente bevingen en bevingen uit het verleden ?

De eerste check die we gemaakt hebben is of er geen nieuw gebied actief geworden is. Figuur 3 laat de recente bevingen (vanaf oktober 2016) zien geplot op kaart met daarin de historische bevingen. De gele stippen geven de recente bevingen weer (tabel 1).

De recente bevingen hebben plaatsgevonden in een gebied waaruit de laatste jaren (vanaf 2014) aanzienlijk minder is geproduceerd maar wij concluderen uit deze plot dat dit een gebied is dat al eerder seismisch actief is geweest –op een periode van 6 maanden na, feitelijk vrijwel continu (zie ook tabel 3).

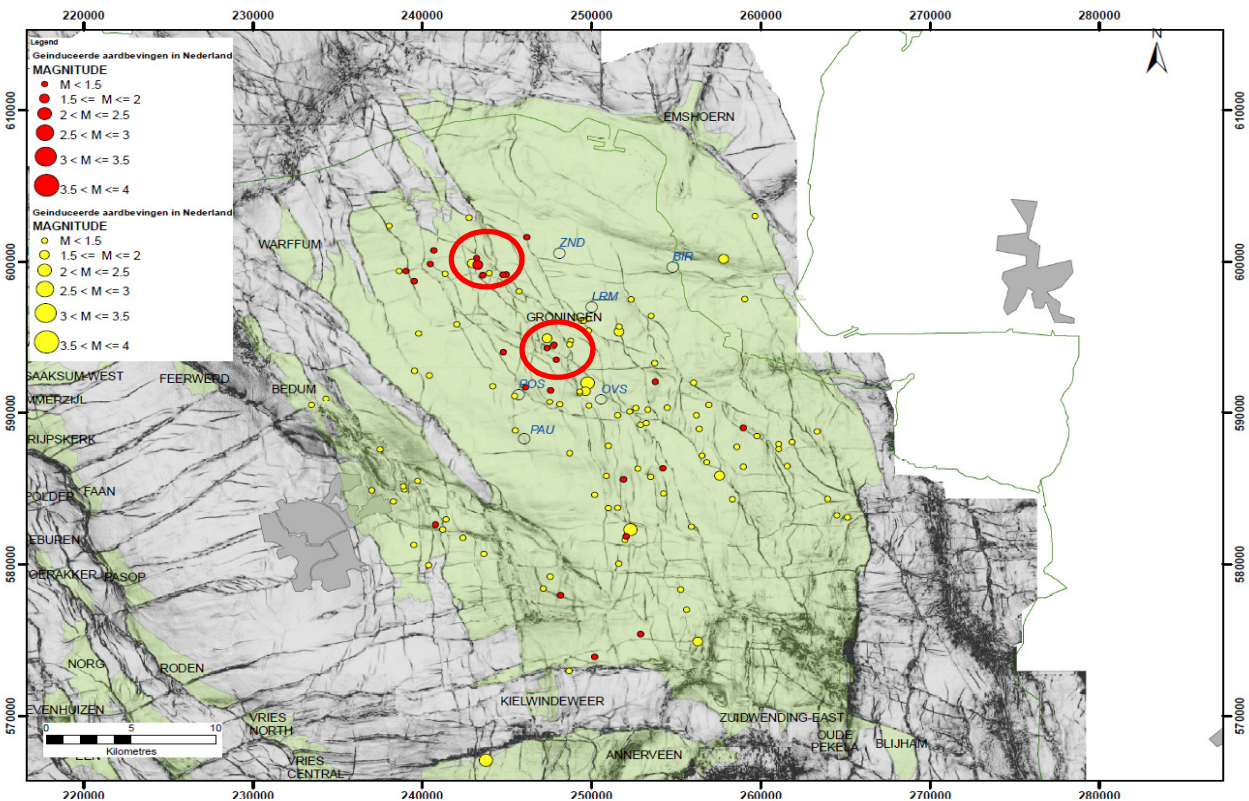


Figuur 3. Aardbevings contouren (dichtheid) kaart. Aardbevingen sinds 1991. De cirkels geven de gebieden met verhoogde seismiciteit (Wirdum en Garsthuizen). Plot gemaakt met Petrel Software.

Ook bij Harkstede bevindt zich historisch een klein seismisch actief gebied; hier zijn geofoons in een diepe observatieput geplaatst. Gedurende de maanden dat deze actief waren is er bijna geen seismische activiteit geobserveerd. Een rapportage hiervan wordt in april op het web (nam.nl) geplaatst.

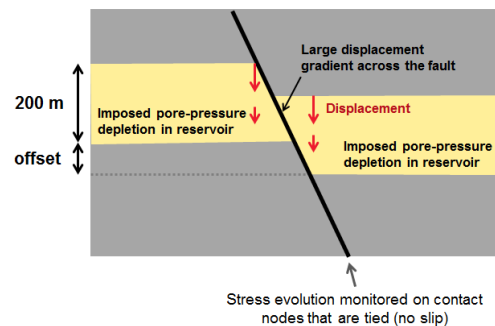
4 Verband tussen recente bevingen en de breuken-kaart?

De tweede vraag die wij ons gesteld hebben is of er soms specifieke breuken aan te wijzen zijn waarlangs veel aardbevingen lijken op te treden. Figuur 4 toont een breuken-kaart (bron: Groningen reservoir model; zie bijvoorbeeld Winningsplan 2016, ref 10) waarop de recente events geplotted zijn met rode stippen – de gele stippen zijn bevingen van daarvoor (vanaf 2014). Het beeld dat daar uit lijkt te komen is dat er geen specifieke breuken aan te wijzen zijn waarlangs al deze bevingen plaatsvinden. Sommige bevingen hebben zelfs een hypocentrum dat niet samenvalt met een (gekarteerde) breuk.



Figuur 4. Hypocenters van recente aardbevingen weergegeven op de breuk-kaart Groningen.

De volgende vraag is of de bevingen optreden langs breuken met een speciaal karakter. Er is in het recente verleden werk gedaan waaruit bleek dat breuken met een verzet ('offset') in de buurt van (maar minder dan) de reservoir

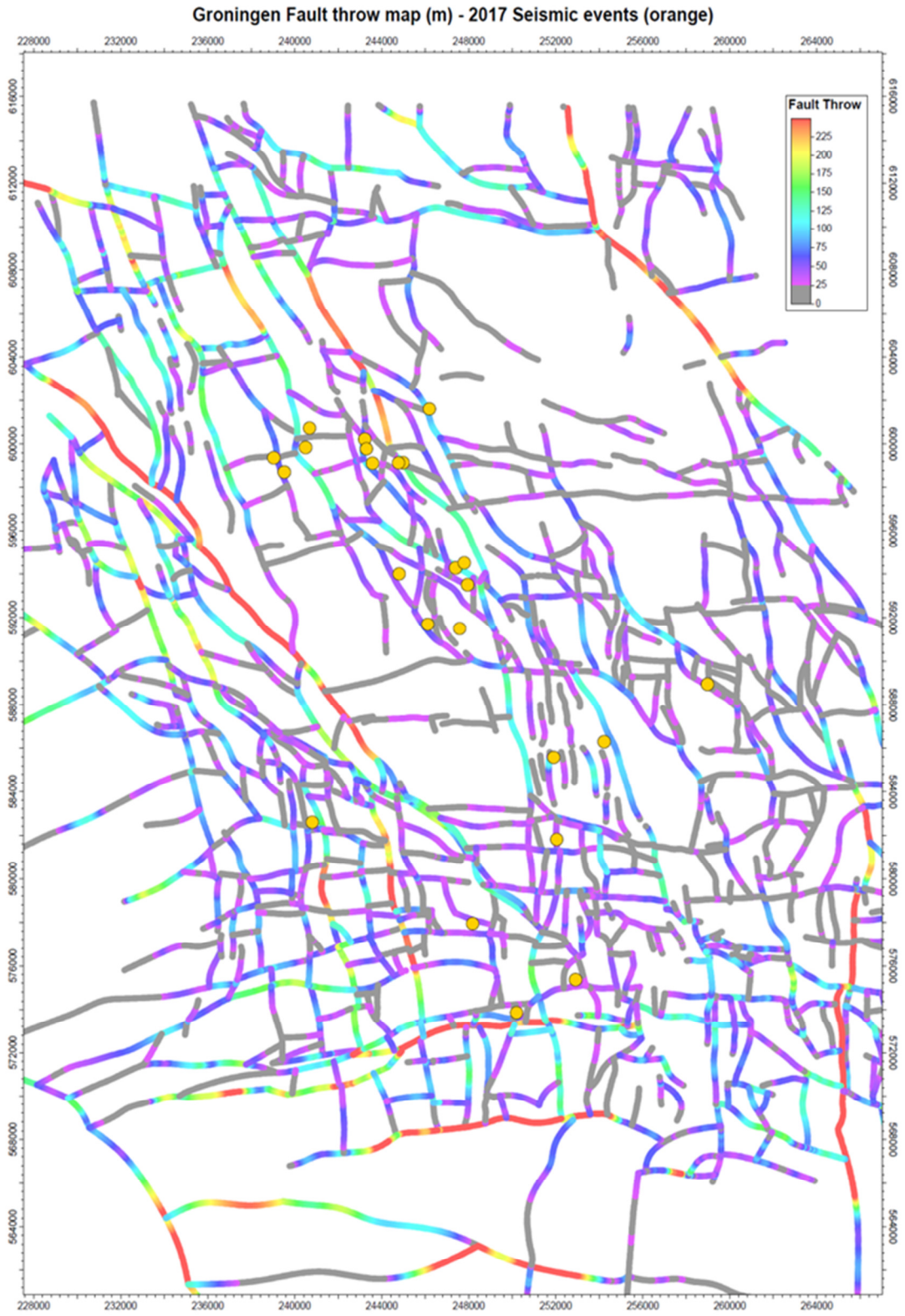


dikte vaker aanleiding geven tot bevingen dan breuken die minder of meer verzet hebben (zie schets hiernaast).

Figuur 5 toont de breuken die zo'n kritisch verzet hebben in rood, en daarop zijn opnieuw de recente bevingen geplot. Ook dit levert geen additioneel inzicht op want geen van de recente bevingen plot preferentieel langs deze "kritische" breuken; sterker nog een analyse van historische bevingen liet ook zien dat zo'n verband er niet lijkt te zijn.

De laatste vraag die we ons in dit verband gesteld hebben is of de bevingen soms correleren met plaatsen waar breuken elkaar snijden of waar breuken "ophouden". Maar ook hiervoor hebben we vooralsnog weinig verdere aanknopingspunten gevonden in de recente data set.

Geen van de drie gedachten wat betreft associatie met breuken heeft op dit moment een eenduidig inzicht opgeleverd. Dit moet wel in de context gezien worden van de beperkingen die er zijn aan het bepalen van de exacte locaties van breuken en hypo-centra en de relatief kleine data set die beschouwd is. Wij gaan deze analyses met enige regelmaat herhalen om te zien of er toch patronen zichtbaar worden wanneer er meer gegevens beschikbaar komen.

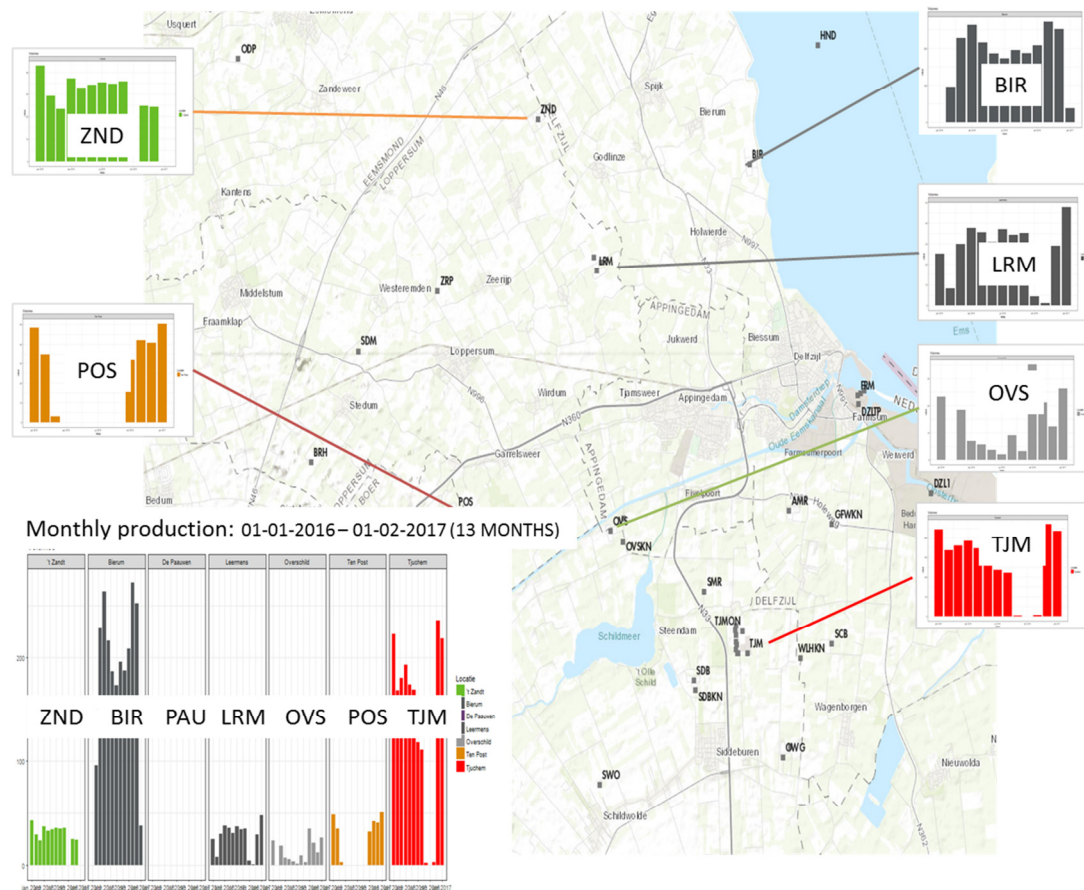


Figur 5. Breukenkaart met verzet aangegeven in kleur. De stippen geven de recente aardbevingen weer.

5 Verband tussen bevingen en productie-inzet van naburige clusters?

Een andere hypothese die veel aandacht heeft gekregen is of seismiciteit te herleiden is tot (fluctuerende) productie-inzet van het hele veld of zelfs van specifieke clusters van productieputten. Voor deze gedachte zijn er in de afgelopen jaren ook statistische aanwijzingen verzameld (Ref 1-4), maar tot op heden ontbreekt een betrouwbare relatie tussen de grootte van de drukverstoring en de seismiciteit en ontbreekt een kwantitatieve, fysische uitgewerkte, tijds-relatie tussen productieveranderingen en het moment van optreden van de beving (zie ook sectie 6). Op veld schaal zijn er aanwijzingen (Ref 1-3) dat (kleine) bevingen vaker optreden in bepaalde periodes van het jaar, wat misschien verband houdt met het verschil in zomer en winter productie dat in het verleden bestond in het Groningen-veld.

We hebben voor de Wirdum en Garsthuizen bevingen gekeken naar een mogelijk effect van productie inzet van de naburige clusters (figuur 6).



Figuur 6. Overzicht van de productie-clusters in de buurt van de concentraties van recent bevingen. Loppersum clusters hebben een hele lage inzet (zie ook sectie 9) ten opzichte van de andere clusters in het veld.

De clusters POS (Ten Post), LRM (Leermens) en OVS (Overschild) zijn in de loop van het najaar bijgezet om te voldoen aan de specifieke gasvraag (eigenlijk voorbereidend op een piekvraag, druk-belevering, in

de context van “GTS-security of supply” voor de winter) op die plek in de Groningen-ring. Kijkend naar die clusters en de manier waarop ze meer zijn gaan produceren in het najaar is het interessant om te onderzoeken of deze “ramp-up” iets te maken heeft met de verhoogde beving-intensiteit van Wirdum en Garsthuizen.

Maar wat ook opvalt is dat de productie van de POS en LRM clusters relatief klein is ten opzichte van andere naburige clusters die in 2016 vrijwel continu (maar niet constant) aangestaan hebben (e.g. Bierum, Amsweer). En in recent geomechanisch werk (ref 7) waarin geprobeerd is om een relatie te leggen tussen productiefluctuaties en seismiciteit leken productievariaties van deze orde onvoldoende te zijn om seismiciteit te verklaren; productie geeft niet direct druk verschillen op breuken maar slechts indirect, via het gas-reservoir, via een diffusief proces waardoor een piek in drukverstoring als gevolg van de productie uitsmeert in de tijd en in de ruimte (zie sectie 6).

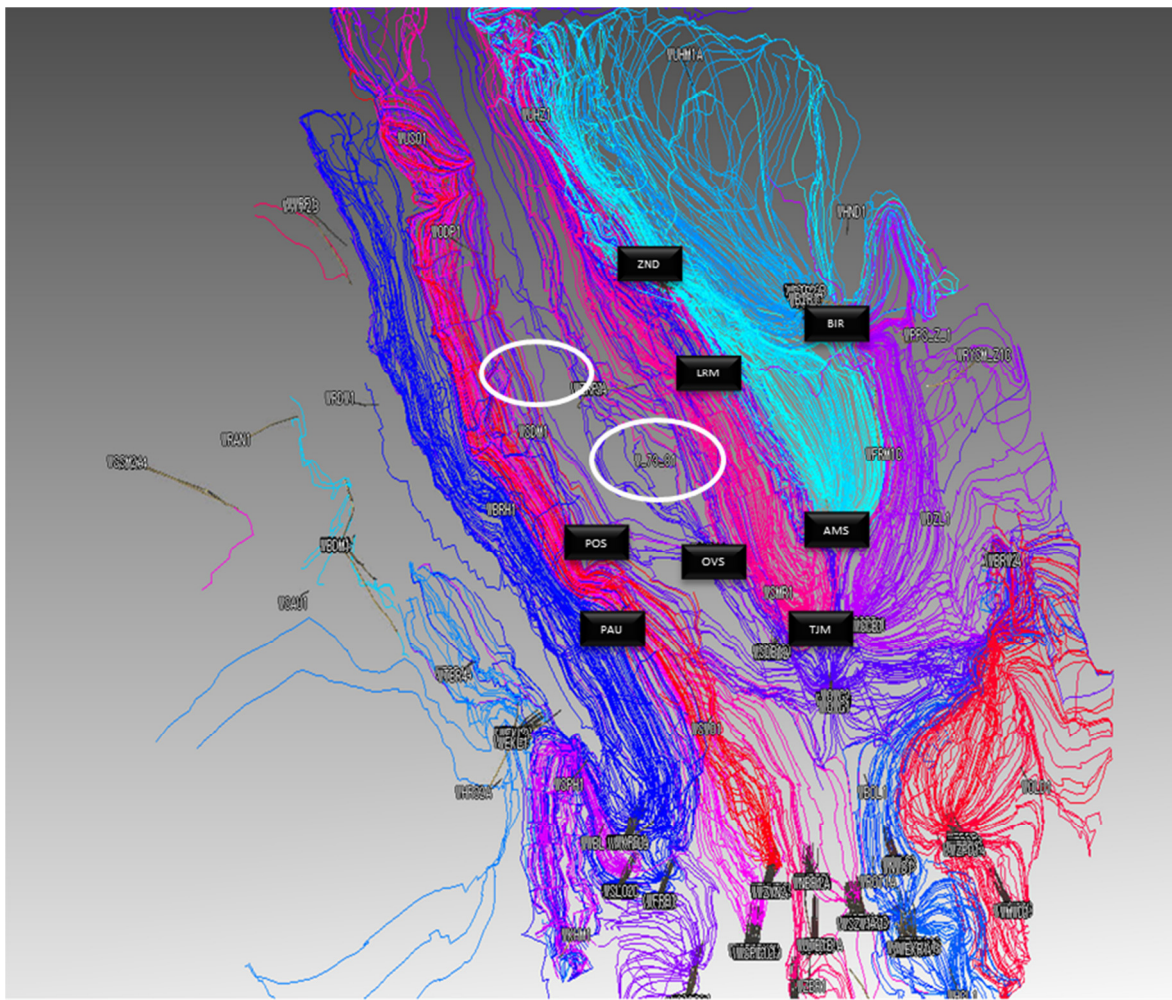
In sectie 6 wordt het druk-veld bekeken rondom de bevingen en de productie-clusters. Daarin komt ook de vraag aan de orde hoe groot die druk-verstorings dan zijn geweest.

Voorlopig levert het hier lokaal geen consistent beeld op: er lijkt ook seismiciteit te zijn zonder dat een productie-cluster in de buurt opengezet wordt (bevingen richting Warffum) en soms ontbreekt er significante seismiciteit bij clusters die ook een “ramp-up” hebben gehad (Amsweer). Dus hoewel de relatie tussen productie en seismiciteit op grotere tijd en ruimte schaal misschien wel wat aanknopingspunten biedt, lijkt op basis van productie-data alleen hier lokaal voorlopig nog geen coherent beeld te ontstaan. Dat wil natuurlijk niet zeggen dat die relatie er lokaal niet is; de relatie zou kunnen lopen via zogenaamde “critically stressed faults” (ref. 5) of via een ketting van variabelen leidend tot differentiële compactie (ref 6). In sectie 6 wordt geprobeerd om meer aanknopingspunten te vinden door het bestuderen van de drukverdeling over dit deel veld van het veld.

6 Verband tussen bevingen en drukverdeling ?

Deze paragraaf maakt gebruik van het reservoir simulatiemodel van Groningen. Dit model staat beschreven in bijvoorbeeld het Groningen 2016 Winningsplan (ref 10).

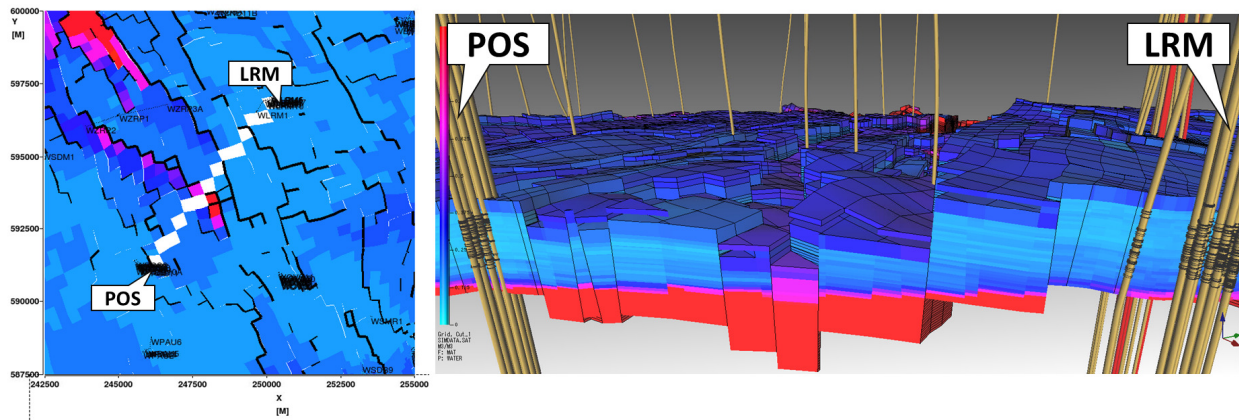
Figuur 7 laat een stroomlijnen plot zien zoals uitgerekend door het simulatiemodel. De stroomlijnen volgen de stijfste druk gradient¹, en laten het pad zien waar langs een gasmolecuul zich op dat moment door het reservoir beweegt. Zo geeft het simulatiemodel een beeld van de dominante stroomrichting van het gas in het reservoir voor een bepaald en representatief productie-scenario op één tijdstip (snapshot). Deze stroomrichting wordt beïnvloed door aanwezigheid van breuken en de relatieve snelheid waarmee gas onttrokken wordt door productie-clusters. Uit het figuur blijkt dat het aardbevingsgebied rond Wirdum beïnvloed wordt door niet alleen de nabijgelegen POS en LRM-clusters maar ook door OVS en aan de oostzijde van de cirkel ook door TJM.



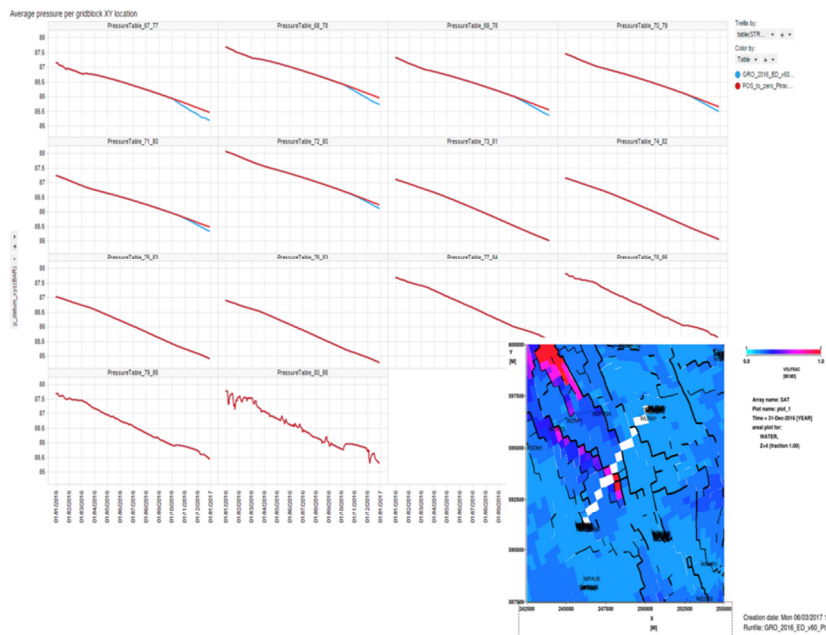
Figuur 7: Stroomlijnenplot gekleurd naar productie cluster van aankomst. Cirkels geven gebieden weer met verhoogde seismiciteit.

¹ Stroomlijnen worden uitgerekend op basis van het “snelheidsveld”, waarbij snelheid wordt uitgerekend als de totale Darcy snelheid gedeeld door de porositeit.

Het Wirdum gebied ligt tussen productie clusters Ten Post (POS) en Leermens (LRM). Met behulp van de reservoir simulator is gekeken naar de druk-ontwikkeling in het reservoir (in een rij van gridblokken) tussen POS en LRM. Figuur 8 geeft een aantal grafieken met de drukontwikkeling in de gaskolom van de tussengelegen gridblokken als functie van de tijd. De blauwe lijn geeft de uitgerekende drukken op basis van de daadwerkelijk geproduceerde volumes. In rood is een alternatief productie scenario doorgerekend waarbij het POS-cluster niet meer produceert na Februari 2016. De verschillen zijn klein (in de orde van een 0.5 bar) en dan moet ook nog bedacht worden dat we geen poging hebben gedaan om die productie uit een ander cluster te halen en daarmee een reëler beeld zouden hebben gegeven van wat het effect is van wel en niet POS productie.



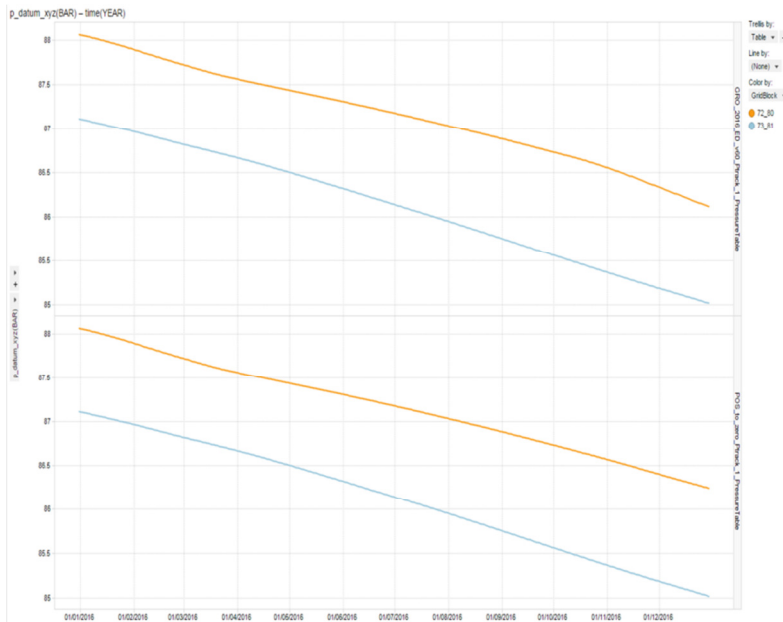
Figuur 8: Details van het reservoir simulatie grid rond Wirdum



Figuur 9. Druk-daling voor de grid-blokken weergegeven in het figuur rechts-onder.

Figuren 9 en 10 laat in meer detail zien wat het gemodelleerde drukverschil is over de meest zuidelijke breuk in dit gebied (zie figuur 8). In de eerste plaats laat het opnieuw zien dat het effect van productie van POS klein lijkt te zijn. Maar wat het ook laat zien is dat er ongeveer een 1 bar drukverschil lijkt te zijn tussen het reservoir aan weerszijden van de breuk. Naast de observatie dat de drukverschillen beperkt zijn zien we in de huidige literatuur dat drukverschillen over de breuk niet de drijvende kracht zijn achter de aardbevingen maar dat deze worden veroorzaakt door spanningsveranderingen langs breuken door globale drukdaling (Ref 9). Behalve drukdaling zijn ook het verzet (offset) van breuken en de sterkte-eigenschappen bepalend of er aardbevingen optreden. Een goede correlatie met slechts een parameter (bv. offset) voor het hele veld lijkt daarom ook onwaarschijnlijk.

Voorlopig stellen we vast dat er 1 bar drukverschil opgebouwd kan zijn rondom de bovengenoemde breuk maar dat dit niet aan productie van POS (alleen) gerelateerd is.

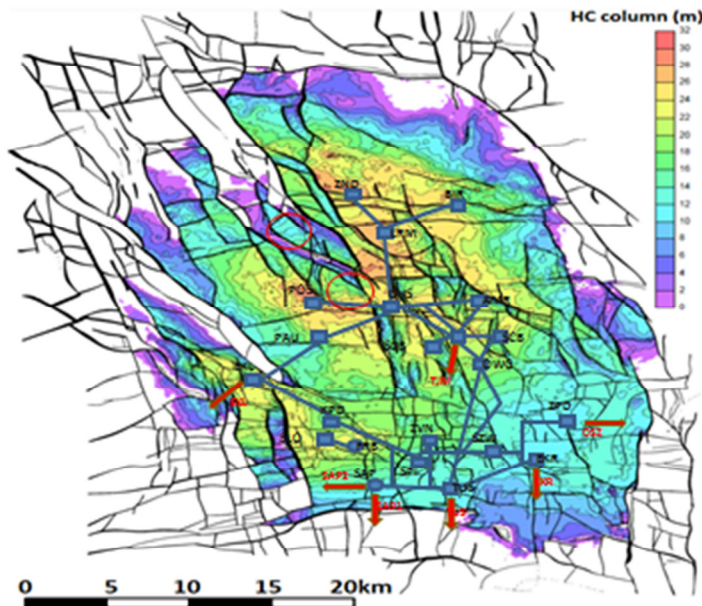


Figuur 10. Gridblok drukken aan weerszijden van de breuk. Met en zonder POS productie.

7 Verband tussen bevingen en de dikte van de gaskolom?

De laatste poging om de recente bevingen ergens verder mee te correleren betreft de correlatie met de gaskolom dikte kaarten (figuur 11). De gedachte hierachter is dat dit plekken in het reservoir zijn waar de compactie onder invloed van druk-daling het grootst is en op die manier aanleiding zou geven tot verhoogde seismiciteit.

Association of clustering of earth-ques with thicker HC columns ?



Figuur 11. Hydrocarbon kolom dikte kaart voor het Groningen (kaart gemaakt met Petrel Software).

Dit levert ook geen 100% eenduidige correlatie op; hoewel Wirdum geassocieerd is met een relatief dikke HC kolom, is Garsthuizen dat in slechts mindere mate.

De recente bevingen correleren overigens enigszins ook met de top van de structuur, met andere woorden met de hogere delen van het veld. Maar er is hiermee niet eerder een geomechanische relatie gelegd en het is ook op voorhand niet duidelijk hoe die te leggen zou zijn.

8 Opvallend veel bevingen op dezelfde plek ?

In beginsel is het antwoord hierop natuurlijk “ja” want we hebben de hoogste waarde EQ-dichtheid ($0.22 / \text{km}^2 / \text{jaar}$) bereikt sinds de alarmwaarde is vastgesteld en wordt gemonitord. Dat hoeft op zich nog niet verontrustend te zijn maar het verdient wel verdere aandacht (zie ook sectie 10).

Zoals aangegeven in sectie 3 betreffen de bevingen in Garsthuizen en Wirdum geen nieuwe gebieden wat betreft seismiciteit. Er is ook geen reden om aan te nemen dat we iets bijzonders qua productie-inzet gedaan hebben (i.e. niet anders t.o.v. het verleden), zodanig dat je op grond daarvan zou kunnen verwachten dat de situatie zou kunnen verergeren.

Niet 100% uit te sluiten is dat de seismiciteit wat sterker terug zou kunnen komen in het Loppersum gebied. Dat is zelfs een verwachting die voortvloeit uit het door ons gebruikte “compactie-gedreven” strain – event rate model (ref 6). En hoewel de huidige data suggereren dat dit model pessimistisch is over het aantal te verwachten bevingen (het verwacht er meer dan we werkelijk zien), moeten we daar toch theoretisch rekening mee houden. Maar de recente data op zich lijken geen aanleiding te geven tot speciale ongerustheid.

9 Aanwijzingen voor terugkeer bevingen Loppersum gebied ?

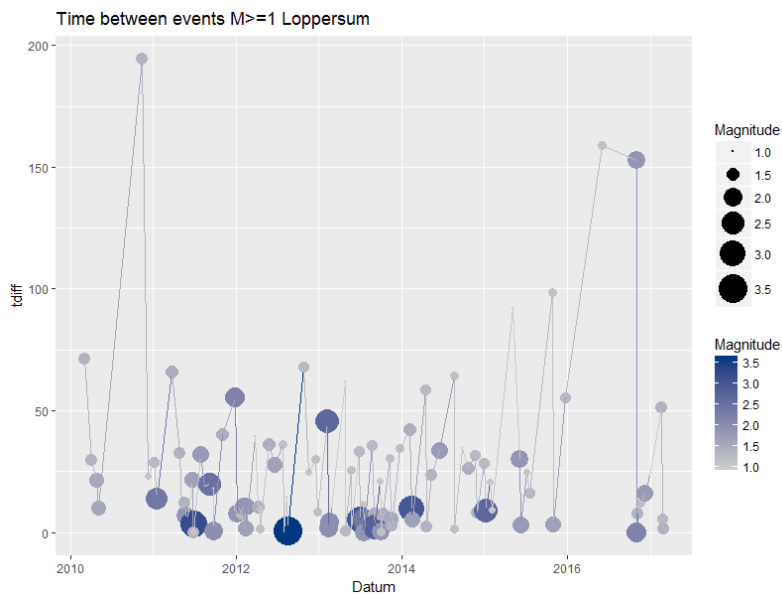
Een andere vraag is of deze recente bevingen een voorbode zijn van het terugkeren van (sterkere) seismiciteit in het Loppersum gebied, zoals ook aangestipt in sectie 9. In tabel 3 wordt een overzicht gegeven van seismiciteit van het Loppersum gebied in 2015 en 2016. Na de productie-ingreep bij Loppersum is gedurende 2015 de seismiciteit voor een periode verminderd geweest. En in de periode van december 2015 tot juni 2016 zijn er zelfs helemaal geen events geweest ($M > 1.0$). Met name later in 2016 is de seismiciteit weer wat frequenter maar zo kwalitatief lijkt er voorhand geen heel andere frequentie van bevingen te zijn dan in 2015. Het is goed om het een en ander verder te bekijken op een meer kwantitatieve en statistische manier gedurende de komende weken (zie sectie 11.1).

Locatie	Magnitude	Gemeente	Datum
Zeerijp	2.1	Loppersum	11/03/2017 11:52
Wirdum	1.4	Loppersum	26/02/2017 20:39
Loppersum	1.3	Loppersum	25/02/2017 04:32
Zijldijk	1.4	Loppersum	19/02/2017 12:21
Wirdum	1.0	Loppersum	30/12/2016 02:05
Loppersum	1.8	Loppersum	07/12/2016 00:52
Wirdum	1.2	Loppersum	20/11/2016 16:58
Eenum	1.4	Loppersum	08/11/2016 10:23
Wirdum	2.2	Loppersum	31/10/2016 23:57
Wirdum	1.9	Loppersum	31/10/2016 23:12
Zeerijp	1.2	Loppersum	01/06/2016 08:02
Loppersum	1.3	Loppersum	25/12/2015 03:19
Garrelsweer	1.7	Loppersum	30/10/2015 15:07
Garrelsweer	1.2	Loppersum	27/10/2015 14:46
Oosterwiltwerd	1.3	Loppersum	21/07/2015 02:18
Westeremden	1.1	Loppersum	04/07/2015 18:07

Zeerijp	1.8	Loppersum	10/06/2015 02:26
Zeerijp	1.9	Loppersum	06/06/2015 23:39
Zeerijp	1.0	Loppersum	07/05/2015 19:11
Oosterwijtwerd	1.1	Loppersum	04/02/2015 21:34
Wirdum	1.1	Loppersum	26/01/2015 17:07
Wirdum	2.7	Loppersum	06/01/2015 05:55

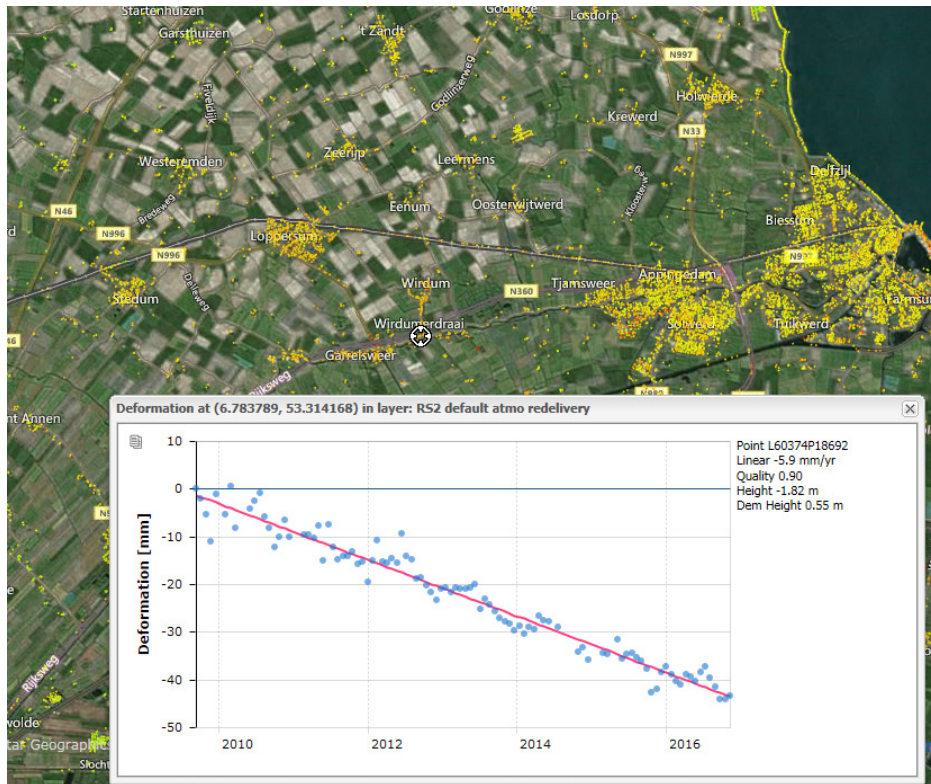
Tabel 3. Overzicht van bevingen ($M > 1.0$) vanaf 2015 voor het Loppersum gebied.

Figuur 12 laat de bevingen in het gebied over een wat langer tijdspad zien en daarin weergegeven de tijd tussen “events”.



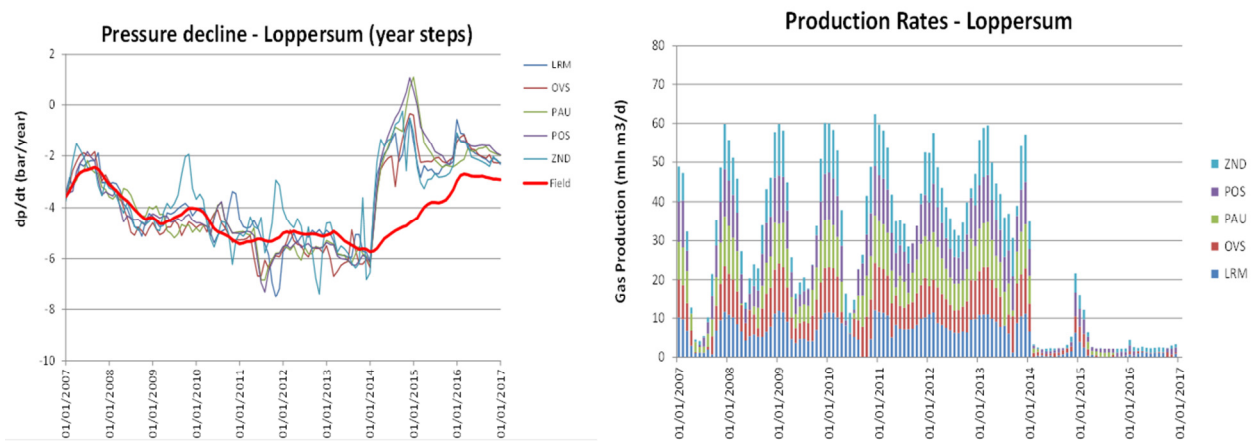
Figuur 12. Tijd tussen events voor het Loppersum gebied.

In figuur 13 staan de satelliet-data gerelateerd aan daling in het gebied. En hoewel er enige spreiding is binnen dit figuur wanneer er andere plekken in het gebied gekozen worden, lijkt het alsof het gebied een vrij constante daling kent en lijkt er geen sprake van een bijzonder patroon.



Figuur 13. Dalings-patroon op basis van satelliet data.

Het lijkt voor de hand te liggen om een eventuele terugkeer van seismiciteit te koppelen aan meer variabelen dan lokale productie (die historisch laag is). Zoals ook eerder bediscussieerd is terugkeer van seismiciteit een fenomeen dat consistent is met een door compactie gedreven model (ref. 6) waarbij productie uit clusters ver verwijderd van Loppersum uiteindelijk via drukcommunicatie tot compactie in het Loppersum gebied leidt en waarschijnlijk ook tot bevingen. Figuur 14 toont de drukdaling in het Loppersum gebied en de productie van de Loppersum clusters.



Figuur 14. Druk-daling over tijd en productie snelheden van de Loppersum clusters.

Het figuur laat zien dat de drukafname per tijdseenheid in het Loppersum gebied toeneemt naar de gemiddelde veld-drukafname; deze drukafname was een tijd lang wat lager dan de gemiddelde veld-druk-afname na de Loppersum productie-ingreep. Deze druk-daling gecombineerd met de hogere “Hydro-Carbon”-kolom dikte in het Loppersum gebied (figuur 11), maakt dat wij concluderen dat de geobserveerde seismiciteit in overeenstemming is met twee belangrijke drivers voor seismiciteit (druk-daling en dikte van de “Hydro-Carbon” kolom).

9.1 Waarom worden de Loppersum clusters (LOPPZ) ingezet ?

Eén van de hypothesen voor het verklaren van het verhoogde aantal aardbevingen in het Loppersum gebied is dat dat veroorzaakt wordt door recente productie uit de Loppersum clusters. En hoewel figuur 14 laat zien dat de recente productie uit Loppersum een fractie is van wat het voor 2014 was, kan men zich afvragen waarom de clusters niet helemaal uit bedrijf genomen worden.

De reden dat de clusters nog ingezet worden is feitelijk niet voor (extra) productie-doeleinden maar om plotselinge uitval op te vangen van eigen installaties of van GTS transportinstallaties of productie-installaties die het GTS-pijpleidingen netwerk voeden². Om snel extra productiecapaciteit van het Groningenveld in te kunnen zetten, moeten de procesinstallaties standby staan. Dat betekent dat de installaties warm en ingeregeld moeten zijn. Daar is een zekere minimum productiehoeveelheid voor

² Door de grote stroomstoring van 27 maart 2015 in Noord-Holland raakte het aanlandingsstation van de offshore pijpleidingen in Den Helder buiten bedrijf, waardoor de totale offshore productie acuut uitviel en de lo-cal gasmarkt uit balans dreigde te raken. Op zo’n moment is het alleen mogelijk zo’n massale productieonderbreking snel te compenseren met productie uit het Groningenveld, omdat het Groningen systeem snel kan worden opgesteld. In het algemeen is zo’n “noodinzet” van Groningen, die op afroep van GTS plaatsvindt, maar voor een zeer beperkte periode; zolang als de storing duurt. Daarna wordt de productie van het Groningenveld weer teruggebracht. In zo’n korte periode wordt er maar weinig volume geproduceerd.

nodig, beneden die minimum hoeveelheid werken de gasbehandelingsinstallaties en compressoren niet³.

Dat vertaalt zich in de volgende operationele inpassing:

- Onder niet-winterse omstandigheden worden er 2 clusters bijgezet op hun minimum flowrate (op 1 mln m³ per dag).
- Daarnaast worden deze clusters éénmaal per maand, gedurende 8 uur, getest (op 6 mln m³/d) om beschikbaarheid en integriteit te testen.
- Onder winterse omstandigheden is de minimum flowrate verhoogd om bevroeringsverschijnselen te voorkomen volgens het volgende schema:

Gemiddelde dag temperatuur	Inzet Loppersum clusters (mln m ³ /d)
Tussen -10 graden C en 0 graden C	3
Tussen -20 graden C en -10 graden C	4
Onder de -20 graden C	5

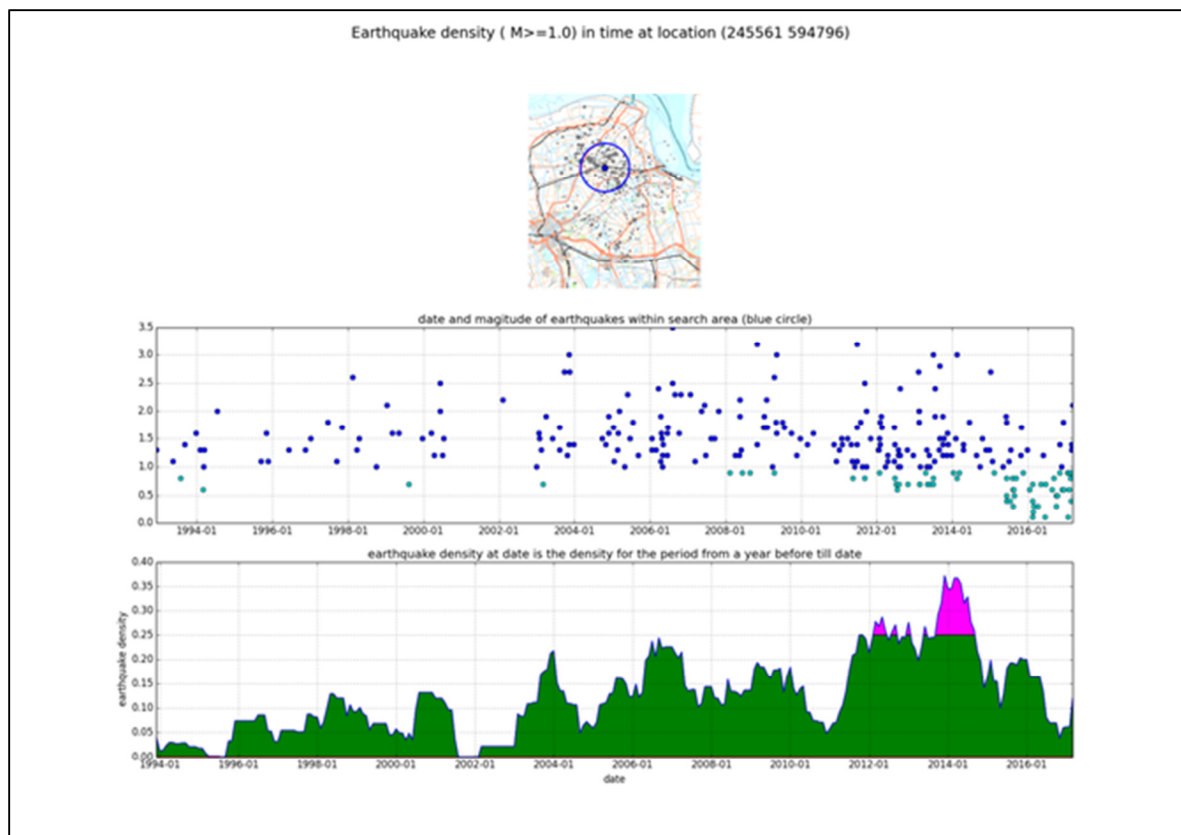
Voor een typisch jaar leidt dit tot een productie-inzet van 1 miljard kubieke meter.

Bij de vraag of de recente bevingen iets te maken hebben met de recente productie-inzet is het ook belangrijk om verder op te merken dat bij een hoger productie-volume vorig jaar er een periode van 6 maanden volgde zonder aardbevingen in het gebied. De relatie tussen productie-inzet in Loppersum en aardbevingen nu is niet eenduidig te leggen maar houdt waarschijnlijk ook verband met de eerder bediscussieerde drukdaling in het gebied veroorzaakt door druk-daling in het hele veld.

10 Historisch perspectief op de aardbevings-dichtheid in Loppersum

Een mogelijke vraag die ook opkomt is of dit de eerste keer is dat de aardbevings-dichtheid zo dicht komt bij de grenswaarde van 0.25 / km² / jaar. Figuur 15 laat zien hoe het 12-maandelijks aardbevings-dichtheids getal voor het Loppersumgebied zich ontwikkeld heeft over de tijd (dit getal is ook berekend voor de periode waarin we dit getal nog niet rapporteerden).

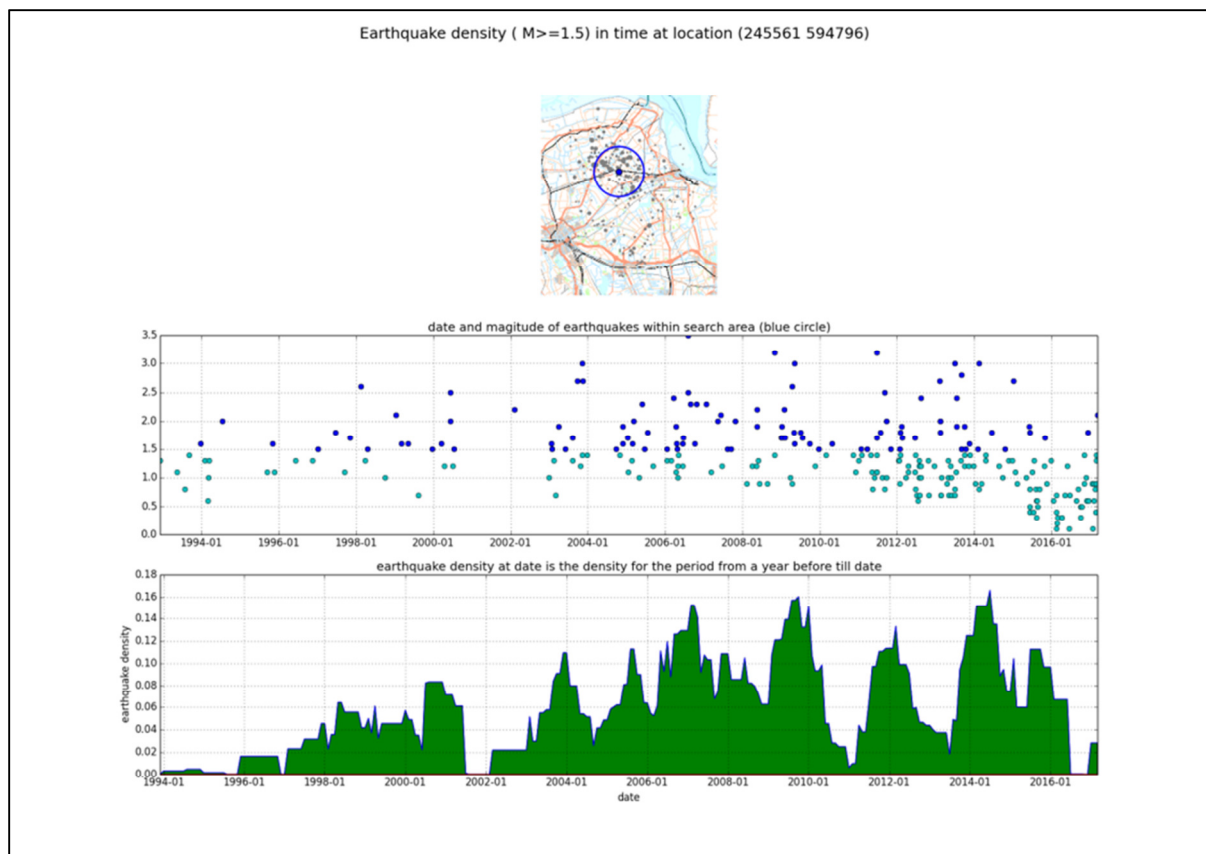
³ Zo'n "hot standby"-status is wel eens een beetje misleidend vergeleken met de waakvlamfunctie bij een geiser, maar de standby status van een productie installatie heeft niets met een waakvlam te maken (die zijn er alleen al vanuit veiligheidsperspectief niet op een gasinstallatie). Er is ook geen relatie met een fakkel, die zijn in het Groningenveld bij tijdens modernisatie van de installaties in het Groningen Long Term project tussen 1998 en 2010 uitgefaseerd als verbeteringsmaatregel voor het milieu.



Figuur 15. Ontwikkeling van aardbevings-dichtheid voor het Loppersum gebied over de tijd; voor aardbevingen met magnitude $M > 1$. Het onderste panel laat de aardbevingsdichtheid zien voor de periode van 1994 tot 2017. De cirkel in het kaartje geeft de gebiedsgrens weer waarvoor deze analyse is uitgevoerd. NB: De mogelijkheid om kleinere aardbevingen te meten (tussen $M=1$ en $M=1.5$) is pas ontstaan na 2013 en daarmee is de periode van voor 2013 niet direct vergelijkbaar met de periode na 2013. Voor een consistentere review van de langere termijn trend is het beter om naar aardbevingen met $M > 1.5$ te kijken.

Uit dit plaatje is duidelijk dat de dichtheidswaarde regelmatig overschreden werd in de periode van 2012 tot 2014 en dat gedurende 2014 zelfs lange tijd continu overschreden werd (de recente waarde van 0.22 werd overigens buiten deze Loppersum cirkel (fig 15) geregistreerd). Het middelste panel in figuur 15 laat zien dat er verschuiving is van de magnitude van de bevingen die onder de definitie vallen: in de periode van 2012 tot 2014 droegen er ook $M > 2.5$ bevingen bij aan het aardbevings-dichtheids-getal; in de meer recente periode zijn het bevingen van een gemiddeld wat lager magnitude.

Een andere vraag die opkomt is of het aardbevingsdichtheid patroon erg afhankelijk is van de gekozen drempel-magnitude ($M > 1$). Figuur 16 laat zien hoe het aardbevingsgetal zich ontwikkeld heeft voor aardbevingen met magnitudes $M > 1.5$). De periode na 2014 laat een soortgelijk dalend patroon zien als in figuur 15 en laat pieken zien rond 2007, 2019, 2012 en 2014 (12-maands-getallen).



Figuur 16. Ontwikkeling van aardbevings-dichtheid voor het Loppersum gebied over de tijd; voor aardbevingen met magnitude $M > 1.5$. Het onderste panel laat de aardbevingsdichtheid zien voor de periode van 1994 tot 2017. De cirkel in het kaartje geeft de gebiedsgrens weer waarvoor deze analyse is uitgevoerd.

Voorlopige conclusie uit deze twee figuren is dat het niet de eerste keer is dat we deze aardbevingsdichtheidswaarde waarnemen (maar wel de eerste keer sinds we dit specifiek monitoren). De waarde die we nu zien zit duidelijk onder de waarden geobserveerd in 2014 maar boven de waarden van 2015 en 2016. De vraag natuurlijk is of dit de voorbode is van meer seismiciteit zoals gezien in 2013 of dat dit slechts een korte piek-waarde is zoals in bijvoorbeeld 2007.

10.1 Een versimpeld beeld van de Loppersum bevingen

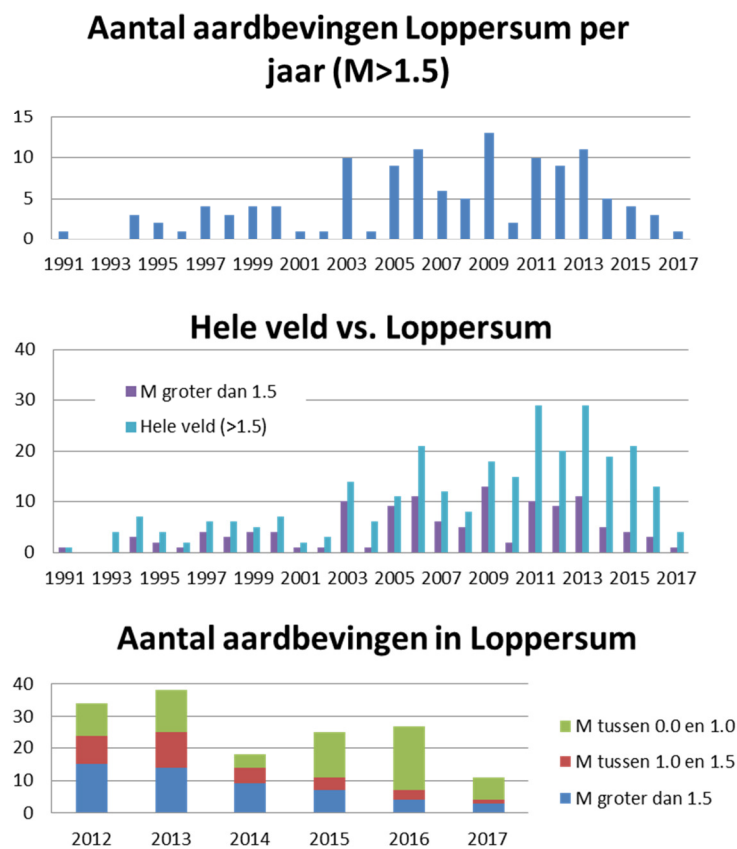
Het simpelste beeld wat je kunt schetsen van de (meer-jarige) situatie rond de bevingen is weergegeven in figuur 17. Het bovenste panel toont het aantal bevingen per jaar in de gemeente Loppersum met een grootte van minimaal 1.5. Deze waarde is gekozen omdat we sinds 1991 betrouwbaar bevingen met deze magnitude kunnen meten en we dus een compleet beeld hebben sinds 1991 tot nu. Het plaatje laat zien dat er een relatief gering aantal bevingen is geweest tot 2003. In de periode van 2003 tot 2013

waren er relatief veel bevingen en vanaf 2014 (na de Loppersum productie-ingreep) was er een dalende trend. Het jaar 2017 is uiteraard niet compleet.

Het panel eronder laat zien hoe het aantal bevingen in Loppersum zich heeft verhouden tot het aantal bevingen in het hele veld. Dat laat zien dat het aantal bevingen in Loppersum vooral de laatste paar jaar een relatief klein deel was van de totale seismiciteit, wat mogelijk te herleiden is tot de productie-ingreep in Loppersum. Ook het hele veld laat een wat lager aantal bevingen zien sinds 2013.

Het onderste panel vergelijkt het patroon dat je krijgt als je de beschouwing uitbreidt met kleinere bevingen. Dit laat vooral zien dat het aandeel geregistreerde kleine bevingen in het totaal aantal bevingen is toegenomen. Dit is het gevolg van het uitbreiden van het KNMI meetnetwerk.

Het is belangrijk om op te merken dat deze diagrammen soms een vertekend kunnen geven doordat jaren en regio's (onbedoeld) enigszins arbitrair gekozen kunnen worden. Dat is ook de reden waarom in figuren als figuur 1, figuur 3 en figuur 15 met 12 maands-getallen en per km² gewerkt wordt. Voorlopige conclusie echter uit deze diagrammen (en figuur 15) is dat dit geen historisch bijzondere situatie is en dat er vrij veel bevingen "nodig zijn" om met zekerheid te kunnen claimen dat we terug zijn in de situatie van voor de Loppersum-ingreep.



Figuur 17. Simpele aardbevings-statistieken voor het Loppersum gebied. 2017 data is uiteraard niet voor het volledige jaar maar t/m 1 maart 2017.

11 Verder werk en voorlopige conclusies

11.1 Verder werk

We gaan het volgende werk inpassen in het studie en data acquisitie-plan:

1. Expliciete geomechanische analyse van breuk-typen zoals de breuk-set tussen LRM en POS waarin een verband wordt gelegd tussen lokale productie en seismiciteit
2. Statistisch werk om trend-breuk verder te onderzoeken (time between events analyse).
3. Proberen of er verbanden te leggen tussen nog niet eerder beschouwde parameters en deze bevingen (e.g. neural network analysis). Verder bekijken van de invloed van kleine drukverschillen op een breuk en de seismiciteit.
4. Sector-model van het reservoir model waarin de delta pressure bestudeerd worden als functie van typische productie-inzet van 2 clusters aan weerszijden van een breuk

De hierboven genoemde studies zullen worden uitgevoerd als onderdeel van het NAM-geleide studie-programma maar kunnen daarnaast ook door externe partijen worden gedaan. Bijvoorbeeld binnen een structureel lange termijn onderzoeksprogramme waarbinnen integraal en onafhankelijk wetenschappelijk en toegepast onderzoek plaatsvindt over aardbevingsproblematiek (ref. OVV rapport “Aardbevingsrisico’s in Groningen”, februari 2015). NAM zal hiervoor desgevraagd de verzamelde seismische data beschikbaar stellen. Het gaat hierbij om data van het KNMI netwerk, diepe geofoons (Zeerijp) en het flexibele gefoon netwerk.

11.2 Voorlopige conclusies

In dit rapport is geprobeerd om een relatie te leggen tussen individuele parameters en de optredende seismiciteit. Uit literatuur blijkt dat vooral spanningsveranderingen langs breuken door globale drukdaling en het verzet (offset) en de sterkte-eigenschappen van breuken bepalend zijn of er aardbevingen optreden. Met andere woorden; een relatie met set parameters. Een goede correlatie tussen individuele parameters (bv. offset) en aardbevingen lijkt daarom dan ook onwaarschijnlijk.

Hoewel het enigszins onbevredigend is om geen onmiddellijke duidelijke relaties te kunnen leggen tussen de in de literatuur aangedragen aanknopingspunten en de recente seismiciteit kunnen we wel voorzichtig aangeven dat de ontwikkeling van seismiciteit niet af lijkt te wijken van het historische patroon en de verwachtingen die volgen uit modelleringsstudies. Er is ook geen bijzondere productie-inzet geweest die in verband kan worden gebracht met de recente seismische events. Van escalatie van aardbevingen lijkt alleen sprake als je een korte tijd en een klein gebied beschouwt; maar dat heen en weer verspringen van seismische events is iets wat in de recente historie ook waargenomen is en hoort bij voorspellingen van het door compactie gedreven seismisch model (ref. 6). De “terugkeer” van seismiciteit naar het Loppersum gebied kan worden verklaard door een globale drukdaling en past bij een “regression-to-the-mean” van het seismologisch model en is op grond van de huidige data lastig te koppelen aan bijzondere of speciale productie-inzet. Dat maakt het voorstellen van bepaalde maatregelen niet eenvoudiger maar in sectie 12 worden die wel iets verder uitgediept.

Data analyse		Voorlopige conclusie
Aardbevingsdichtheid kaart (12 maanden)		Er vinden (continu) verschuivingen van aardbevingsposities plaats, het is op dit moment lastig om te zeggen dat er iets bijzonders aan de hand is. Een aardbevings-dichtheid waarde van 0.22/km ² /jaar is bereikt; dat is de hoogste in de laatste jaren.
Aardbevingsdichtheid-kaart - historie		Er is geen nieuw gebied seismisch actief geworden.
Hypo-centre lokatie		De bevingen lijken op voorhand niet geassocieerd met een specifieke breuk (maar er is nog steeds onnauwkeurigheid rondom ondergrondse lokatie bepaling).
Fault Off-set kaart		De breuken die op basis van hun verzet het meeste aanleiding zouden moeten geven tot seismiciteit lijken niet samen te vallen met de hypo-centra van de recente bevingen.
Recente productie individuele clusters		Wij zien lokaal tot nu toe nog geen coherent patroon tussen productie opstarten en de ontwikkeling van seismiciteit.
Pressure plots van Loppersum gebied		De drukverschillen veroorzaakt door de meest nabije clusters is klein maar er zijn mogelijk wel drukgradiënten van ongeveer een bar over een breuk tussen POS en LRM.
Reservoir-drukvermindering per tijds-eenheid.		Bepalen of de vermindering in de druk in het Loppersum gebied gevarieerd heeft in de tijd en of dat correleert met de ontwikkelende seismiciteit.
Stroomlijnen patroon		Het druk-veld rond Wirdum wordt tevens beïnvloed door OVS , en oostelijker ook door TJM cluster naast de invloed van POS en LRM.
HC kolom thickness map		Het bevingen cluster van Wirdum lijkt te correleren met een wat dikkere HC column ; de bevingen van Garsthuizen in mindere mate.
Dalings-grafiekje van Wirdum gebied		Laat een continu dalend patroon zien zonder anomale stappen.

Tabel 4. Voorlopige conclusies bij de verschillende analyses.

12 Mogelijke ingrepen indien drempelwaarde overschreden wordt

Hieronder staan een aantal potentiële maatregelen uitgeschreven die genomen zouden kunnen worden in respons op het overschrijden van de drempelwaarde van 0.25/km²/jaar. Het Groningen veld moet opereren binnen strikte spelregels die zowel (aardbevings-)veiligheid en leveringszekerheid moeten borgen. En dit vereist een afweging: van de mogelijke productie-ingrepen zijn er slechts enkele die door NAM eenzijdig genomen kunnen worden; bijna alle mogelijke maatregelen zullen met Gas Unie Transport Services en GasTerra overlegd moeten worden, sommige moeten wellicht ook door de Minister goedgekeurd worden.

1. De eenvoudigste maatregel, zonder leveringszekerheid-consequentie, is verdere gerichte studie naar oorzaak en effect. Dit kan gaan langs de lijnen van verdere studies gesuggereerd in sectie 11.1
2. Een maatregel om nog intensiever data te gaan verzamelen via inzet van het zogenaamde flexibele geofon netwerk wordt op dit moment niet zo zinvol geacht gezien de aard van de data die verzameld wordt met dit netwerk.
3. Een maatregel met beperkte leveringszekerheid consequentie is het minder snel opregelen van productie-clusters. Uit de discussie in secties 5 en 6, blijkt dat er weliswaar twijfel is of

- dit effect heeft maar het kan de hypothese dat dit aardbevingen beperkt verder testen. Deze maatregel wordt op dit moment voorbereid met “Operaties”. Wij zullen deze maatregel effectueren (in overleg met SodM en GTS) zodra de protocol drempel-waarde voor aardbevings-dichtheid van 0.25/km²/jaar overschreden wordt.
4. Het tijdelijk of definitief insluiten van Loppersum clusters is ook een mogelijke maatregel. Dit zal een leveringszekerheid consequentie hebben die afgewogen moet worden tegen de verwachte effectiviteit op aardbevingsdichtheid (gegeven het mechanisme van drukval en compactie over het hele veld) en verdere reductie van leveringszekerheid. Dit is een maatregel die genomen zou moeten worden in samenspraak met SodM, Gas Unie, GasTerra en de Minister.
 5. In het kader van het Meet en Regel Protocol 2017 (in ontwikkeling, ref. Instemmingsbesluit Artikel 5) wordt ook een set van nog verder ingrijpende productie-maatregelen doorgedacht die ook een toenemende leveringszekerheids-impact zullen hebben. Optimalisatie van de regionale verdeling van productie maakt daar deel van uit en zal in samenspraak met SodM en de Minister verder uitgewerkt worden.

Het is ook van belang om op te merken dat eventuele maatregelen bijtijds onderzocht en genomen zouden moeten worden. Het kost tijd voordat deze maatregelen effect hebben op seismiciteit maar er is ook tijd nodig om sommige van die maatregelen goed voor te bereiden en de nadelige effecten ervan in termen van leveringszekerheid en operationele veiligheid goed te kunnen managen.

Referenties

1. Statistics of seismic events at the Groningen field, Bulletin of Earthquake Engineering 14(77), 2016, Manuel Nepveu (TNO), Karin Van Thienen-Visser (TNO), Danijela Sijacic (TNO)
2. Trend changes in ground subsidence in Groningen, update May 2016. Frank Pijpers en D. Jan van der Laan
3. A phenomenological relationship between reservoir pressure and tremor rates in Groningen, 2016., Frank P. Pijpers, CBS
4. Statistical methodology to test for evidence of seasonal variation in rates of earthquakes in the Groningen field, Stijn Bierman (Shell), 2015, 2016.
5. Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field, 2015, TNO, Karin van Thienen-Visser, Danijela Sijacic, Manuel Nepveu, JanDiederik van Wees, Jenny Hettelaar
6. An activity rate model of induced seismicity within the Groningen Field (Part 1) Stephen Bourne and Steve Oates, 2015
7. Impact of various modelling options on the onset of fault slip and the fault slip response using 2-dimensional Finite-Element modelling, 2015, Peter van den Bogert (Shell).
8. Hornbach, M. J., H. R. DeShon, W. L. Ellsworth, B. W. Stump, C. Hayward, C. Frohlich, H. R. Oldham, J. E. Olson, M. B. Magnani, C. Brokaw, and J. H. Luetgert, 2015, *Causal factors for seismicity near Azle, Texas*: Nature Communications, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7728>.

9. Van Wees, J. D.; Buijze, L.; Van Thienen-Visser, K.; Nepveu, M.; Wassing, B. B T; Orlic, B.; Fokker, P. A. (2014) Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands. *Geothermics*, volume 52, pp. 206 – 219
10. Groningen Winningsplan 2016 and Technical addendum (NAM website).