



RAPPORTAGE SEISMICITEIT
GRONINGEN – 1 NOV 2017



Inhoudsopgave

1	Samenvatting	2
2	Inleiding en leeswijzer.....	3
2.1	Inleiding.....	3
2.2	Leeswijzer.....	4
3	Status MRP oktober 2017	5
4	“Activity Rate” – aantal aardbevingen.....	6
4.1	Meet netwerk en meetnauwkeurigheid.....	6
4.2	Aantal aardbevingen afgelopen 12 maanden.....	6
4.3	12-Maandsgetal	9
5	“Earthquake density” – aardbevingsdichtheid	11
6	“Peak-ground-acceleration” – maximale grondversnelling.....	13
6.1	Definitie en herkomst PGA-data	13
6.2	PGA de afgelopen 12 maanden en historie	13
7	“Peak-ground-velocity”	14
7.1	Definitie en herkomst PGV-data	14
7.2	PGV de afgelopen 12 maanden en historie	15
8	“Damage-state”/ gebouwbeweging/ schade-ontwikkeling.....	16
8.1	Achtergrond bij “Damage-State”	16
8.2	Ontwikkeling schade over de laatste 5 jaar	16
9	Andere patronen.....	18
9.1	Ontwikkeling per regio.....	18
9.2	Verhouding grote en kleine bevingen.....	20
9.3	Hypo-centra aardbevingen – “Full wave form relocation”	22
10	Productie en reservoir-druk ontwikkeling	23
10.1	Productie.....	23
10.2	Ontwikkeling van de reservoir-druk.....	25
11	Statistische -en modellerings- context van de seismische ontwikkelingen.....	27
11.1	Event rate testen.....	27
11.1.1	Event rate testen “hele veld”	27
11.1.2	Event rate testen “Loppersum gebied”	29
11.2	Verbanden seismiciteit met productie, druk en bodemdaling.....	32

11.3	Voorspellingen seismiciteit-ontwikkeling	34
11.3.1	Voorspellingen voor hele Groningen veld	34
11.3.2	Voorspellingen voor regio Noordwest (Loppersum gebied).....	36
12	Maatregelen.....	37
13	Referenties.....	39
14	Updates/ Errata.....	40
15	Appendix A – Figuren	41

1 Samenvatting

De ontwikkeling van seismiciteit in het Groningen-veld is geanalyseerd aan de hand van de structuur van het nieuwe Groningen Meet- en Regel protocol en de opzet van dit rapport volgt die structuur. Dit periodieke rapport is ook qua inhoud vernieuwd. Het is breder van opzet dan de vorige editie en gaat dieper in op een aantal seismische ontwikkelingen. Enerzijds omdat dat beter aansluit bij de filosofie van het Groningen Meet- en Regel protocol (“vooruitkijken”), anderzijds omdat de seismische ontwikkelingen daar wat meer aanleiding toe geven.

Van de stand van zaken rond de reguliere protocol parameters wordt geconcludeerd dat er vier van de zes parameters (die seismische – en schade - ontwikkeling in de gaten moeten houden) een grenswaarde overschreden hebben, waarvan drie op waakzaamheids-niveau en één op signaleringsniveau. Van deze parameters wordt een vrij uitgebreide context beschreven om deze ontwikkeling in hun historische context te kunnen plaatsen en trachten te begrijpen. Speciale aandacht wordt gegeven aan seismische ontwikkeling Loppersum waar er een vrij duidelijke trend omhoog is voor bevingen met een magnitude van 1 of hoger. Hoewel dit niet direct een protocol parameter is, ligt deze trend aan de basis van de aardbevingsdichtheid-parameter die wel onderdeel is van het signaleringssysteem van het MRP.

In sectie 10 van dit rapport wordt vervolgens een statistische analyse gepresenteerd waar geconcludeerd wordt dat op grond van één statistische test ($M \geq 1$) deze seismische ontwikkeling ook daadwerkelijk statistisch significant is: de seismiciteit rond Loppersum voor deze magnitude klasse lag afgelopen jaar hoger dan in ruim een jaar daarvoor. Hoewel deze ontwikkeling, geplaatst in een langer historisch kader of getest op bevingen met een hogere magnitude ($M \geq 1.5$) minder significant is, is er toch nog wat verder naar gekeken.

Allereerst kon worden vastgesteld dat niet met zekerheid gezegd kan worden dat de verhouding grote en kleine bevingen in het Loppersum gebied veranderd is. Met andere woorden, deze toenemende trend in kleine bevingen in het gebied rond Loppersum kan niet worden gerelativeerd met een claim dat dit alleen de kleine bevingen betreft; er kan op dit moment geen statistische significante uitspraak gedaan worden dat de kans op grote bevingen afgenomen is in het Loppersum gebied.

Kort bekeken daarna is waar deze ontwikkeling verband mee lijkt te houden, met productie, druk, bodemdaling of een ingewikkelder parameter die zowel huidige ontwikkelingen als historische ontwikkeling meeneemt. De ontwikkeling lijkt geen direct hoofdzakelijk verband te houden met productievolume uit de clusters rond Loppersum, veel beter met de druk-ontwikkeling (die beïnvloed wordt door productie uit het hele veld) en deze samengestelde parameter. Hierdoor aangemoedigd worden twee model-voorspellingen gedaan voor de verwachte ontwikkeling van seismiciteit in het gebied. Eén op basis van een verbeterde versie van het hybride geomechanische/statistische model dat eerder gebruikt is, en één op basis van een recent ontwikkeld “machine-learning” model. Deze modellen gebruiken de verwachte productie, de voorspelde reservoir-drukken en bodemdaling om de verwachte seismiciteit te bepalen. Uit beide modellen komt dat de verwachting dat de seismiciteit zich zal stabiliseren licht boven het huidige niveau.

Dit rapport besluit met een overzicht van reeds genomen en mogelijk te nemen maatregelen. Hier wordt aangegeven dat op grond van de bovenstaande analyse (en op grond van de status van het protocol) waakzaamheid geboden is en ook deze trend in $M \geq 1$ nauwlettend gevolgd moeten worden, of die nou gepaard gaat met een overschrijding van een protocol parameter of niet. Van de reeds genomen maatregel (10% volume reductie, van 24 mrd m³ naar 21.6 mrd m³) en verdere aanscherping van de manier van produceren (voorkomen van “pieken”), wordt verwacht dat de effecten gevalideerd zullen worden in de komende 6-9 maanden en dan zal opnieuw gekeken worden of een nieuwe ingreep noodzakelijk is. Dat zal natuurlijk ook eerder gebeuren wanneer de seismische ontwikkelingen daartoe aanleiding geven. Ook zullen andere maatregelen, waaronder het volledig insluiten van een aantal LOPP(Z)-clusters en het optimaliseren van productie-distributie (geografisch), alvast geëvalueerd worden.

2 Inleiding en leeswijzer

2.1 Inleiding

Dit is de periodieke rapportage zoals beschreven staat in artikel 5 van het instemmingsbesluit Winningsplan Groningen en verder beschreven staat in hoofdstuk 11 van het nieuwe Meet- en Regel Protocol (hierna afgekort in dit document tot: “MRP”, dit document is te vinden via Referentie 1). Artikel 5 van het instemmingsbesluit bepaalt dat de Nederlands Aardolie Maatschappij elk jaar op 1 mei en op 1 november een rapport uitbrengt met daarin de analyses van de ontwikkeling van de seismiciteit en van de voorgestelde maatregelen.

Het rapport heeft een andere opzet gekregen ten opzichte van vorige versies en is uitgebreid met een paar (statistische) analyses. In het rapport wordt geprobeerd aan te sluiten bij de filosofie van “vooruitkijken” in het Groningen 2017 MRP.

Het rapport geeft ook meer achtergrond bij de meet-grootheden, en daar waar mogelijk statistische verdieping. Maar, hoewel dit rapport met uiterste zorgvuldigheid is samengesteld, is het rapport operationeel van karakter, sluit aan op het MRP, is geschreven voor een breder publiek, en niet bedoeld voor publicatie in een academisch tijdschrift; conclusies zijn voorzichtig en de review van dit rapport is beperkt tot de eigen NAM-organisatie. Daar waar nodig of wenselijk zal (ook op verzoek) meer onderzoek gedaan worden om één en ander te bevestigen of te ontkrachten. Het gedrag van aardbevingen is notoir moeilijk te voorspellen, maar er is daar waar mogelijk toch een poging gedaan om ontwikkelingen te duiden en voorzichtige voorspellingen te doen; gebruik makend van voortschrijdend inzicht en op basis van statistische en geomechanische modellen (die wel in internationale tijdschriften gepubliceerd zijn).

In de aanloop naar dit rapport, en in het rapport zelf is actief gezocht naar trends door in magnitude-segmenten en geografische-segmenten van de dataset te zoeken. Statistisch gezien betekent dat er dan een wat grotere kans is dat een afwijkende trend wordt gevonden, terwijl die in werkelijkheid het product is van kans-fluctuaties. In dit rapport echter is de lijn gekozen om dit statistisch risico te accepteren, en wellicht dan maar te vroeg te concluderen dat de trend “echt” is.

Seismische gegevens en gasproductie in dit rapport zijn bijgewerkt tot en met 1 oktober. Het rapport kijkt in principe een jaar terug maar daar waar relevant wordt teruggekeken tot het jaar 2000 om seismische ontwikkelingen in hun historische context te plaatsen.

2.2 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd rond de structuur van het MRP – waarvan de status waarden in tabel 1 zijn weergegeven. Sectie 3 vat de huidige status van alle meet-grootheden samen. In secties 4 tot en met 9 worden de meet-grootheden één voor één besproken en wordt de achtergrond erbij gegeven.

Sectie 10 beschrijft de productie en het reservoir druk verloop van de afgelopen jaren. Sectie 11 bespreekt de statistische en modellerings-context van de huidige seismische ontwikkelingen. In sectie 12 tenslotte wordt de koppeling van maatregelen aan de seismische ontwikkelingen besproken.

Om de leesbaarheid te vergoten is in het rapport geprobeerd om bepaalde kleuren consistent te gebruiken in de verschillende figuren.

- Groen: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan 1
- Paars: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan 1.2
- Blauw: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan 1.5
- Rood: Bevingen met een magnitude groter of gelijk aan 2
- Geel (omkaderd): Analyses die betrekking hebben op het gebied rond Loppersum

De reden dat af en toe verschillende magnitude gebruikt worden voor analyse in dit rapport, heeft vooral te maken met de compleetheid van de dataset en de hoeveelheid data die beschikbaar is (zie ook discussie in sectie 4).

Verder zijn een aantal figuren uit dit rapport zijn ook vergroot opgenomen in Appendix A (voor elk figuur een A4 met een wat uitgebreider onderschrift).

3 Status MRP oktober 2017

De status van de signaalwaarden van het MRP staat weergegeven in tabel 1. In de eerste kolom staan de 6 grootheden die permanent gemonitord worden met kort samengevat de definities. De bovenste vier grootheden staan ook vermeld als dashboard op de NAM-website (www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen) en deze worden vrijwel continue bijgewerkt. In de tweede kolom staan de actuele waarden, in de derde de waarden bij de vorige rapportage. De laatste 3 kolommen geven de grenswaarden die gehanteerd worden in het MRP voor “waakzaamheid”, “signalering” en “interventie”. Deze grenswaarden zijn op hun beurt gerelateerd aan “maatregelen” die bij overschrijding overwogen worden (zie ook sectie 12). Voor uitvoeriger beschrijving hiervan zie Referentie 1.

MRP status					
	1 oktober 2017	april 2017 / vorige periode	Grenswaarden		
			Waakzaamheid	Signalering	Interventie
Activity Rate (# aardbevingen, $M \geq 1.5$)	17	12	15	20	25
EQ density (aantal $\times \text{km}^2 \text{jr}^{-1}$, $M \geq 1$)	0.30	0.22	0.17	0.25	0.40
PGA (in “g”)	0.04 (Slo)	0.008 (Wirdum)	0.05	0.08	0.10
PGV (meest recente maximum, in mm/s)	6.4 (Slo)	-	5	50	80
Damage State	DS1	-	Δ (model, actueel)		
Other patterns	Loppersum $M \geq 1$ trend	-	“Experten Oordeel”		

Tabel 1. MRP-status op 1 oktober 2017.

De MRP-status op 1 oktober 2017: Het aantal aardbevingen (“activity rate”) ligt tussen het waakzaamheids-niveau en het signalerings-niveau. Het 12 maands-getal voor $M \geq 1.5$ heeft een vrije grote stijging laten zien over de afgelopen 6 maanden. De aardbevings-dichtheid waarde (“EQ density”) heeft het waakzaamheids-niveau overschreden en is ook gestegen over de afgelopen periode. De maximale PGA in de afgelopen periode bleef onder het waakzaamheids-niveau en was gerelateerd aan de beving in Slochteren (mei van dit jaar). Ook de maximale PGV was geassocieerd met dezelfde beving in Slochteren, bleef onder het signalerings-niveau maar overschreed het waakzaamheids-niveau. De waargenomen schade (“Damage state”) heeft geen onverwachte patronen laten zien. Er zijn ook geen onverwachte patronen waargenomen in de locaties van aardbevingen, de verhouding kleine en grote aardbevingen of in relatie tussen aardbevings-magnitude en PGV/PGA (peak ground-velocity en peak ground acceleration).

4 “Activity Rate” – aantal aardbevingen

4.1 Meet netwerk en meetnauwkeurigheid

Vanaf 2013 is het meetnetwerk uitgebreid met 70 meetpunten. Het doel van deze uitbreiding was de vergroting van de nauwkeurigheid en gevoeligheid van het meetnetwerk. Elk meetstation bestaat uit een bovengronds geplaatste accelerometer voor het meten van grondbeweging en vier ondergronds geplaatste geofoons voor nauwkeurige plaatsbepaling en aardbevingssterkte. Alle in dit hoofdstuk gerapporteerde meetdata is ontleend aan en is terug te vinden op de website van het KNMI (<http://www.knmi.nl/nederland-nu/seismologie/aardbevingen>).

De gevoeligheid van het seismische meetnetwerk is na de uitbreiding met 70 nieuwe seismische meetstations toegenomen waardoor vanaf 2014 alle aardbevingen met een magnitude groter dan 1.0 op de schaal van Richter boven het Groningenveld worden geregistreerd, de catalogus van compleetheid is magnitude 1.0. Vóór 2014 was de catalogus van compleetheid magnitude in elk geval 1.5, maar met wat meer onzekerheid kan een magnitude van compleetheid van 1.2 sinds 2000 aangehouden worden. Het aantal aardbevingen met een magnitude kleiner dan 1.5 (1.2) vóór 2014 zou dus onderschat kunnen zijn.

4.2 Aantal aardbevingen afgelopen 12 maanden

In de afgelopen 12 maanden, tussen oktober 2016 en september 2017, zijn er 53 aardbevingen gemeten met een magnitude groter of gelijk aan 1.0 (vergeleken met 29 aardbevingen in de 12 maanden ervoor). Tabel 2 toont het aantal aardbevingen per maand. Er zijn in deze periode 36 aardbevingen gemeten met een magnitude tussen de 1 en 1.5. Er waren 13 aardbevingen tussen de 1.5 en 2, 3 tussen 2 en 2.5 en 1 groter dan 2.5. Er was een kleine stijging in al deze categorieën ten opzichte van het jaar ervoor.

Maand	$1.0 \leq M < 1.5$	$1.5 \leq M < 2.0$	$2.0 \leq M < 2.5$	$M \geq 2.5$	Totaal
Oct-16	0	1	1	0	2
Nov-16	4	1	0	0	5
Dec-16	2	2	0	0	4
Jan-17	0	0	0	0	0
Feb-17	6	1	0	0	7
Mar-17	1	1	1	0	3
Apr-17	3	1	1	0	5
May-17	4	2	0	1	7
Jun-17	3	0	0	0	3
Jul-17	4	0	0	0	4
Aug-17	3	2	0	0	5
Sep-17	6	2	0	0	8
Totaal	36	13	3	1	53

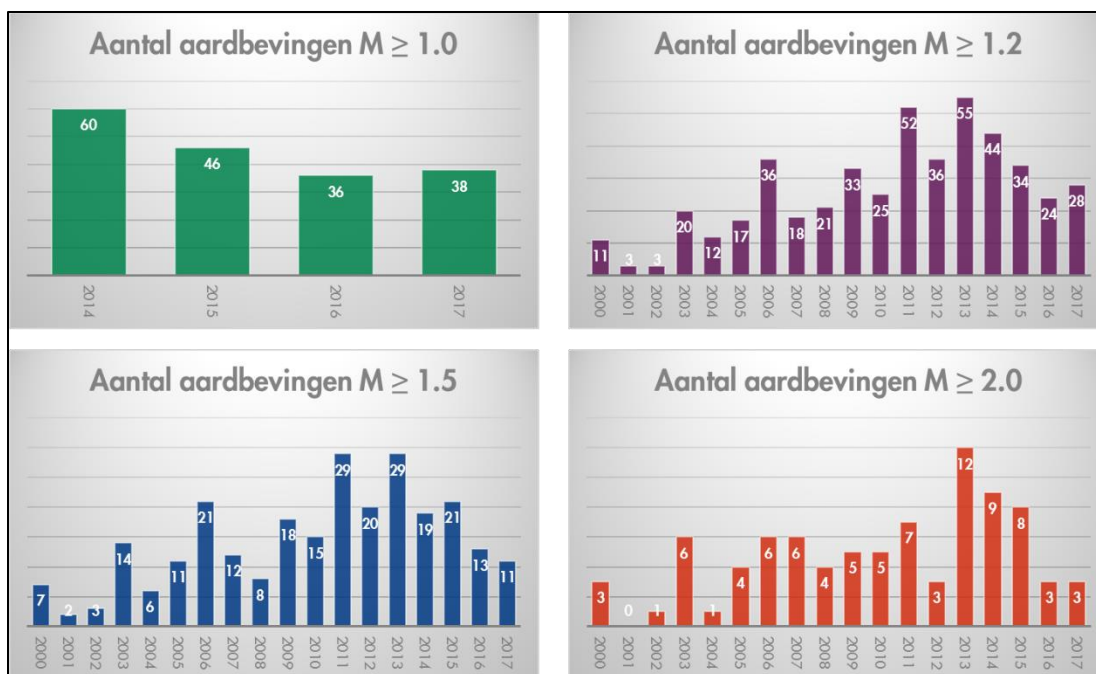
Tabel 2. Aantal waargenomen aardbevingen in het afgelopen jaar.

Tabel 3 geeft een aantal historische gemiddelden en aantallen waarmee huidige ontwikkelingen in historische context geplaatst kunnen worden. De jaarlijkse gemiddelde sinds 2014 liggen op dertig voor magnitudes tussen de 1 en 1.5, elf voor magnitudes tussen de 1.5 en 2.0, vier voor magnitudes tussen de 2.0 en 2.5 en twee voor magnitudes groter dan 2.5. Dat betekent dus dat er gemiddeld 47 bevingen per jaar waren met een magnitude groter dan 1.0. De dataset voor $M < 1.5$ is incomplete en pas sinds 2014 (na de uitbreiding van het meet-netwerk) kunnen we bevingen $M \geq 1.0$ meten. De tabel laat ook zien dat er vanaf 2000 zo'n 260 bevingen zijn geweest met een magnitude van 1.5 of groter. Opvallend zijn ook de relatief vaste verhoudingen tussen grote en kleine bevingen (iets wat overigens al veel eerder vastgesteld is voor Groningen).

Maand	$1.0 \leq M < 1.5$	$1.5 \leq M < 2.0$	$2.0 \leq M < 2.5$	$M \geq 2.5$
Maandelijks gemiddelde vanaf 2014	2.6	1	0.3	0.2
Maandelijks gemiddelde vanaf 2000	incompleet	1	0.2	0.2
Jaarlijks gemiddelde vanaf 2014	30	11	4	2
Jaarlijks gemiddelde vanaf 2000	incompleet	10	3	2
Totaal vanaf 2014	119	42	15	8
Totaal vanaf 2000	incompleet	174	53	33

Tabel 1. Historische gemiddelden en jaartotalen

Figuur 1 laat de ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar zien voor de verschillende magnitude-klassen. Het panel linksboven (groene kleur) laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M \geq 1$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2017 uiteraard nog niet compleet is en dat er vanwege incompleetheid van de data voor 2014, er geen data van voor 2014 geplot worden). Er zijn enige statistische aanwijzingen dat de dataset boven de 1.2 wel compleet zou kunnen zijn (voor de periode voor 2014) en dat is de reden dat deze geplot is vanaf het jaar 2000 (panel rechtsboven, paarse kleuren). Dit panel laat zien dat er dit jaar nu al meer bevingen zijn dan vorig jaar en dat mogelijk uit kan komen op levels zoals we die in 2015, 2009 en 2006 hebben gezien. Het linker panel beneden (blauwe kleuren) laat bevingen zien met een magnitude van 1.5 en hoger. Deze dataset is vrijwel zeker compleet vanaf 2000 en kan dus goed gebruikt worden om een historisch perspectief te bieden op de seismische ontwikkeling. Het panel rechts beneden tenslotte (in de rode kleuren), laat de bevingen van 2.0 en hoger zien. In sectie 9 zal geprobeerd worden hier wat statistische verdieping te geven. Deze trends worden verder geanalyseerd in de volgende paragrafen.

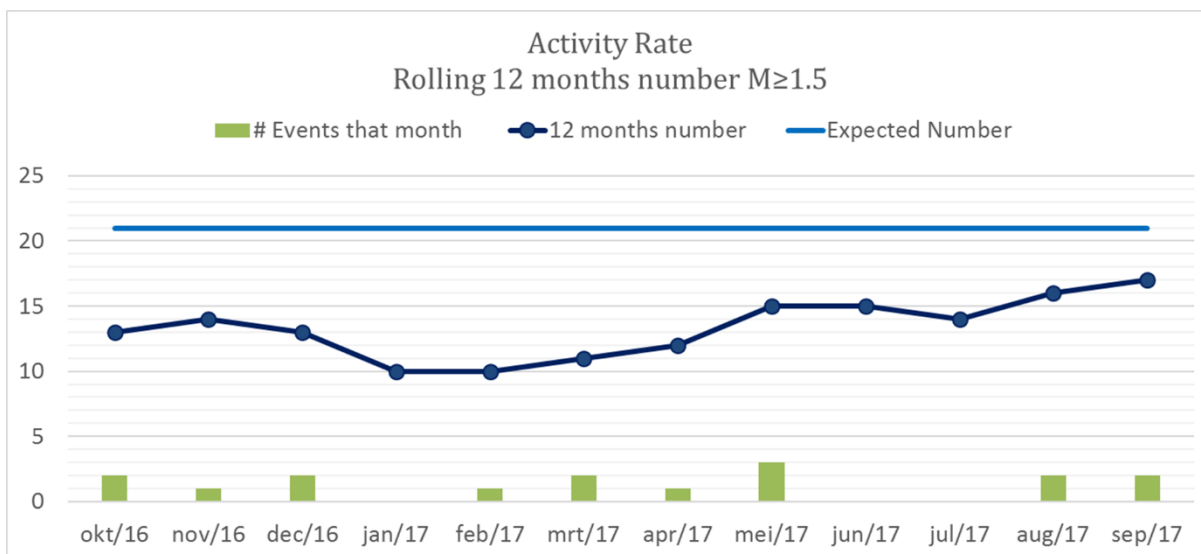


Figuur 1. Aantal aardbevingen per jaar voor 4 verschillende magnitude-klassen

4.3 12-Maandsgetal

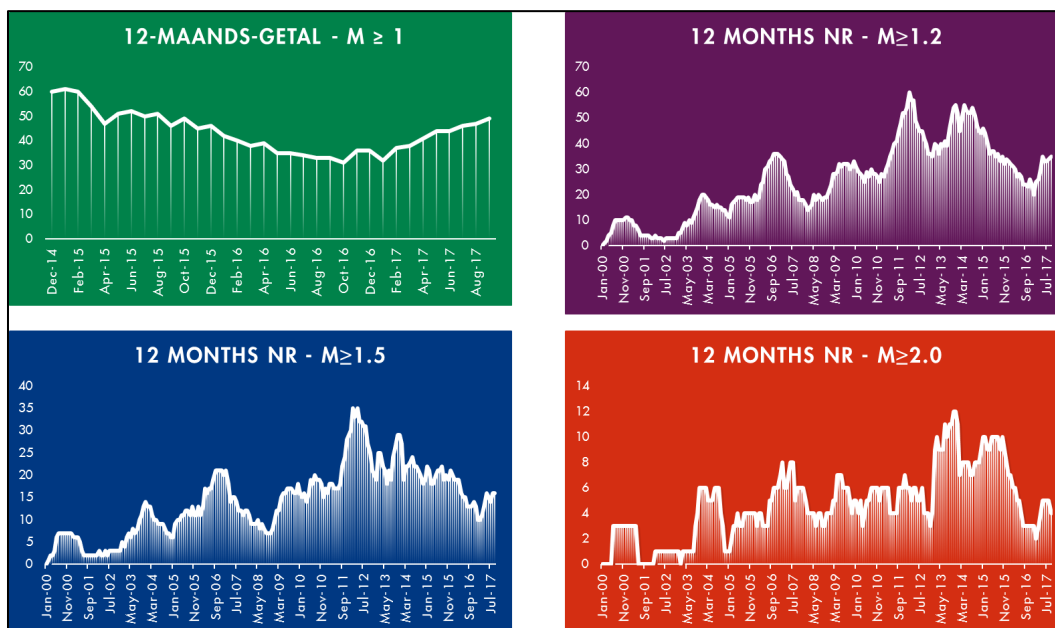
Het MRP gebruikt een zogenaamd 12-maands-getal als meet-grootheid. Hiermee wordt de seismiciteits-ontwikkeling voor een jaar continue bijgesteld zodra er weer een maand verstreken is. Het huidige 12-maandsgetal in het protocol (1 oktober 2017) van 17 is dus de som van alle bevingen met een magnitude van groter dan of gelijk aan 1.5 van oktober 2016 tot en met september 2017.

Figuur 2 laat de 12 maands-getallen zien voor $M \geq 1$ (groene lijn) en $M \geq 1.5$ (blauwe lijn). Beide lijnen laten een vrijwel monotoon stijgende trend zien over de laatste 8 maanden. De groene lijn ($M \geq 1$) laat een wat sterkere trend zien dan de blauwe ($M \geq 1.5$). De (statistische) interpretatie hiervan is afhankelijk van hoe lang in de tijd teruggekeken wordt (zie ook figuur 2). In sectie 9 wordt dieper ingegaan op deze statistiek. De relatie met productie is niet zonder meer duidelijk en is onderwerp van discussie in een paragraaf verderop in dit document (sectie 9).



Figuur 2. Maandgetallen aantal aardbevingen en productie

Figuur 3 laat de 12 maands-getallen zien voor dezelfde vier magnitude-klassen als uit figuur 3 (deze zijn uiteraard ook gebaseerd op dezelfde data). In het groene paneel linksboven staan de aardbevingen met een magnitude van 1.0 en hoger.



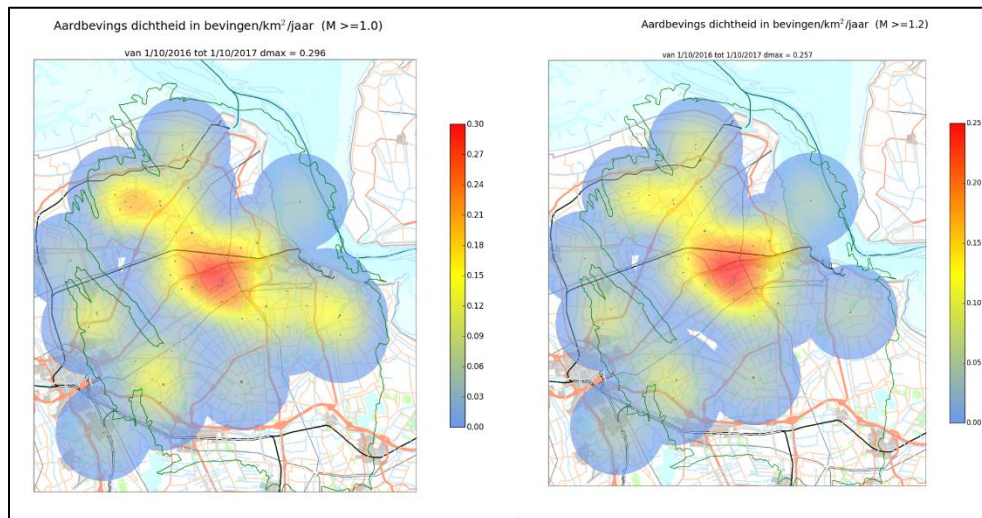
Figuur 3. 12-maandsgetallen voor 4 magnitude-klassen

Deze laat dezelfde stijgende sinds oktober 2016 zien als in figuur 1 maar laat ook het verband zien met de ontwikkeling van seismiciteit in de jaren ervoor. Op dit moment is een level van seismiciteit bereikt dat ongeveer op hetzelfde niveau ligt als in December 2015. Het panel ernaast (parse

kleur) laat bevingen zien met een magnitude van 1.2 en hoger, maar geeft de ontwikkeling sinds 2000 weer. Ook hier is de stijging sinds 2016 duidelijk. Duidelijk uit deze plaatjes is dat stijgingen en dalingen in de verschillende magnitude-klassen tamelijk goed samenvallen hoewel er ook verscheidene periodes in het verleden zijn waarin de seismiciteit voor bevingen voor $M \geq 1.5$ omhoogging terwijl de $M \geq 2.0$ vrijwel constant bleef (e.g. 2009-2012). Het gebrek aan data echter (aardbevingen $M \geq 2$), maakt interpretatie hiervan heel moeilijk. Duidelijk echter is dat waakzaamheid geboden is, want de stijging in bevingen van $M \geq 1.2$ zou een belangrijke voorbode kunnen zijn van weer stijgende seismiciteit (zie ook sectie 9).

5 “Earthquake density” – aardbevingsdichtheid

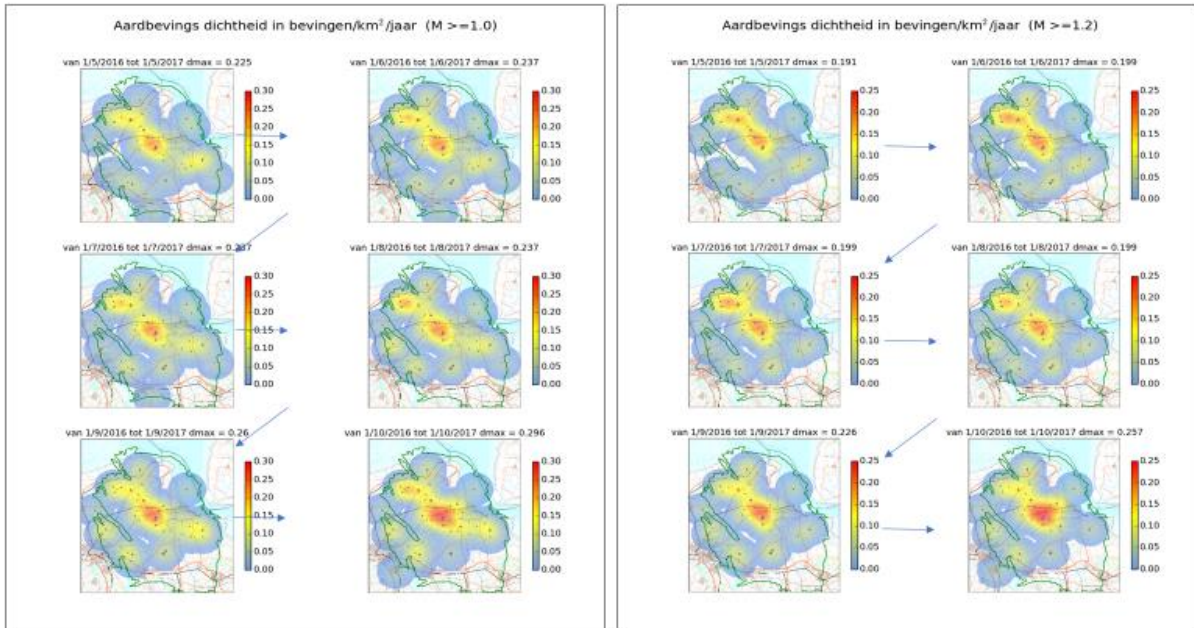
In figuur 4 is een kaart opgenomen met daarop de aardbevingsdichtheid en de epicentra van de in de periode oktober 2016 tot en met eind september 2017 geregistreerde aardbevingen. Op de aardbevingsdichtheidskaart wordt het aantal bevingen per vierkante kilometer getoond. Voor het berekenen van de aardbevings-dichtheid is de Quartic Kernel functie gebruikt (referentie 2) zoals ook afgesproken in het MRP.



Figuur 4. Aardbevingsdichtheid-kaarten voor 2 magnitude-klassen

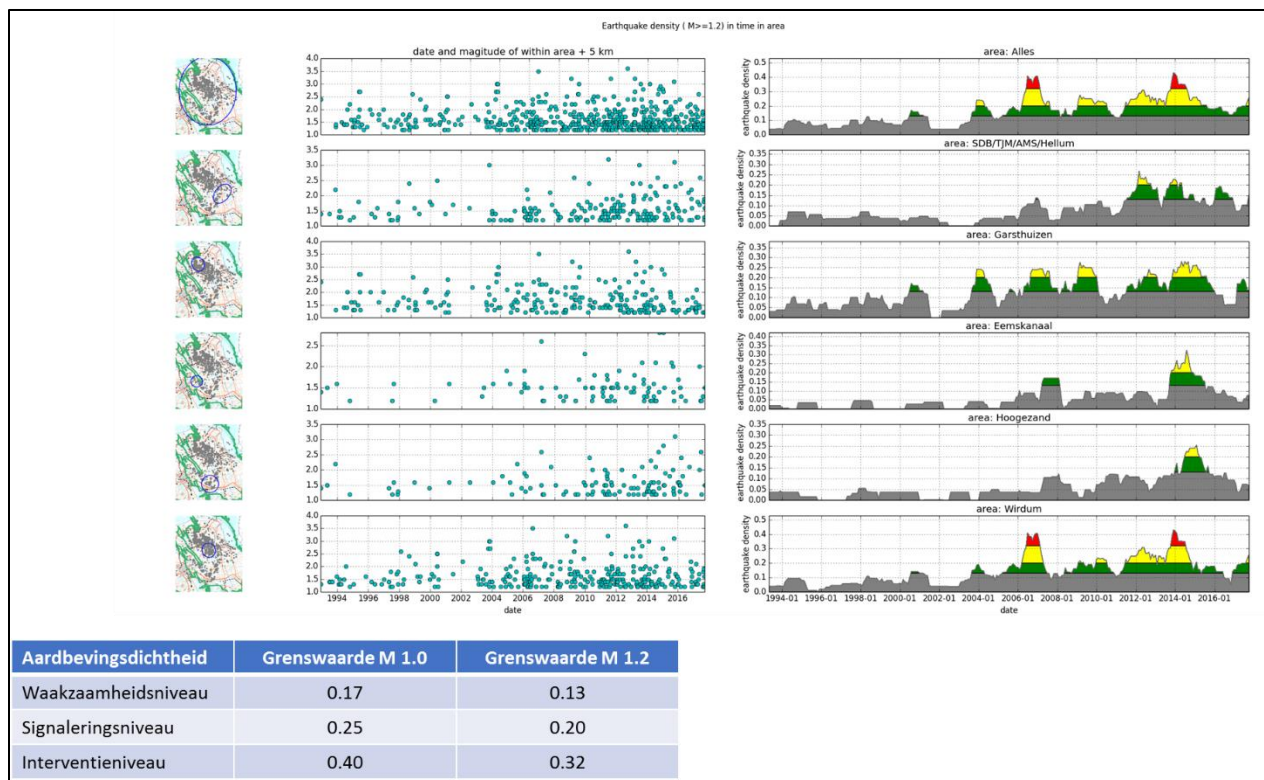
Alle geregistreerde aardbevingen met een magnitude van 1.0 en hoger over de periode 1 oktober 2016 tot 1 oktober 2017 zijn opgenomen (de stippen) en de berekende aardbevingsdichtheid wordt getoond door middel van een kleurenschaal (rood voor de hogere aardbevingsdichtheden). De aardbevingsdichtheid is met een waarde van ongeveer 0.30 aardbevingen per vierkante kilometer per jaar het hoogst in het gebied rondom Wirdum. Met deze waarde is het signalerings-niveau van het MRP overschreden. Hieraan wordt ook aandacht gegeven in de speciale rapportage “Appingedam en Scharmer”, referentie 3, en het Wirdum rapport (referentie 4).

De ontwikkeling van het aardbevingsdichtheid-plaatje over de afgelopen 6 maanden staat weergegeven in figuur 5. Voor beide magnitude-klassen is het patroon vrijwel gelijk en consistent met een monotoon stijgend patroon voor Loppersum en enigszins fluctuerend maar ook stijgend patroon voor het gebied ten noordwesten ervan.



Figuur 5. Ontwikkeling aardbevingsdichtheid over de tijd voor 2 magnitude-klassen

Figuur 6 laat de aardbevingsdichtheid-ontwikkeling over de tijd zien voor $M \geq 1.2$. De equivalente MRP-grenswaarde van 0.30 voor $M \geq 1.0$ is ongeveer 0.26 voor $M \geq 1.2$. De reden om $M \geq 1.2$ als basis te nemen voor dit figuurtje is dat er verder in de tijd teruggekeken kan worden dan met $M \geq 1.0$ (vanwege data-compleetheit-issues vóór 2014). Het laat zien dat de huidige aardbevingsdichtheidswaarde van rond de 0.26 aardbevingen (per vierkante kilometer, per jaar) in het verleden regelmatig bereikt werd (periode rond 2007 en gedurende 2014/2015). Net als in 2014 is er recent een volume ingreep gedaan, in de verwachting dat dit de seismiciteit beheersbaar zal houden.



Figuur 6. Aardbevingsdichtheid - ontwikkeling over de tijd voor $M \geq 1.2$

6 “Peak-ground-acceleration” – maximale grondversnelling

6.1 Definitie en herkomst PGA-data

De signaalparameter voor de door aardbevingen veroorzaakte groundbeweging is de grondversnelling (PGA of Peak Ground Acceleration). De PGA wordt uitgedrukt als fractie van de valversnelling (g), en wordt gemeten in drie richtingen, twee horizontale en een verticale richting. De hoogste door KNMI gemeten waarde in één van de horizontale richtingen wordt gebruikt als signaalparameter, KNMI rapporteert PGA in cm/s^2 . Het MRP hanteert “g” als eenheid (referentie 1).

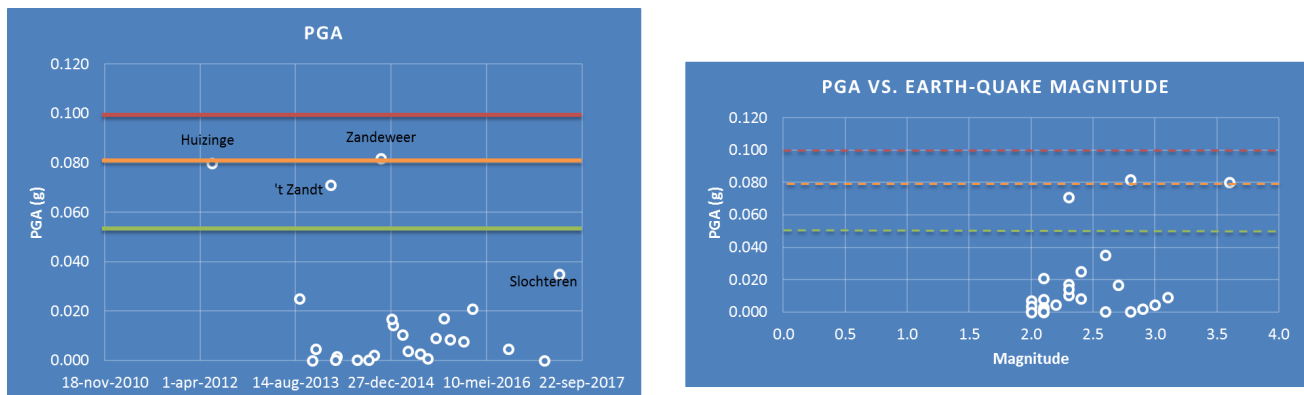
6.2 PGA de afgelopen 12 maanden en historie

In Tabel 4 is een overzicht opgenomen van de gemeten grondversnelling van de alle aardbevingen met een magnitude van 2.0 of meer gemeten in de periode september 2016 tot en met september 2017. De hoogst door het KNMI-meetnetwerk gemeten grondversnelling in deze periode was 0.04 g, gemeten bij de aardbeving bij Slochteren door een KNMI-meetstation op 27 mei 2017. Het meetstation bevond zich op 1.8 kilometer van het epi-centrum. Deze beving is ook verder geanalyseerd in een speciaal rapport (referentie 5).

Beving locatie	Datum	Magnitude	Grondversnelling / PGA (in g)	Afstand tot epicentrum (km)
Slochteren	27 mei - 2017	2.6	0.04	1.8
Scharmer	26 april - 2017	2.0	0.007	7.5
Zeerijp	11 maart - 2017	2.1	0.008	2.0
Wirdum	1 November - 2016	2.2	0.004	2.2
Schildwolde	2 September - 2016	2.1	0.005	2.4

Tabel 4. Grondversnelling horend bij de bevingen van het afgelopen jaar ($M \geq 2$)

Figuur 7 toont de piek-grondversnelling (“PGA”) zoals gemeten sinds 2012 in het linker-paneel. De recente bevingen zijn beneden het “waakzaamheids-niveau” gebleven. Het rechter-paneel laat de relatie zien tussen gemeten PGA en aardbevings-magnitude. Uit dit plaatje kan worden geconcludeerd dat de PGA van de laatste 4 bevingen “geen abnormaal” patroon laten zien.



Figuur 7. Linker panel: Piekgrondversnellingen zoals gemeten sinds 2012. Rechter panel: Relatie gemeten PGA vs. aardbevingsmagnitude.

7 “Peak-ground-velocity”

7.1 Definitie en herkomst PGV-data

De PGV-meetgrootheid is nieuw in het MRP en is daarin opgenomen omdat deze goed toepasbaar lijkt in de context van schade aan gebouwen. PGV staat voor “peak ground velocity”, maximale grondsnelheid, en wordt in het MRP en dit rapport uitgedrukt in mm/s.

Er is in afgelopen jaren tevens een gebouwensensoren netwerk aangelegd bestaande uit meer dan 300 meetpunten; dit meetnetwerk wordt door TNO beheerd. Op deze meetpunten zijn accelerometers geplaatst die de trillingen registreren in of nabij de fundaties van huizen. De meetgegevens worden gepubliceerd op www.nam.nl. Er wordt onderscheid gemaakt tussen meetgegevens van publieke gebouwen en huizen in verband met privacy. De sensoren meten maximumsnelheid (V_{top}) in millimeter per seconde (mm/s).

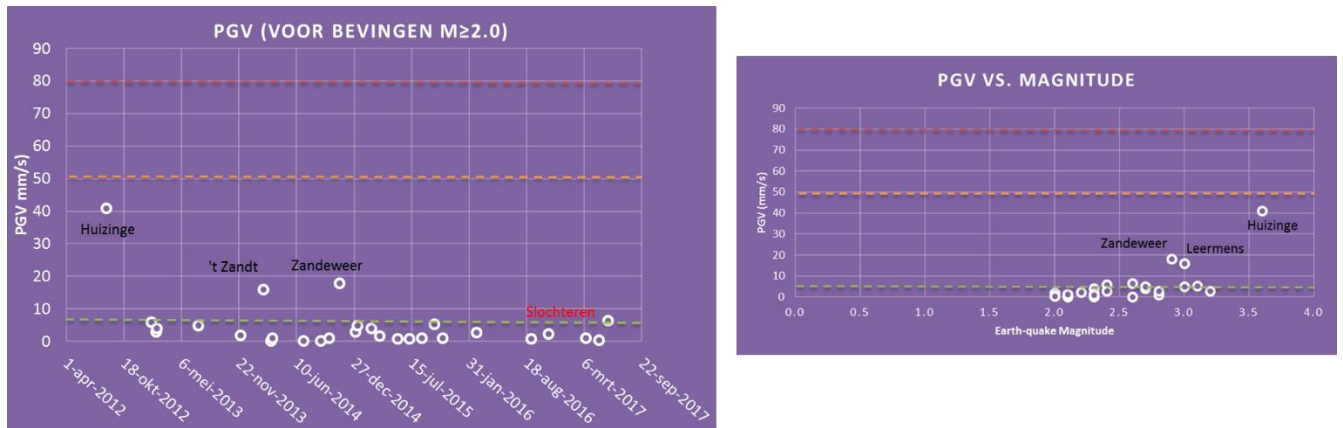
7.2 PGV de afgelopen 12 maanden en historie

De maximale gemeten gebouwsensoruitslag lag op 6.4 mm/s, geassocieerd met de beving (M2.6) van 27 mei bij Slochteren. Dit was ruim de hoogst gemeten PGV het afgelopen jaar (zie tabel 5). Deze PGV is uitvoerig bediscussieerd in referentie 5.

Beving locatie	Datum	Magnitude	Grondsnelheid / PGV (in mm/s)
Slochteren	27 mei - 2017	2.6	6.4
Scharmer	26 april - 2017	2.0	0.4
Zeerijp	11 maart - 2017	2.1	1.2
Wirdum	1 November - 2016	2.2	2.3
Schildwolde	2 September - 2016	2.1	0.8

Tabel 5. Maximale grondsnelheid horend bij de aardbevingen van het afgelopen jaar.

Figuur 8 toont de piek-grondsnelheid ("PGV") zoals berekend uit data sinds 2012 in het linker-paneel. De recente beving in Slochteren (mei 2017) is net boven het "waakzaamheids-niveau" uitgekomen. Het rechter-paneel laat de relatie zien tussen gemeten PGV en aardbevings-magnitude. Uit dit plaatje kan worden geconcludeerd dat de PGV van de laatste 4 bevingen geen abnormaal patroon laten zien.



Figuur 8. Linker panel: Piekgrondsnelheid vanaf 2012. Rechter panel: PGV vs. aardbevings-magnitude.

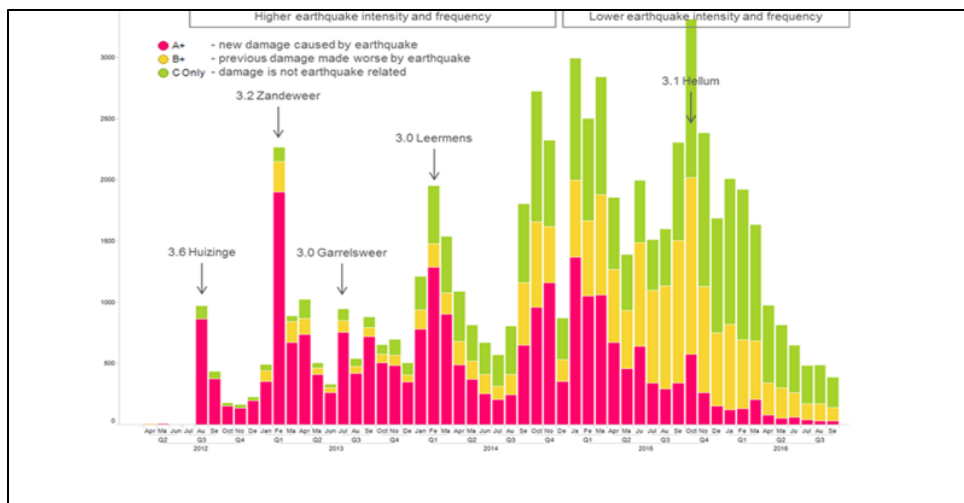
8 “Damage-state”/ gebouwbeweging/ schade-ontwikkeling

8.1 Achtergrond bij “Damage-State”

Een andere nieuwe monitorings-parameter is “Damage-state”. De gedachte achter deze parameter is dat gemonitord dient te worden om te bekijken of er zich geen schade-ontwikkelingen voor doen die ernstiger zijn dan wat er verwacht wordt bij aardbevingen met een bepaalde magnitude (PGV). Dat betekent bijvoorbeeld dat als er in plaats van “cosmetische” schade er ook (veel) constructieve schade opgetreden is, er in principe een maatregel voorbereid wordt. Op het laagste level van deze meet-grootte, het waakzaamheids-niveau, wordt gekeken of er onverwacht veel DS1 meldingen zijn.

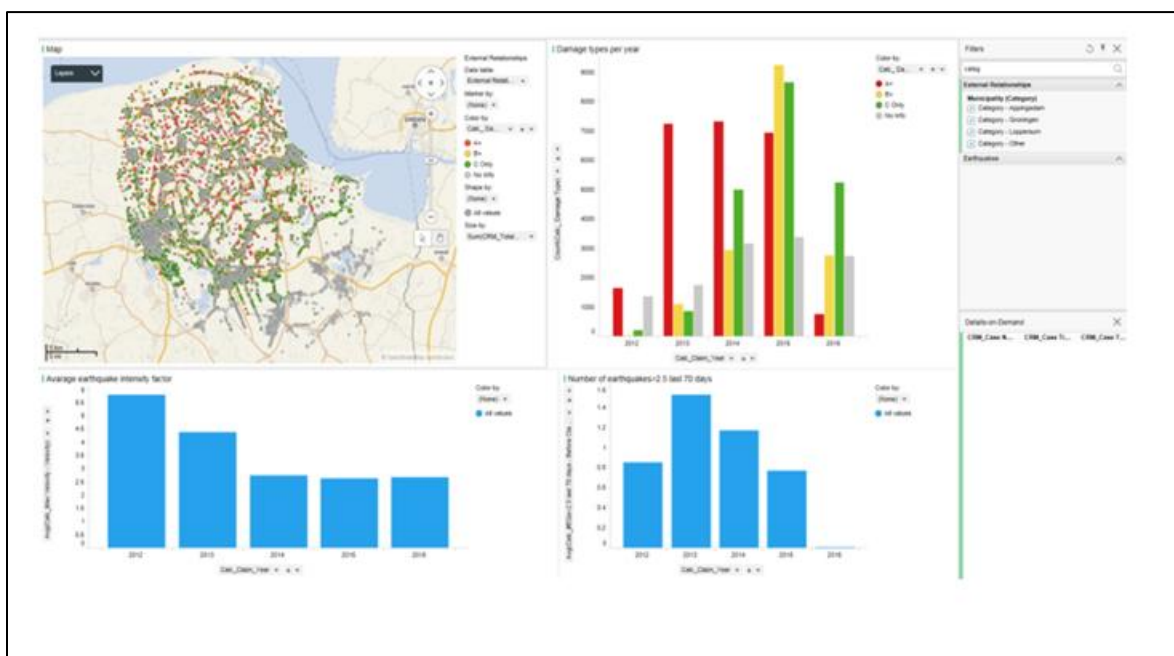
8.2 Ontwikkeling schade over de laatste 5 jaar

De ontwikkeling van schade over de laatste 5 jaar staat weergegeven in figuur 9. Het aantal schades beoordeeld als “A-schade” (rode kleur) is vrij gestaag afgenomen sinds januari 2015. Deze daling is waarschijnlijk veroorzaakt door meerdere factoren, maar loopt ook synchroon met de daling van het aantal bevingen van $M \geq 2.5$ (zie ook figuur 10).



Figuur 9. Schade-ontwikkeling over de laatste 5 jaar.

Het paneel linksboven in figuur 10 geeft de A, B en C-schades weer op de kaart. A-schades lijken over het hele gebied voor te komen, maar zijn iets sterker geconcentreerd in het gebied rond Loppersum, wat correleert met een wat hogere bevings-intensiteit in het gebied. Het rechterpaneel laat opnieuw zien dat schades in alle categorieën (A, B, C) zijn afgenomen sinds 2015. De panelen linksonder en rechtsonder laten de afname zien van “aardbevings-intensiteit” en de afname van het aantal bevingen met een magnitude van $M \geq 2.5$.



Figuur 10. A, B en schades op kaart en grafiek. Ook uitgezet aantal bevingen laatste 5 jaar.

9 Andere patronen

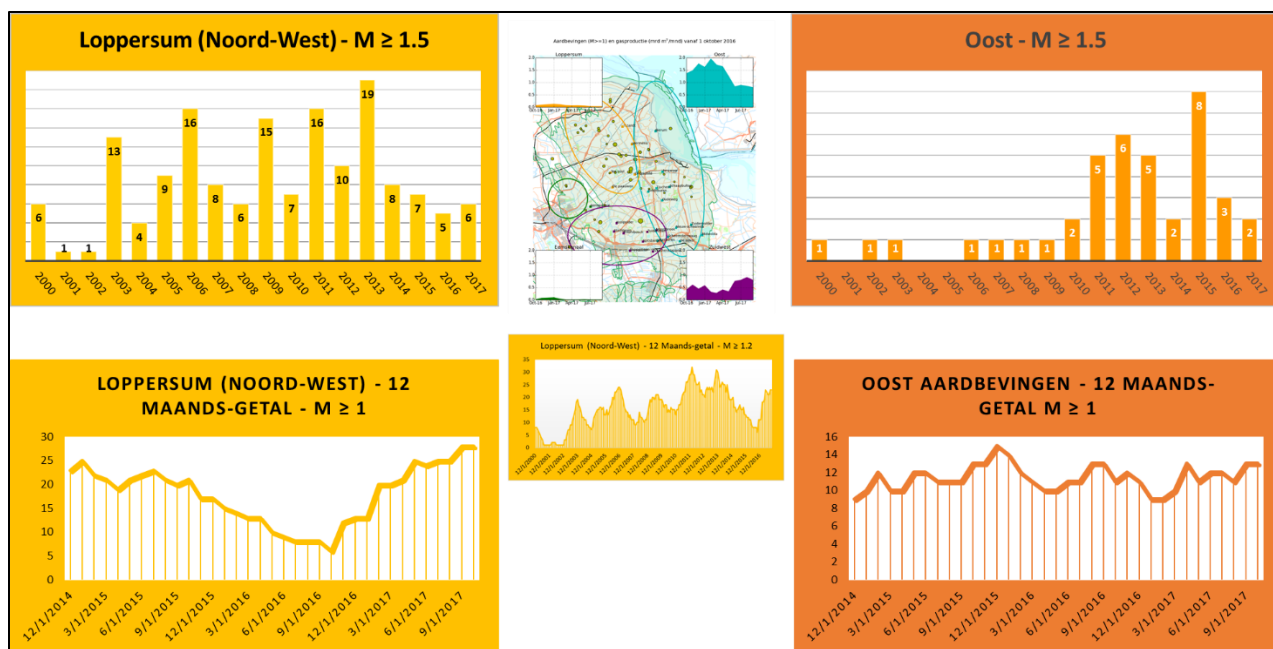
Een belangrijk ander element van het nieuwe MRP is het volgen van trends en patronen in de volgende type data:

1. Regionale verschillen
2. Veranderingen in verhoudingen kleine/grote bevingen (b-factor Gutenberg-Richter)
3. Hypo-centra (sterke oplijning van hypo-centra met breuken of breukzones)
4. Anomale PGA/PGV bij een bepaalde aardbevings-magnitude

De laatste (PGA en PGV) zijn reeds besproken in secties 6 en 7 (figuren 7 en 8), en er is daar geconcludeerd dat er geen anomale PGV of PGA is waargenomen. De andere drie worden hieronder besproken.

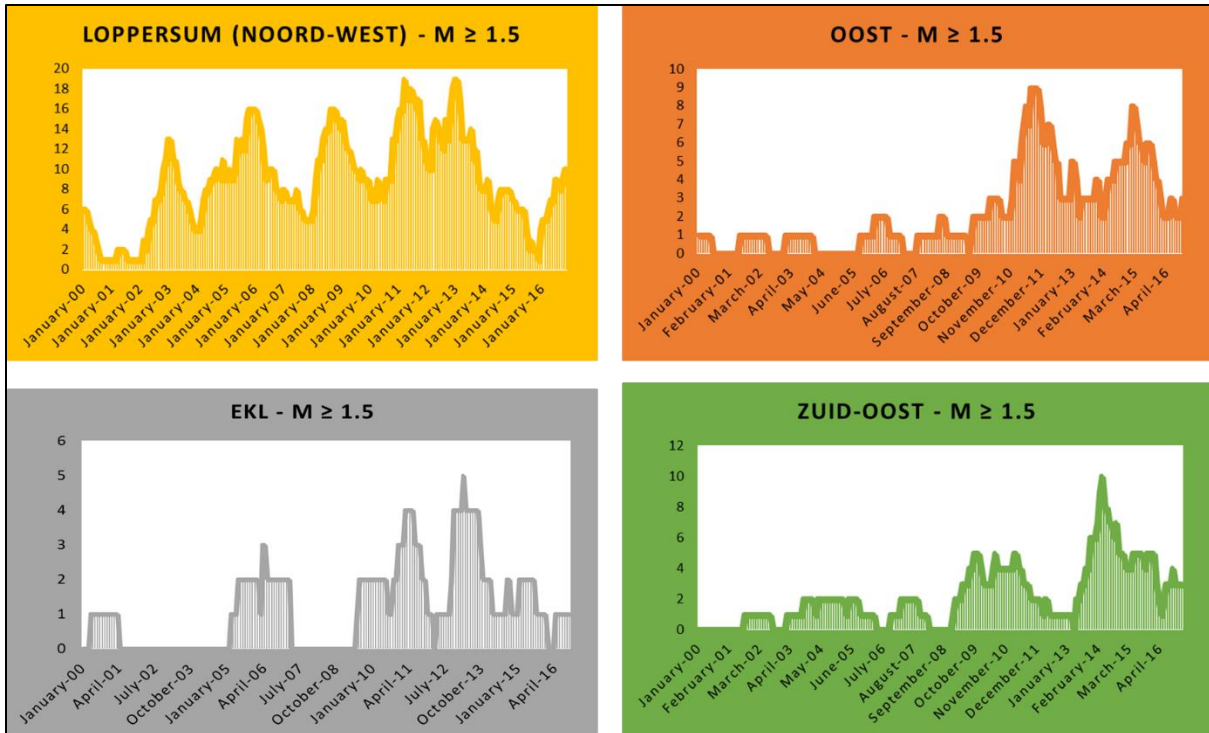
9.1 Ontwikkeling per regio

Figuur 11a laat de seismische ontwikkeling zien van twee regio's in het Groningen veld. De beschouwde gebieden zijn "Oost" en "Noordwest" (gebied rond Loppersum). Gebieds-begrenzingslijnen staan in het centrale figuurtje aangeduid maar ook vergroot in figuur 16. De bovenste panelen laten de ontwikkeling zien aardbevingen met een magnitude $M \geq 1.5$ voor het gebied rond Loppersum (links, geel) en "Oost" (rechts, oranje). Voor Loppersum, op dit magnitude level ($M \geq 1.5$) is vooral het verschil tussen 2013 en 2014 opvallend maar is een recente stijging van bevingen in het gebied nog niet duidelijk. Anders wordt dit wanneer bevingen met $M \geq 1$ beschouwd worden, uitgedrukt in een 12-maandsgetal. Onderste panelen: Het gebied rond Loppersum (gele kleuren) laat in 2017 een stijging zien van het aantal aardbevingen groter dan en gelijk aan 1 (maand-getallen) ten opzichte van 2016. Ook uitgedrukt in maand getallen laat het gebied "Oost" (rechterpaneel, oranje kleur) een min of meer stabiel aantal aardbevingen zien, eigenlijk sinds 2014. De trend in (kleine) bevingen rond Loppersum wordt in sectie 11 verder beschouwd.



Figuur 11a. Vergelijking seismische ontwikkeling "Noordwest" en "Oost".

Figuur 11b laat de voortschrijdende maand-getallen zien voor bevingen groter of gelijk aan 1.5 voor de 4 regio's waarin het veld opgedeeld is. Regio Noord-West (gebied rond Loppersum) laat een praktisch monotoon stijgende lijn zien sinds oktober 2016. De andere regio's laten in diezelfde periode (het laatste jaar) geen noemenswaardig patroon zien. Voor deze drie regio's geldt ook dat de seismiteit op een lager niveau ligt ten opzichte van een aantal jaar geleden. In termen van maandgetallen zit regio Noord-West zo ongeveer op het gemiddelde seismisch niveau van de laatste 15 jaar. Opvallend is ook dat de regio's Oost en Zuid-oost aanvankelijk een stijging lieten vanaf 2013 tot ongeveer begin 2015 maar dat beide regio's sindsdien weer op lager niveau zitten.



Figuur11b. Maandgetallen voor 4 de regio's, $M \geq 1.5$.

9.2 Verhouding grote en kleine bevingen

Ook de verhouding grote en kleine bevingen is beschouwd (voor $M \geq 1.5$). Tabellen 6a en 6b laten de b-waarden (verhouding kleine-grote aardbevingen) zien voor het hele veld en "Noordwest" (het gebied rond Loppersum). De b-waarden voor het hele veld liggen wat lager voor de periode vanaf 2013 dan in de periode ervoor. De b-waarden voor Loppersum liggen wat hoger voor de periode vanaf 2013 dan de periode ervoor, maar de schatting van de b-waarde voor Loppersum is wel wat onzeker omdat deze op slechts 26 bevingen berust.

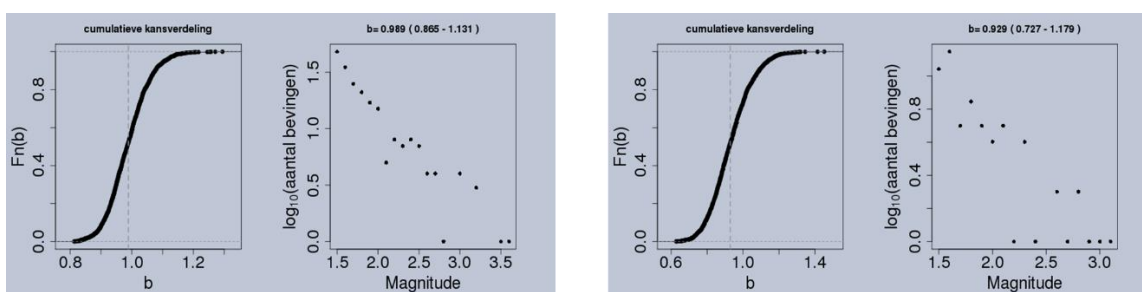
Perctiel van betrouwbaarheidsinterval	2000 – 2013	2014 – 2017
P _{2.5%}	0.87	0.73
P _{50%}	0.99	0.93
P _{97.5%}	1.13	1.18

Perctiel van betrouwbaarheidsinterval	2000 – 2013	2014 – 2017
P _{2.5%}	0.73	0.63
P _{50%}	0.86	0.93
P _{97.5%}	1.00	1.41

Tabellen 6a en 6b. B-waarden voor hele veld (bovenste tabel) en Noordwest/“Loppersum regio” (onderste tabel).

Voor beide gebieden is er onvoldoende statistisch bewijs om aan te nemen dat de b-factor significant lager is in de periode na 2013 (een hogere b-factor betekent dat er minder grote aardbevingen per hoeveelheid kleine bevingen voorkomen). Met andere woorden, er kan niet geconcludeerd worden dat het “gebrek” aan grote bevingen de laatste tijd in het gebied rond Loppersum, terwijl er wel vrij veel kleinere bevingen waren, er significant op wijst dat er ook structureel minder grote bevingen verwacht worden.

De volgende twee figuren laten voor respectievelijk het hele veld en voor het gebied rond Loppersum de verhouding kleine en grote bevingen in een grafiekje zien.

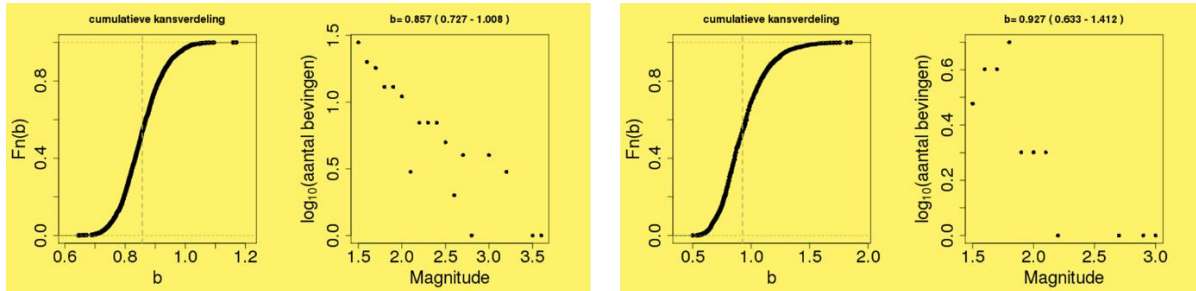


Figuur 12. Gutenberg Richter plots voor het hele Groningen veld. Linker paneel : Periode januari 2000-december 2013. Rechter paneel: periode januari 2014 tot oktober 2017

Figuur 12 geeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor het veld weer. Het linker paneel laat de verhouding kleine en grote bevingen zien voor de periode tot eind 2013. Het rechterpaneel voor de periode van januari 2014 tot nu. De periode tot December 2013 laat een hogere b-waarde zien dan de periode na 2013.

Figuur 13 geeft twee zogenaamde Gutenberg-Richter plots voor de regio “Noordwest” weer. Het linker paneel laat de verhouding kleine en grote bevingen zien voor de periode tot eind 2013. Het

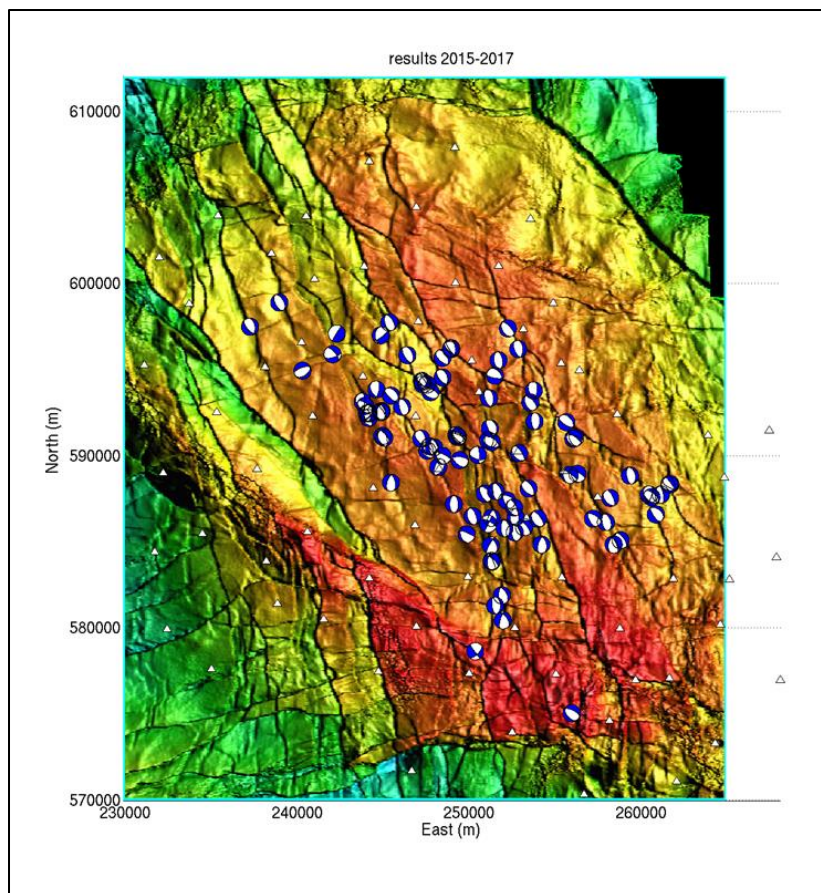
rechterpaneel voor de periode van januari 2014 tot nu. De recente periode na december 2013 laat een hogere b-waarde (minder grote bevingen per hoeveelheid kleine bevingen) zien dan de periode na 2013. Maar de onzekerheids-band rond deze b-waarde na 2013 is groot door het relatief gering aantal bevingen.



Figuur 13. Gutenberg Richter plots voor de regio Noordwest (Loppersum gebied). Linker panel : Periode januari 2000-december 2013. Rechter panel: periode januari 2014 tot oktober 2017

9.3 Hypo-centra aardbevingen – “Full wave form relocation”

De techniek om hypocentra (de plaatsbepaling van de beving in de ondergrond) is de laatste tijd ook sterk verbeterd. Door gebruik te maken zogenaamde “full wave form inversion” (referentie 6) is het gelukt om verbeterde posities te bepalen van 99 bevingen uit het verleden die waargenomen zijn door het ondiepe ondergrond netwerk van het KNMI.



Figuur 14. Herziene aardbevings-posities in de ondergrond na toepassing "full wave form inversion"

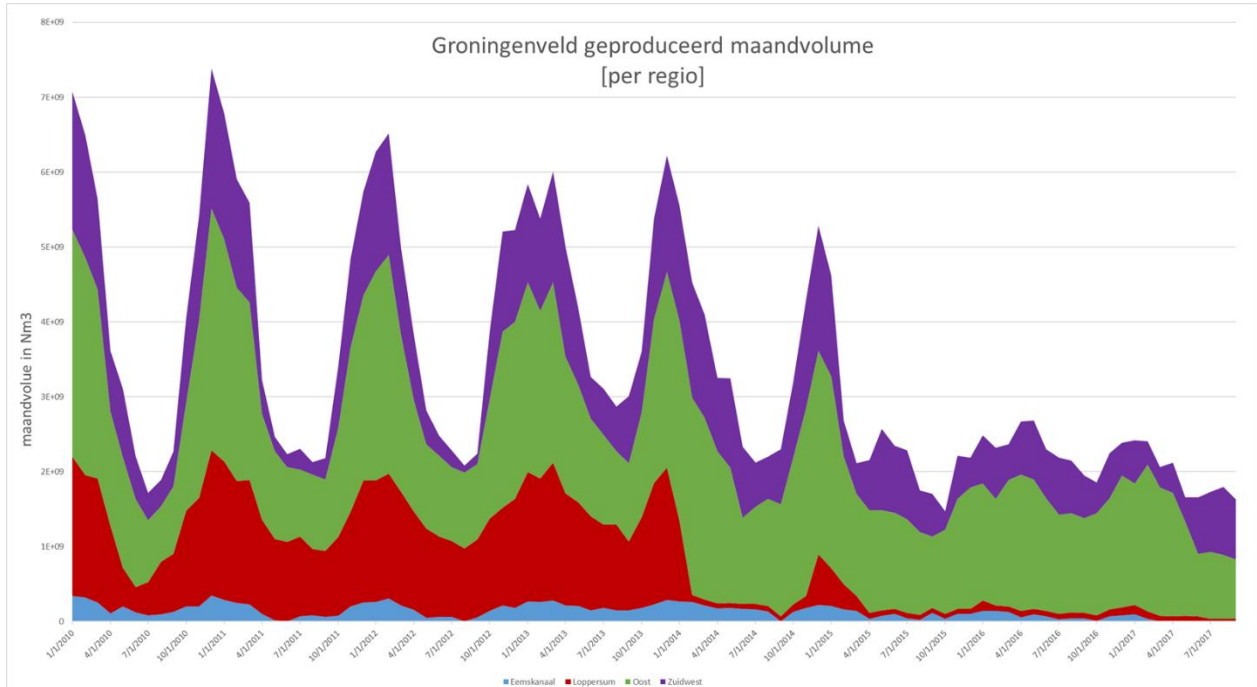
Het resultaat is een aardbevingen-patroon dat nu meer oplijnt met uit productie-seismiek gekarteerde breuken (voornamelijk Noordwestelijk georiënteerd). Ook de breuk-beweging, voornamelijk afschuiving, kon eruit afgeleid worden. Dit biedt mogelijk nieuwe aanknopingspunten voor verder onderzoek dat zich richt op stress-ontwikkeling rond specifieke breuken als functie van productie, reservoir druk en compactie. Dat zou uiteindelijk op termijn ook kunnen leiden tot specifieke "production-policies", dat wil zeggen specifieke inzet van productie-clusters rond deze breuken.

10 Productie en reservoir-druk ontwikkeling

10.1 Productie

Figuur 15 toont de productie per regio (zoals gedefinieerd in het Winningsplan, referentie 7). De totale hoeveelheid gewonnen gas is sterk afgenomen na 2013, de hoeveelheid productie gewonnen uit het

gebied rond Loppersum is geminimaliseerd (wordt alleen nog opgeregeld wanneer Gasunie Transport Services deze afroept). De totale productie is nog verder afgenomen in 2017 ten opzichte van 2016. Ook de productie uit Eemskanaal is gering, het leeuwendeel van de productie komt uit de regio's Oost en Zuidwest.



Figuur 15. Productie per regio.

Het Groningen-veld kende sterke seizoens-fluctuaties tot 2016. Deze seizoens-fluctuaties komt voort uit de rol van het Groningen veld als energieleverancier aan huishoudens op momenten van hoge markt vraag in de winter. Deze seizoens-fluctuaties zijn mee geschaald naar beneden met het productievolume maar zijn tevens percentageel beperkt omdat het vermoeden bestaat dat deze fluctuaties een (extra) bron kunnen zijn van seismiciteit (referentie 8).

Figuur 16 laat het regionale beeld zien van productie en locatie van aardbevingen. Productie uit Loppersum en Eemskanaal is zeer gering ten opzichte van productie uit “Oost” en “Zuidwest” maar het aantal aardbevingen in het Loppersum gebied is zelfs wat hoger dan in die beide regio's. In sectie 11 wordt de Loppersum aardbevings-trend nader bekeken.

Aardbevingen ($M \geq 1$) en gasproductie ($\text{mrd m}^3/\text{mnd}$) vanaf 1 oktober 2016

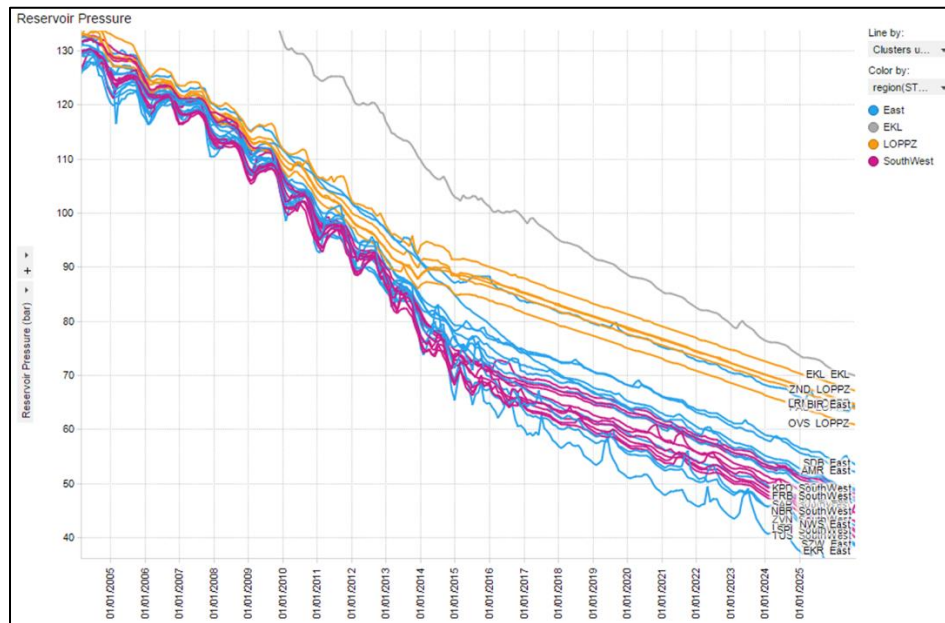


Figuur 16. Productie per regio en locatie van aardbevingen.

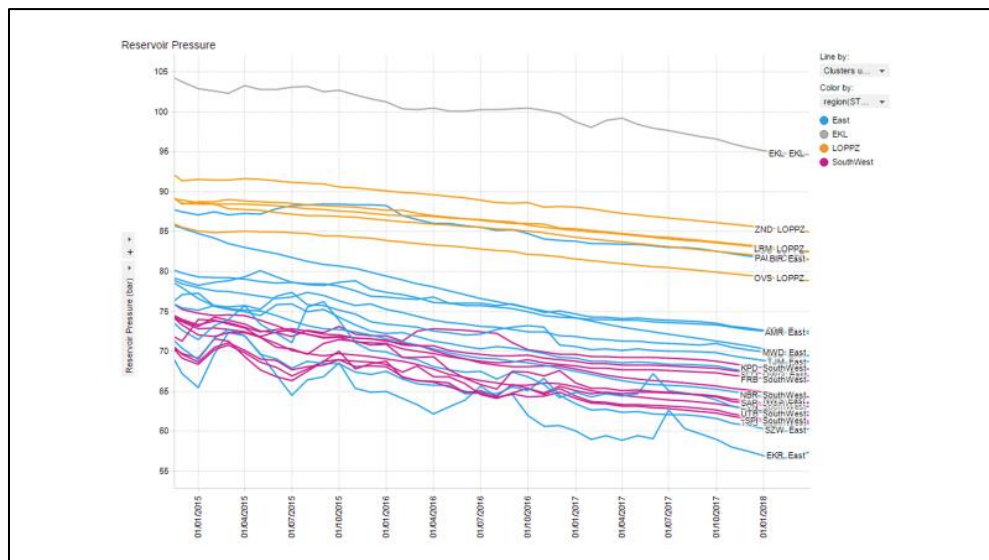
10.2 Ontwikkeling van de reservoir-druk

De figuren 17 en 18 laten gemodelleerde reservoir-druk zien voor alle clusters (“super-wells”) in het Groningen systeem. Figuur 17 laat het drukverloop van het reservoir zien voor alle Groningen clusters van 2005 tot 2025 (voorspelde drukken). De reservoir druk neemt gemiddeld minder af per jaar sinds 2014 (minder productie) maar laat sterkere regionale verschillen zien als gevolg van de gevoerde

“production-policy” waarbij het zwaartepunt van productie op de regio’s “Oost” en “Zuid”. Als gevolg daarvan zijn de reservoir-drukken in het zuidelijk (clusters als TUS en ZVN) en oostelijk deel (AMS) van het veld, zo’n 20 en 10 bar lager dan in het Loppersum gebied (LOPPZ). Dit drukverschil zal onder continuering van de huidige “production-policy” ongeveer hetzelfde blijven. Deze gemodelleerde drukontwikkeling is ook een input voor de aardbevings-voorspellingen verderop in dit rapport (sectie 11). Figuur 18 geeft een vergroting van figuur 17 voor de jaren 2015-2018.



Figuur 17. Reservoir druk voor alle Groningen clusters.



Figuur 18. Vergrote weergave van figuur 17 voor de laatste paar jaar.

11 Statistische -en modellerings- context van de seismische ontwikkelingen

In bovenstaande secties (sectie 4 en sectie 9) is vastgesteld dat met name bevingen met een magnitude van 1 of hoger een structureel opwaartse trend laten zien sinds eind vorig jaar. In deze sectie wordt geprobeerd de significantie daarvan te schetsen en een voorspeling te doen of deze opwaartse trend zich onverminderd door zal zetten.

11.1 Event rate testen

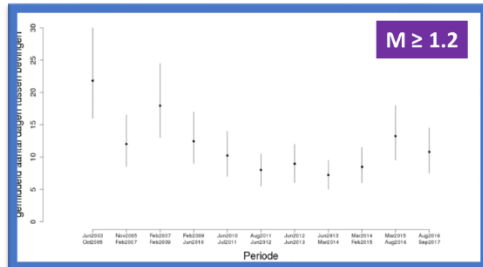
De eerste vraag die aan bod komt is of de “event rate” van de vorige periode significant verschilt van die van deze periode. Met andere woorden, zat er minder tijd tussen bevingen in de periode van oktober 2016 tot en met september 2017 dan in het jaar daarvoor? In deze sectie worden twee keer twee testen opgevoerd om dit verder te onderzoeken. Twee typen testen (Clopper-Pearson en Poisson rate) worden getoetst op 2 datasets (hele veld en regio rond Loppersum). De Clopper-Pearson test staat uitgelegd in referentie 10 en vormt een standaard test in commerciële, statistische pakketten zoals bijvoorbeeld Minitab.

11.1.1 Event rate testen “hele veld”

Tabel 7a laat de tijd zien die tussen bevingen zat voor een tweetal perioden, waarbij er gekeken is naar het hele veld. Tabel 7a geeft een vergelijking tussen de 2 perioden waarbij het aantal aardbevingen vastgezet is op 45 en vervolgens gekeken is hoeveel dagen er nodig waren om die 45 aardbevingen ($M \geq 1$) te bereiken.

Periode		Magnitude	Aantal bevingen	Tijd die verstreek om dit aantal te bereiken (dagen)	λ (gemiddelde tijd tussen bevingen)	σ (standard-deviatie)
Van	Tot					
Nov-16	Okt-17	$M \geq 1.0$	45	327	7.3	6.9
Aug-15	Nov-16	$M \geq 1.0$	45	460	10.2	9.7

Tabel 7a



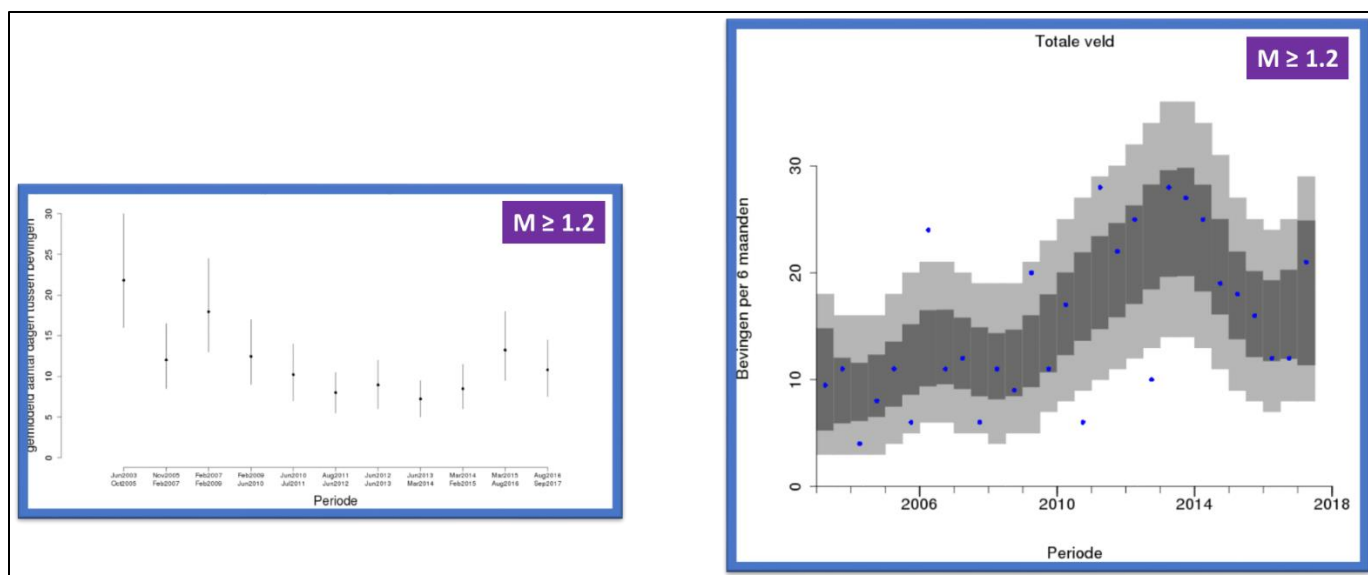
Betrouwbaarheids-interval	$M \geq 1.0$ (N=45)	$M \geq 1.2$ (N=38)
90%	Niet significant	Niet significant
80%	Significant	Niet significant
60%	Significant	Significant

Tabel 7b

Tabellen 7a en 7b. Event rate testen Groningen veld. Tabel 7a geeft de gemiddelde tijd tussen bevingen. Tabel 7b vat de resultaten van de test samen.

Ook is weergegeven hoeveel dagen er gemiddeld zaten tussen 2 bevingen. Tabel 7b geeft de resultaten van deze statistische test weer. Voor bevingen met een magnitude van 1.0 of hoger is er een significant verschil als een betrouwbaarheid van 80% wordt aangenomen. Voor bevingen met een magnitude van 1.5 of hoger, zijn de verschillen niet significant, zelfs niet voor een 50% betrouwbaarheids-level (iets wat op grond van figuur 3 al vermoed werd). Het figuurtje linksonder geeft de variatie van de gemiddelde tijd tussen bevingen over een langere periode weer ($M \geq 1.2$) De langste tijd tussen aardbevingen werd waargenomen rond 2001, de kortste tijd rond 2011.

Door het karakter van de test, die alleen vrij recente patronen meeneemt, zal in de regel voor het geval van het Groningen veld sneller geconcludeerd worden dat een verandering significant is (doordat natuurlijke variaties uit een verder verleden niet meegenomen worden). Een consequentie daarvan is dat als deze test niet significant is, het onwaarschijnlijk is dat een “formelere, strengere” test die de hele periode wel meeneemt wel significant is (zie discussie hieronder).



Figuur 19. Waargenomen en voorspeld aantal aardbevingen ($M \geq 1.2$). Het rechterpaneel gebruikt 6 maanden als basis periode.

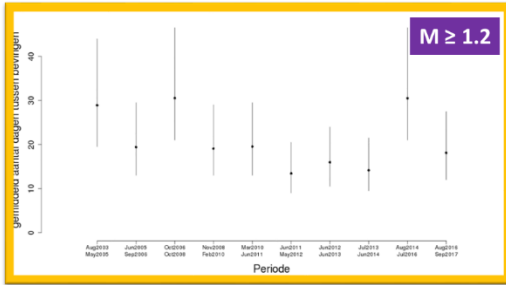
Figuur 19 geeft het waargenomen en voorspeld aantal aardbevingen per jaar ($M \geq 1.2$). Het linker-paneel laat nogmaals de ontwikkeling zien van de gemiddelde tijd tussen bevingen. Het rechterpaneel geeft resultaten van een voorspelling gebruik maakt van een niet-stationair Poisson model (Referentie 9). In tegenstelling tot de vorige statistische test ("Clopper-Pearson", figuur 18) wordt bij deze test er wel rekening gehouden met de volledige geschiedenis. Zoals al verwacht op grond van de vorige (Clopper-Pearson) test op aardbevingen met een magnitude van 1.2 en groter zou ook op grond van deze test zou geconcludeerd worden dat de toename van het aantal bevingen voor het hele veld past binnen de onzekerheidsmarge jaar ($M \geq 1.2$).

11.1.2 Event rate testen "Loppersum gebied"

Dezelfde testen als in de vorige paragraaf zijn uitgevoerd op het gebied rond Loppersum ("Noordwest").

Periode		Magnitude	Aantal bevingen	Tijd die verstreek om dit aantal te bereiken (dagen)	λ (gemiddelde tijd tussen bevingen)	σ (standard-deviatie)
Van	Tot					
Nov-16	Okt-17	$M \geq 1.0$	25	336	13	13
Jan-15	Nov-16	$M \geq 1.0$	25	680	27	24

Tabel 8a



Betrouwbaarheids-interval	$M \geq 1.0$ (N=25)	$M \geq 1.2$ (N=20)
98%	Niet significant	Niet significant
95%	Significant	Niet significant
90%	Significant	Significant

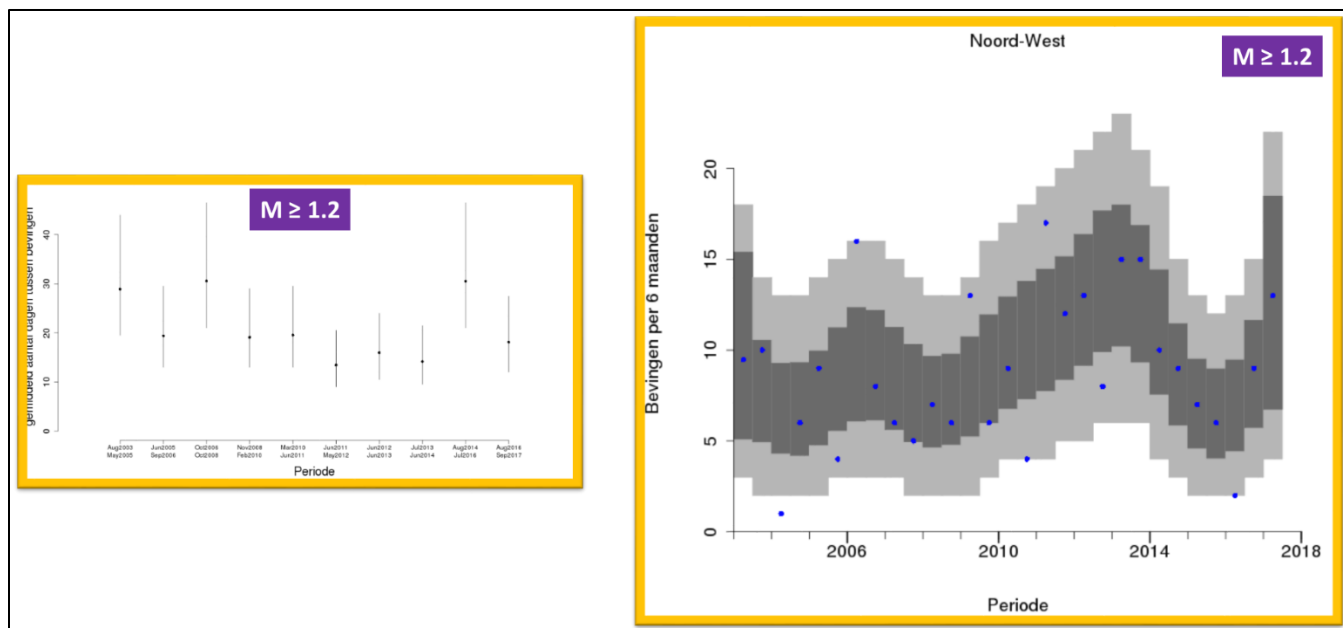
Tabel 8b

Tabellen 8a en 8b. Event rate testen Loppersum gebied (Noordwest"). Tabel 8a geeft de gemiddelde tijd tussen bevingen. Tabel 8b vat de resultaten van de test samen.

Tabellen 8a en 8b laten de resultaten zien van de Clopper-Pearson test voor het gebied rond Loppersum, uitgevoerd op verschillen in gemiddelde tijd verstreken tussen aardbevingen, tussen twee perioden. Het figuurtje linksonder geeft de variatie van deze grootte over een langere periode weer ($M \geq 1.2$). De langste tijd tussen aardbevingen werd waargenomen rond 2004, 2007, 2015; De kortste tijd rond 2012.

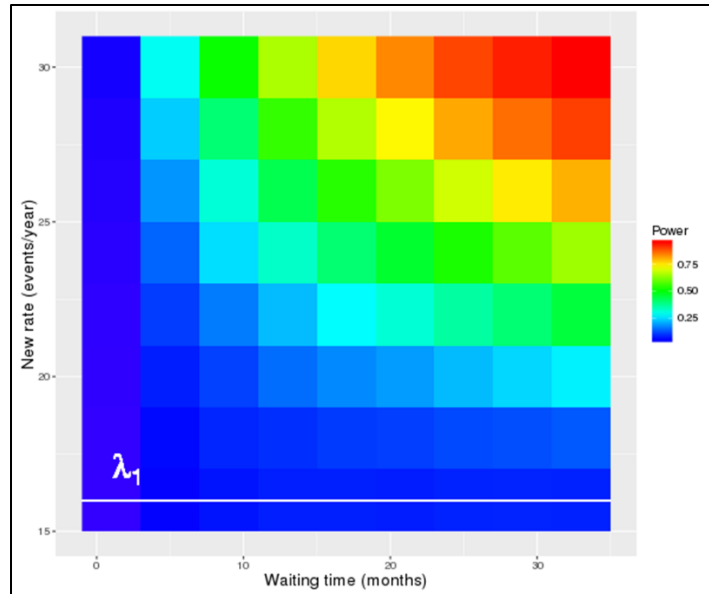
Tabel 8a laat de tijd zien die tussen bevingen zat voor een tweetal perioden. Tabel 8a geeft een vergelijking tussen de 2 perioden waarbij het aantal aardbevingen vastgezet is op 25 en vervolgens gekeken is hoeveel dagen er nodig waren om die 25 aardbevingen ($M \geq 1$) te bereiken. De vraag die vervolgens statistisch getoetst is, is of er significant meer tijd tussen bevingen zat in periode 1 in vergelijking met periode 2.

Voor Loppersum en omstreken ("Noordwest") geldt dat met 95% zekerheid gesteld kan worden dat de seismiciteit van het afgelopen jaar verschilt van die van de periode ervoor ($M \geq 1.0$). Voor bevingen vanaf een magnitude 1.2 geldt dat deze significant is met een betrouwbaarheid van 90%. Voor bevingen vanaf magnitude 1.5 is er geen significant verschil.



Figuur 20. Waargenomen en voorspeld aantal bevingen (per 6 maanden) voor het gebied rond Loppersum ($M \geq 1.2$)

Figuur 20 geeft vervolgens waargenomen en voorspeld aantal aardbevingen per jaar ($M \geq 1.2$) voor het gebied rond Loppersum voor een langere tijdsperiode. Het linker-paneel laat nogmaals de ontwikkeling zien van de gemiddelde tijd tussen bevingen. Het rechterpaneel geeft resultaten van een voorspelling gebruik maakt van een niet-stationair Poisson model (Referentie 9). In tegenstelling tot de vorige statistische test ("Clopper-Pearson", figuur 18) wordt er bij deze test wel rekening gehouden met de volledige geschiedenis. Op grond van deze test zou geconcludeerd worden dat de toename van het aantal bevingen voor het hele veld past binnen de onzekerheidsmarge, ook voor $M \geq 1.2$.

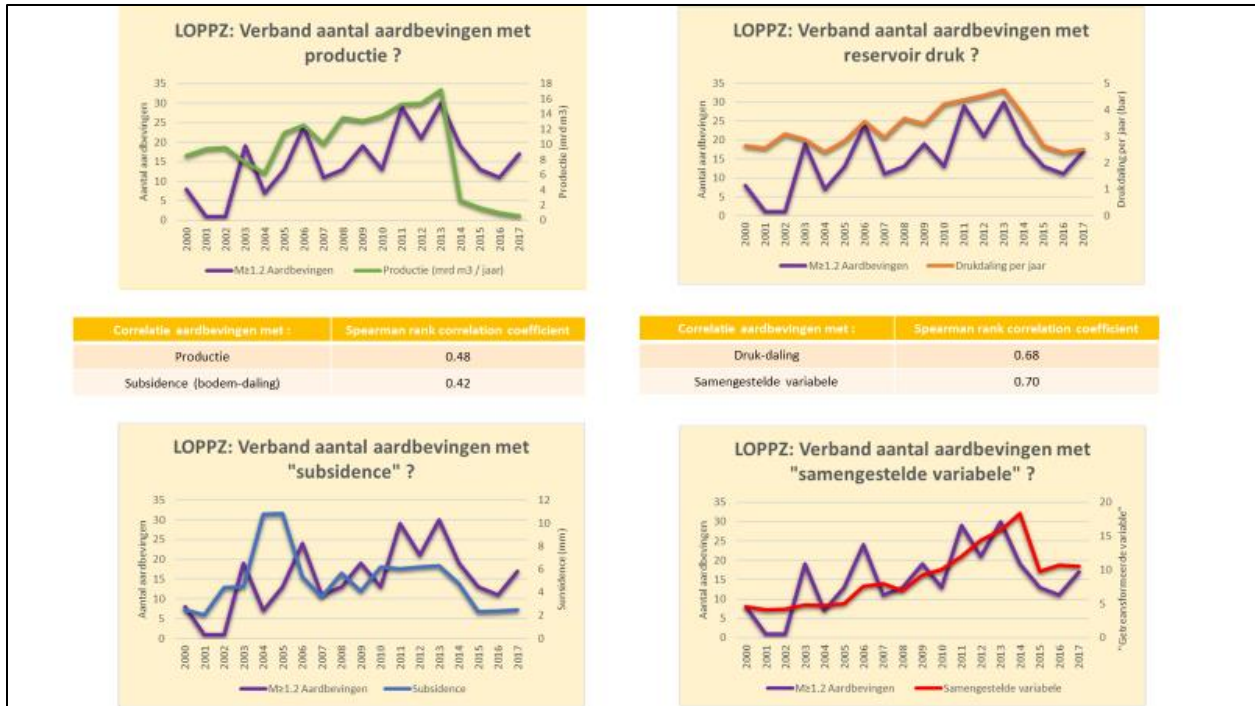


Figuur 21. "Power-test".

Figuur 21 tenslotte geeft met een "Power-Test" (test voor onderscheidend vermogen) weer hoeveel bevingen er nodig zijn om te concluderen dat deze periode (met 16 bevingen per jaar) significant verschilt van de vorige periode. Hier weergegeven op basis van $M \geq 1.5$, en op basis van de eerdergenoemde Pearson-Clopper test. Om heel zeker te zijn van een significant verschil moet je in het rode of oranje domein zitten (kan uiteraard door óf veel meer bevingen óf een lange tijd met iets meer bevingen). Deze test kan mogelijk een rol spelen bij toekomstige beslissingen, in het bijzonder wanneer een niet MRP-grootheid beschouwd wordt.

11.2 Verbanden seismiciteit met productie, druk en bodemdaling

Na in elk geval met één test een significant verschil aangetoond te hebben voor Loppersum (zie sectie 11.1.2), lijkt voor de hand te liggen om te proberen een verband te leggen tussen toegenomen seismiciteit ($M \geq 1.2$) en productie, reservoir druk en bodemdaling. Figuur 22 laat deze verbanden zien. Eerder in dit document is opgemerkt dat de recente seismiciteit ontwikkeling rond Loppersum geen verband lijkt te houden met productie van de Loppersum clusters. De seismiciteit stijgt terwijl productie gelijk blijft of zelfs iets zakt. Er is in elk geval geen sprake van verhoogde productie uit de clusters rond Loppersum, en de clusters zijn ook niet anders geproduceerd dan in het recente verleden.



Figuur 22. Verbanden tussen seismiciteit, productie, druk, bodemdaling en een samengestelde variabele voor de Loppersum regio ("Noordwest").

Het ligt dus voor de hand om ook andere verbanden proberen te leggen dan met productie. Drie andere verbanden zijn geprobeerd, met reservoir druk, met bodemdaling ("subsidence") en met een samengestelde variabele die zowel rekening houdt met historische bodemdaling als met recente. Deze variabele is eerder geïntroduceerd in referentie 11:

$$\lambda(x, t) = \beta_0 \frac{dc}{dt} (1 + \beta_1) e^{\beta_1 c}$$

Waarbij:

λ = event rate

β_0, β_1 = constanten (bepaald uit data-fit)

c = cumulatieve compactie, dc/dt = compactie-snelheid

De tabellen tussen de figuren laten de resultaten van een non-parametrische correlatie test zien, de "Spearman-rank-correlation coefficient", de non-parametrische tegenhanger van de "normale", parametrische, lineaire correlatie coëfficiënt. Druk-daling en de relatie met de samengestelde variabele lijken een beter verband te laten zien dan productie en recente bodemdaling.

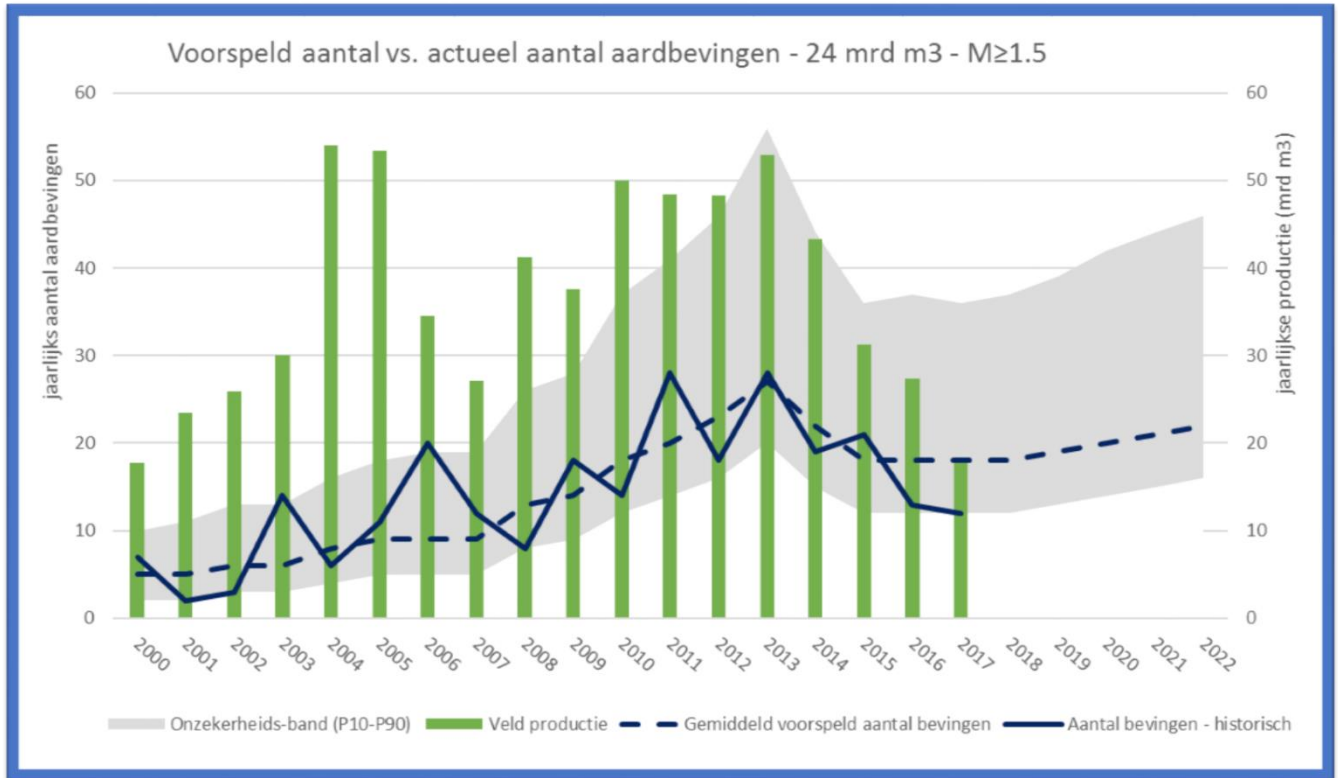
11.3 Voorspellingen seismiciteit-ontwikkeling

De volgende stap die gemaakt is om twee modellen te runnen die de seismiciteit voorspellen voor de komende tijd. Het ene model (een hybride geomechanisch/statistisch model) wordt al enige tijd gebruikt (referentie 10) maar is opnieuw “getuned”, en het andere model is nieuw en is gebaseerd op een “machine-learning” benadering (referentie 12).

Voorspellingen zijn gemaakt voor zowel het hele veld als de Loppersum regio (“Noordwest”). Hoewel de voorspelling-basis van de twee modellen verschilt ($M \geq 1.0$ voor het machine learning model, $M \geq 1.5$ voor het hybride geomechanische-statistische model) geven ze beide aan dat de verwachte seismiciteit nagenoeg constant zal blijven of licht zal stijgen. Voor zowel het hele veld als voor Loppersum, zelfs voor een 24 mrd m³ productievolume scenario.

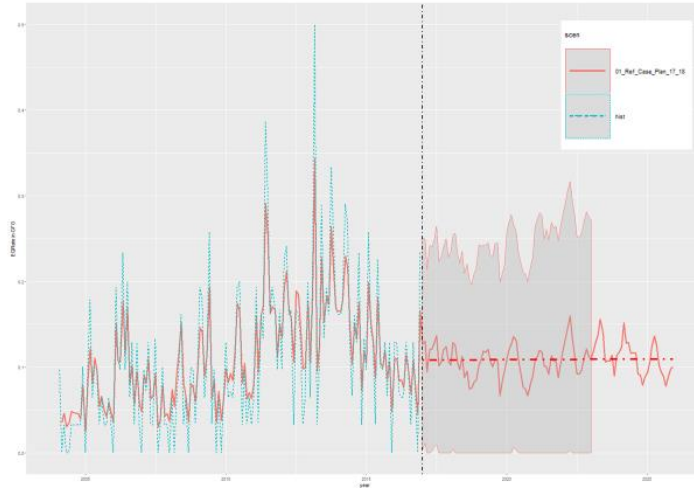
11.3.1 Voorspellingen voor hele Groningen veld

Figuur 23 geeft de “history match” en voorspeld aantal aardbevingen voor het Groningen veld voor een 24 mrd m³ volume scenario. Voorspeld met het verbeterde hybride geomechanisch/statistisch model (Referentie 10). Het verwacht aantal aardbevingen op veldbasis blijft het komend jaar vrijwel constant (behoudens statistische variaties) en stijgt daarna licht met gemiddeld 1 beving per jaar, naar 22 bevingen per jaar in 2022 ($M \geq 1.5$). De reden om 24 mrd m³ als basis te nemen is dat dit conservatief is met betrekking tot het aantal verwachte bevingen. Voor het (onwaarschijnlijke) scenario dat alle 5 de komende winters vrij zwaar zijn, geeft dit het verwachte aantal bevingen weer. Het waarschijnlijker scenario met 21.6 mrd m³ gemiddeld aan productie zal wat minder aardbevingen opleveren (1-2 gemiddeld per jaar).



Figuur 23. "History match" en voorspeld aantal bevingen voor het Groningen veld. Voorspelling met behulp van een hybride geomechanisch/statistisch model.

Een recente "machine-learning" studie (referentie 12) heeft ook gekeken naar de ontwikkeling van seismiciteit in Groningen. Voorspelling basis van figuur 24 is een zogenaamd "Random-Forest" model wat als beste uit de bus kwam (iets beter dan bijvoorbeeld een "Support-Vector" model). Voorspelling (met gestreepte trend-lijn) laat zien dat er een vrijwel constant level van aardbevingen verwacht wordt ($M \geq 1$), ongeveer 37 bevingen per jaar. Ook laat het model wat (halfjaarlijkse) fluctuaties zien mogelijk als gevolg van seizoens-fluctuaties in productie.

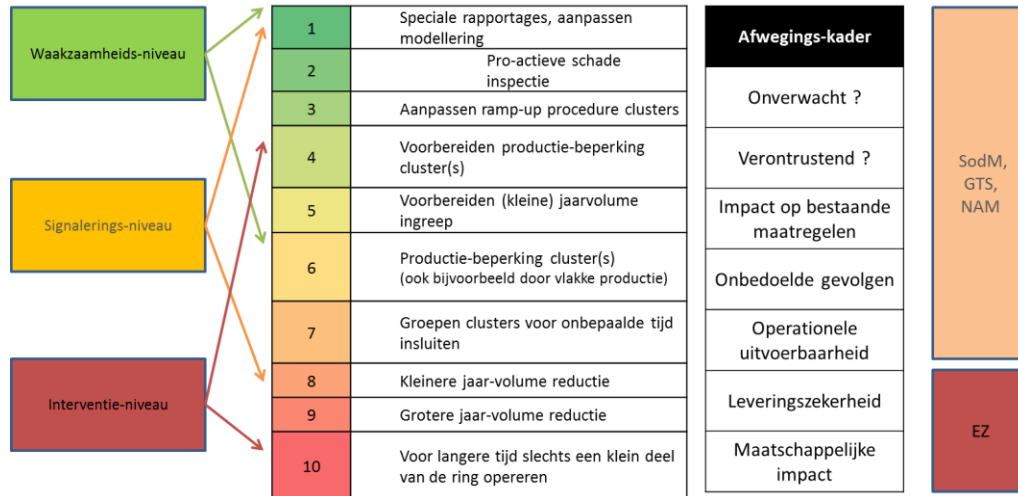


Figuur 24. "History match" en machine-learning voorspelling voor het aantal aardbevingen M1 voor het Groningen veld.

11.3.2 Voorspellingen voor regio Noordwest (Loppersum gebied)

Er zijn ook twee aparte voorspellingen gemaakt voor de regio Noordwest (Loppersum gebied). In figuur 25 staan de "history match" en voorspeld aantal aardbevingen voor een 24 mrd m³ volume scenario. Het linker-plaatje is een voorspelling met behulp van het verbeterde hybride geomechanisch/statistisch model (Referentie 7). Het verwacht aantal aardbevingen voor het gebied rond Loppersum blijft het komend jaar ook vrijwel constant (behoudens statistische variaties) en stijgt daarna licht met gemiddeld 1 beving per jaar naar ongeveer 12 bevingen per jaar ($M \geq 1.5$) in 2022. De reden om 24 mrd m³ als basis te nemen is dat dit conservatief is met betrekking tot het aantal verwachte bevingen. Voor het (onwaarschijnlijke) scenario dat alle 5 de komende winters vrij zwaar zijn, geeft dit het verwachte aantal bevingen weer. Het waarschijnlijker scenario met 21.6 mrd m³ gemiddeld aan productie zal wat minder aardbevingen opleveren (naar schatting 1 gemiddeld per jaar).

Ook de machine-learning voorspelling (plaatje rechtsonder) verwacht een stabiele trend in het aantal bevingen ($M \geq 1$).



Figuur 26. Diagram dat illustreert hoe overschrijdingen van de verschillende MRP niveaus gekoppeld worden aan te nemen maatregelen. Gereproduceerd uit referentie 1.

Vier van de zes MRP-parameters zijn in de loop van dit jaar overschreden, waarvan één op signalerings-niveau. Dit heeft geleid tot een aantal speciale rapportages en een beslissing om het Groningen jaarvolume met 10% te reduceren vanaf oktober dit jaar. In dit document is beargumenteerd dat de Loppersum trend voor bevingen groter of gelijk aan 1 significant is. Ook is aannemelijk gemaakt dat deze trend mogelijk verband houdt met regionale drukontwikkeling / bodemdaling en waarschijnlijk (in iets mindere mate) ook verband houdend met lokale gaswinning.

Er is echter een drietal redenen om niet onmiddellijk nieuwe maatregelen aan te kondigen:

1. Het effect van de reeds genomen maatregel om 10% minder volume te produceren zal naar schatting zichtbaar worden in de komende 6-9 maanden.
2. Twee vrijwel onafhankelijke voorspellingen geven aan dat er geen nieuwe stijging verwacht wordt.
3. De stijgingen zijn beperkt significant wanneer beschouwd voor bevingen met grotere magnitude of wanneer beschouwd over een langere periode

Wel zal een aantal maatregelen vast verder verkend worden:

1. Volledig insluiten van de LOPP(Z) productie clusters
2. Preferentieel met clusters uit de regio "Oost" gaan produceren
3. Verdere productieverlaging

13 Referenties

Referentie 1. Meet- en Regelprotocol Groningen veld, NAM, June 2017

Referentie 2. Silverman, 1986. Density estimation for Statistics and Data Analysis

Referentie 3. Special Report on the earthquake density and activity rate following the earthquakes in Appingedam (ML=1.8) and Scharmer (ML=1.5) in August 2017

Referentie 4. Rapportage recente aardbevingen Wirdum en Garsthuizen 2016/2017, NAM, March 2017

Referentie 5. Special Report on the earthquake density and activity rate following the earthquake in Appingedam (ML=1.8) and Scharmer (ML=1.5) in August 2017, NAM

Referentie 6: Full-wave inversion KNMI data 2015-2017, in prep.

Referentie 7: Winningsplan Groningen 2016, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, 1st April 2016.

Referentie 8. TNO 2015 R11367 - Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field

Referentie 9: - Wood S.N. (2017) Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition). Chapman and Hall/CRC Press.

Referentie 10: -R. M. Price and D. G. Bonett. Estimating the ratio of two poisson rates. Computational Statistics and Data Analysis, 34:345-356, 2000.

Referentie 11: S. Bourne and S. Oates. An Activity rate model of induced seismicity withing the Groningen Field.

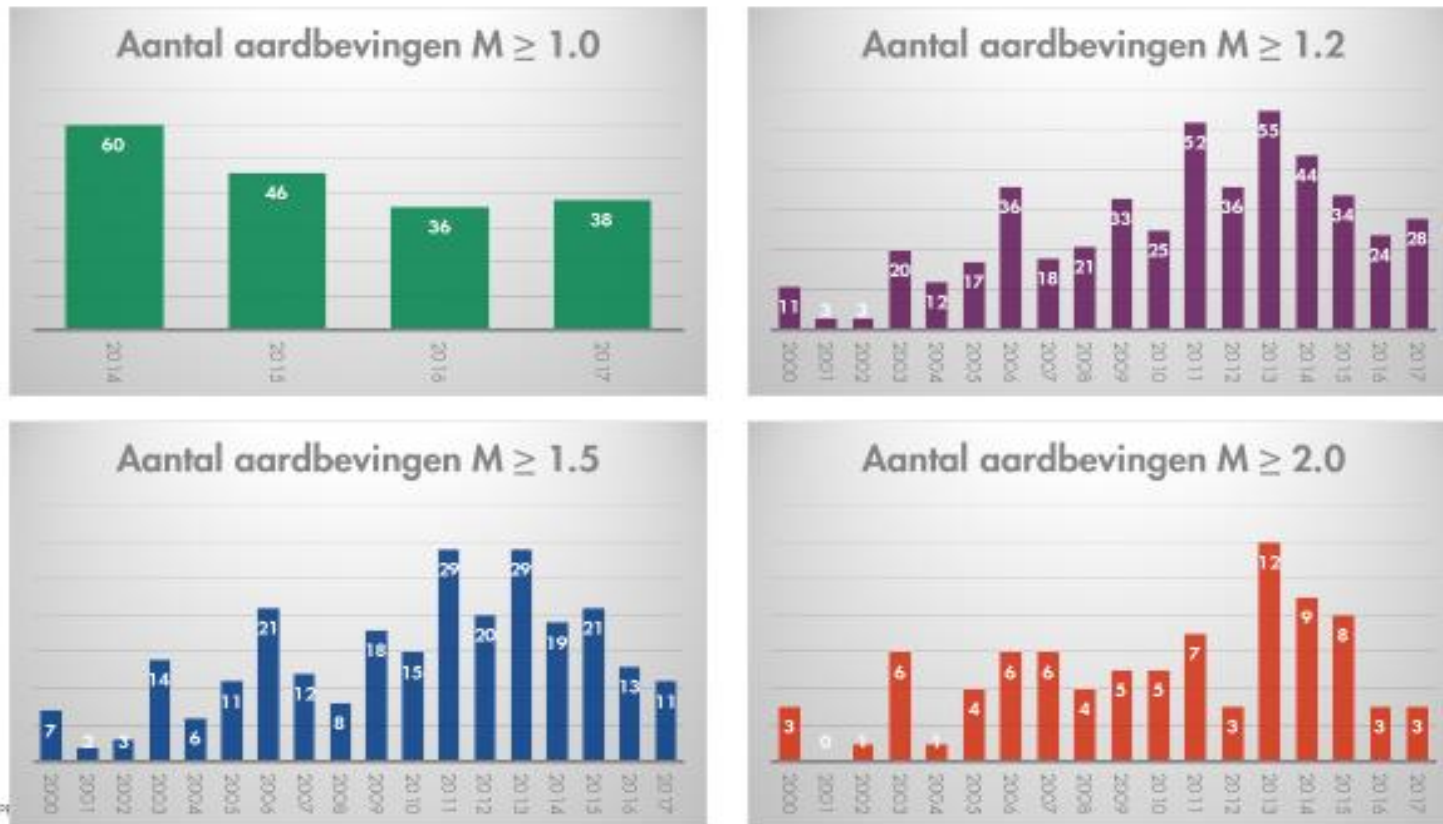
Referentie 12: Machine learning application to seismicity in the Groningen field, Nevenzeel et al., in prep.

14 Updates/ Errata

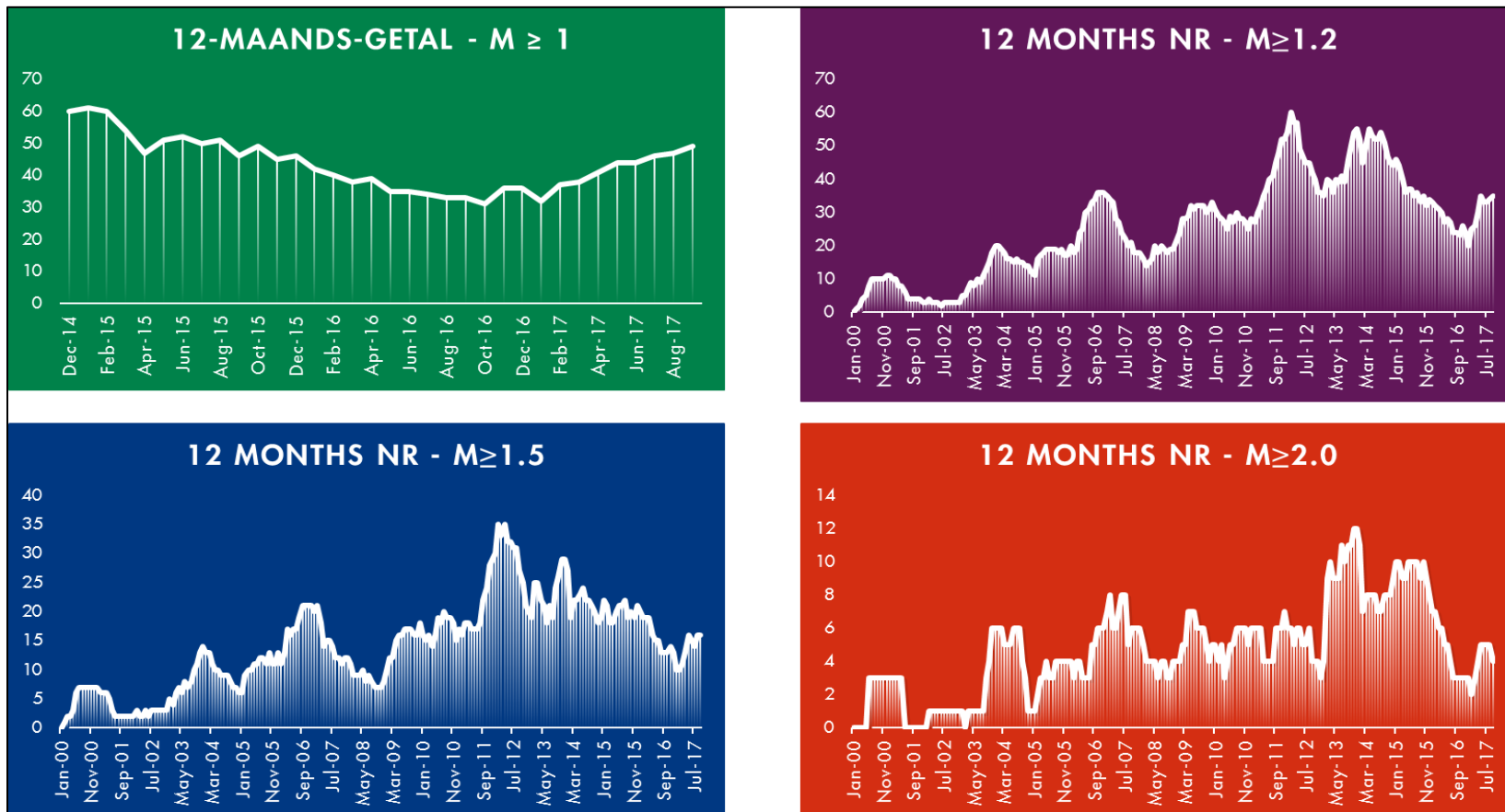
Na eerste submitie op 1 november zijn in deze versie (15 november), op advies van SodM nog een paar aanpassingen gemaakt:

1. Inhoudelijke wijziging:
 - a. Toevoeging van figuur 11b.
 - b. Vervanging van figuur 6 door figuur met de juiste equivalente limieten voor M1.2
 - c. Toevoeging referentie Clopper-Pearson test
2. Wijzigingen die de leesbaarheid verhogen:
 - a. Figuur achtergronden
 - b. Figuur onderschriften
3. Verwijderen van enkele “typo’s”.

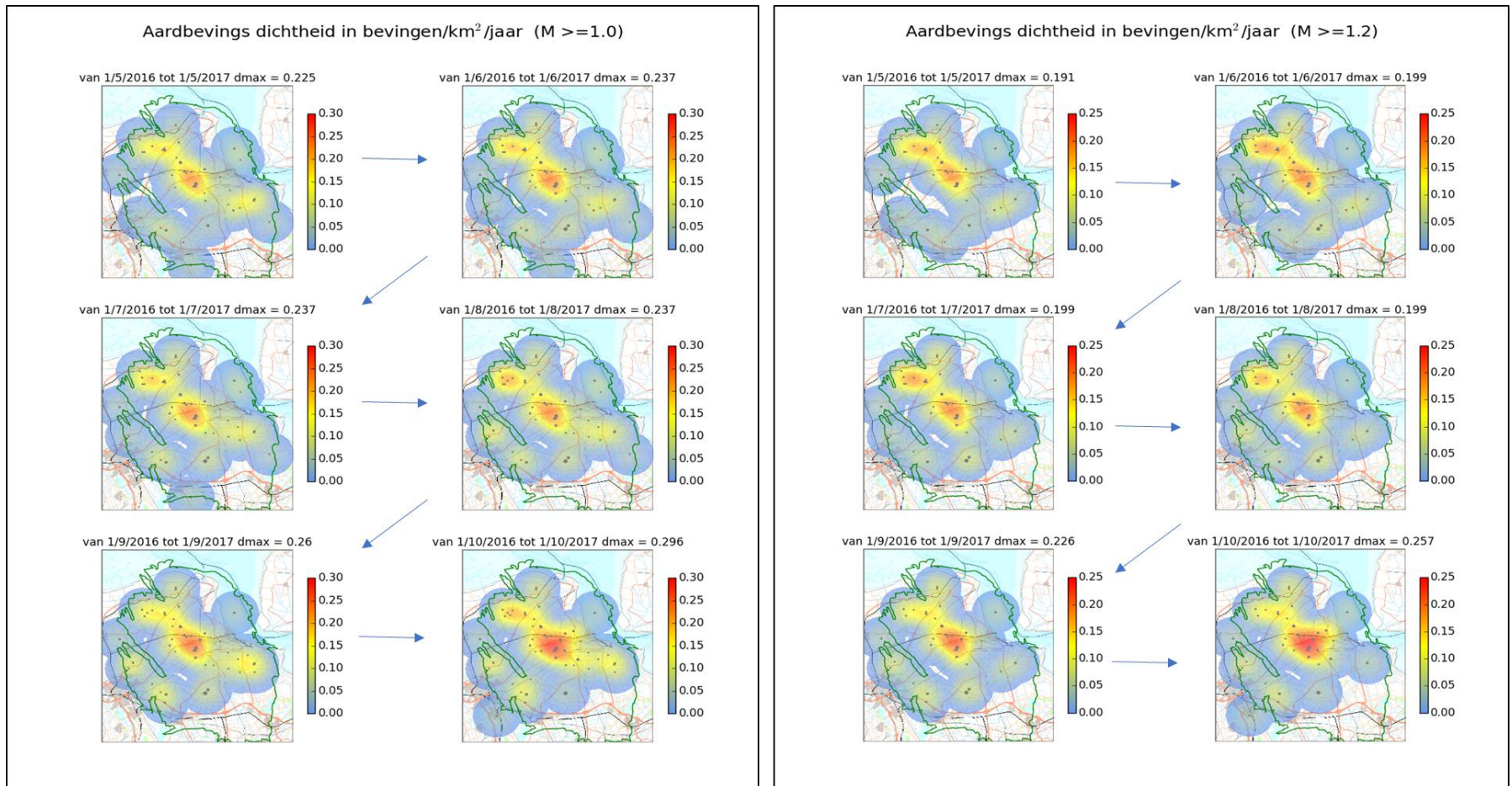
15 Appendix A – Figuren



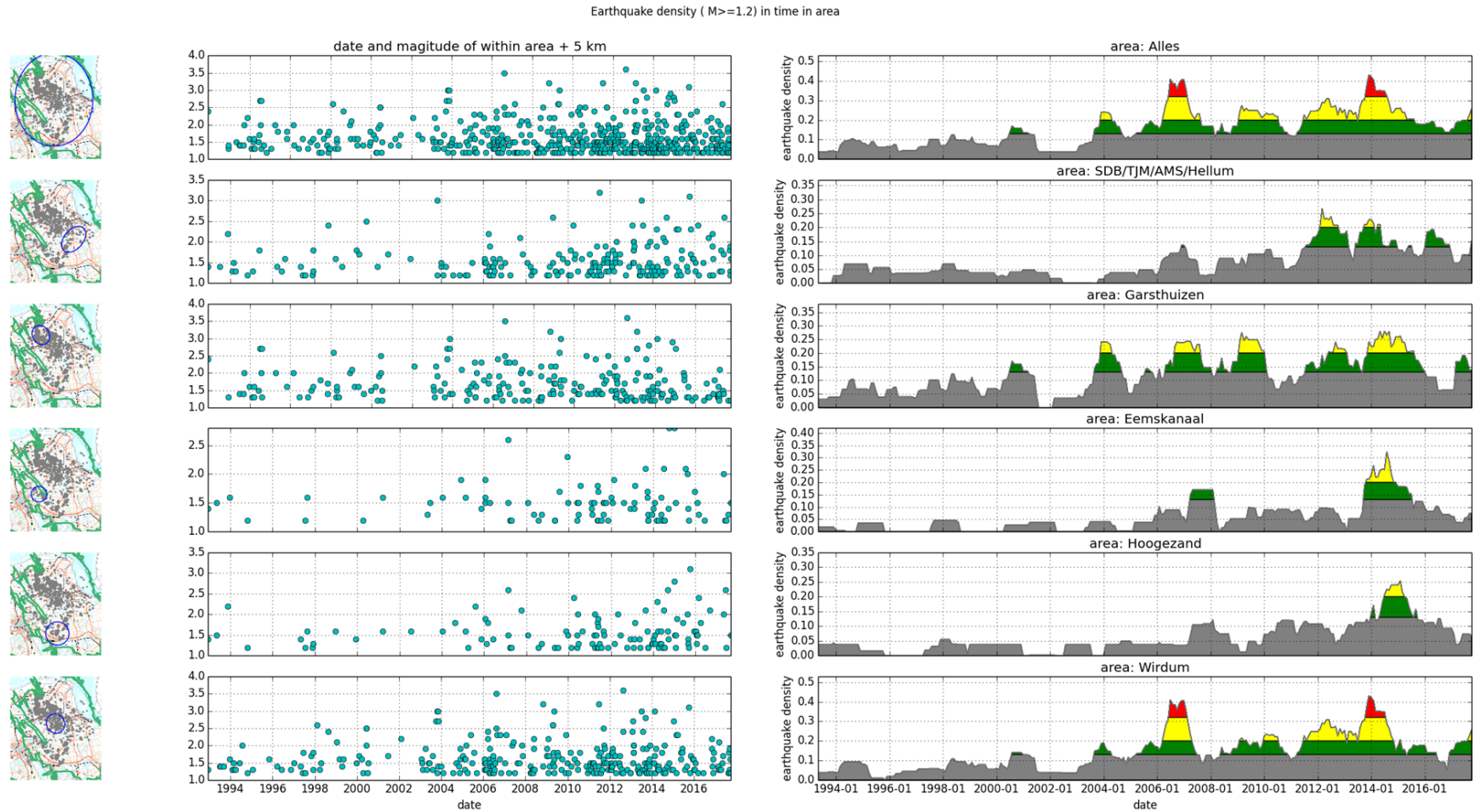
Figuur 1. Ontwikkeling van het aantal aardbevingen per jaar voor de verschillende magnitude-klassen. Het panel linksboven (groene kleur) laat het jaarlijks aantal aardbevingen zien voor $M \geq 1$ (waarbij opgemerkt moet worden dat 2017 uiteraard nog niet compleet is en dat er vanwege incompleetheid van de data voor 2014, er geen data van voor 2014 geplot worden). Er zijn enige statistische aanwijzingen dat de dataset boven de 1.2 wel compleet zou kunnen zijn en dat is de reden dat deze geplot vanaf het jaar 2000 (panel rechtsboven, paarse kleuren). Dit panel laat zien dat er dit jaar nu al meer bevingen zijn dan vorig jaar en dat mogelijk uit kan komen op levels zoals we die in 2015, 2009 en 2006 hebben gezien. Het linker panel beneden (blauwe kleuren) laat bevingen zien met een magnitude van 1.5 en hoge. Met 11 bevingen in 2017 tot nu toe (oktober) kan niet worden gezegd dat we al meer seismiciteit zien dan in 2016 en zitten we nog steeds op historisch relatief lage niveaus. Het panel rechts beneden tenslotte (in de rode kleuren), laat de bevingen van 2.0 en hoger zien.



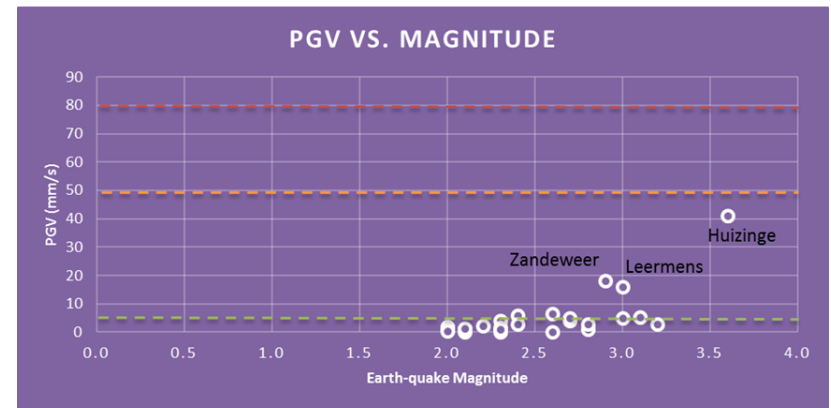
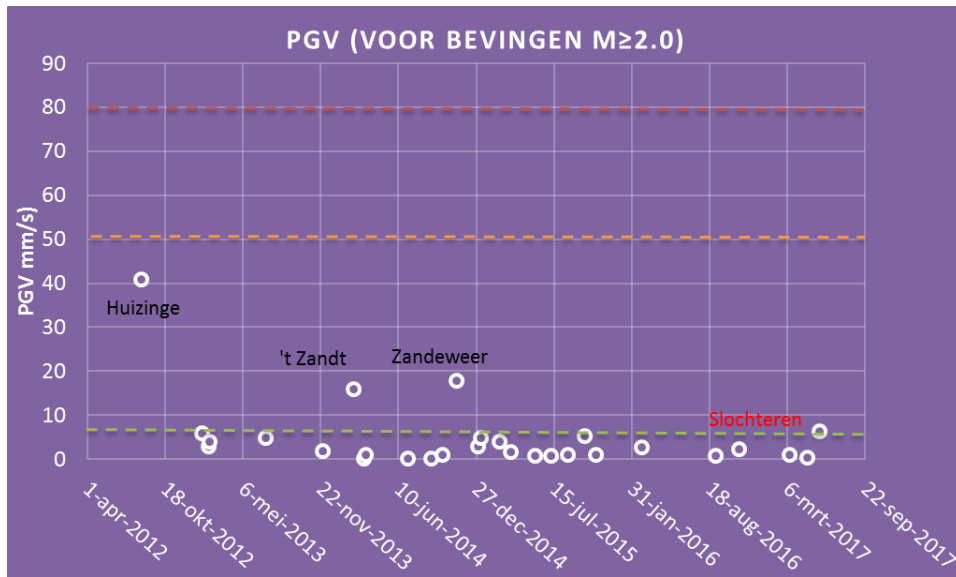
Figuur 3. 12 maands-getallen voor dezelfde vier magnitude-klassen als figuur 1. In het groene paneel linksboven staan de aardbevingen met een magnitude van 1.0 en hoger. Deze laat dezelfde stijgende sinds oktober 2016 zien als in figuur 1 maar laat ook het verband zien met de ontwikkeling van seismiciteit in de jaren ervoor. Op dit moment is een level van seismiciteit bereikt dat ongeveer op hetzelfde niveau ligt als in December 2015. Het panel ernaast (paarse kleur) laat bevingen zien met een magnitude van 1.2 en hoger, maar geeft de ontwikkeling sinds 2000 weer. Ook hier is de stijging sinds 2016 duidelijk. Stijgingen en dalingen in de verschillende magnitude-klassen tamelijk goed samenvallen hoewel er ook verscheidene periodes in het verleden zijn waarin de seismiciteit voor bevingen voor $M \geq 1.5$ omhoogging terwijl de $M \geq 2.0$ vrijwel constant bleef (e.g. 2009-2012). Het gebrek aan data echter (aardbevingen $M \geq 2$), maakt interpretatie hiervan echter lastig.



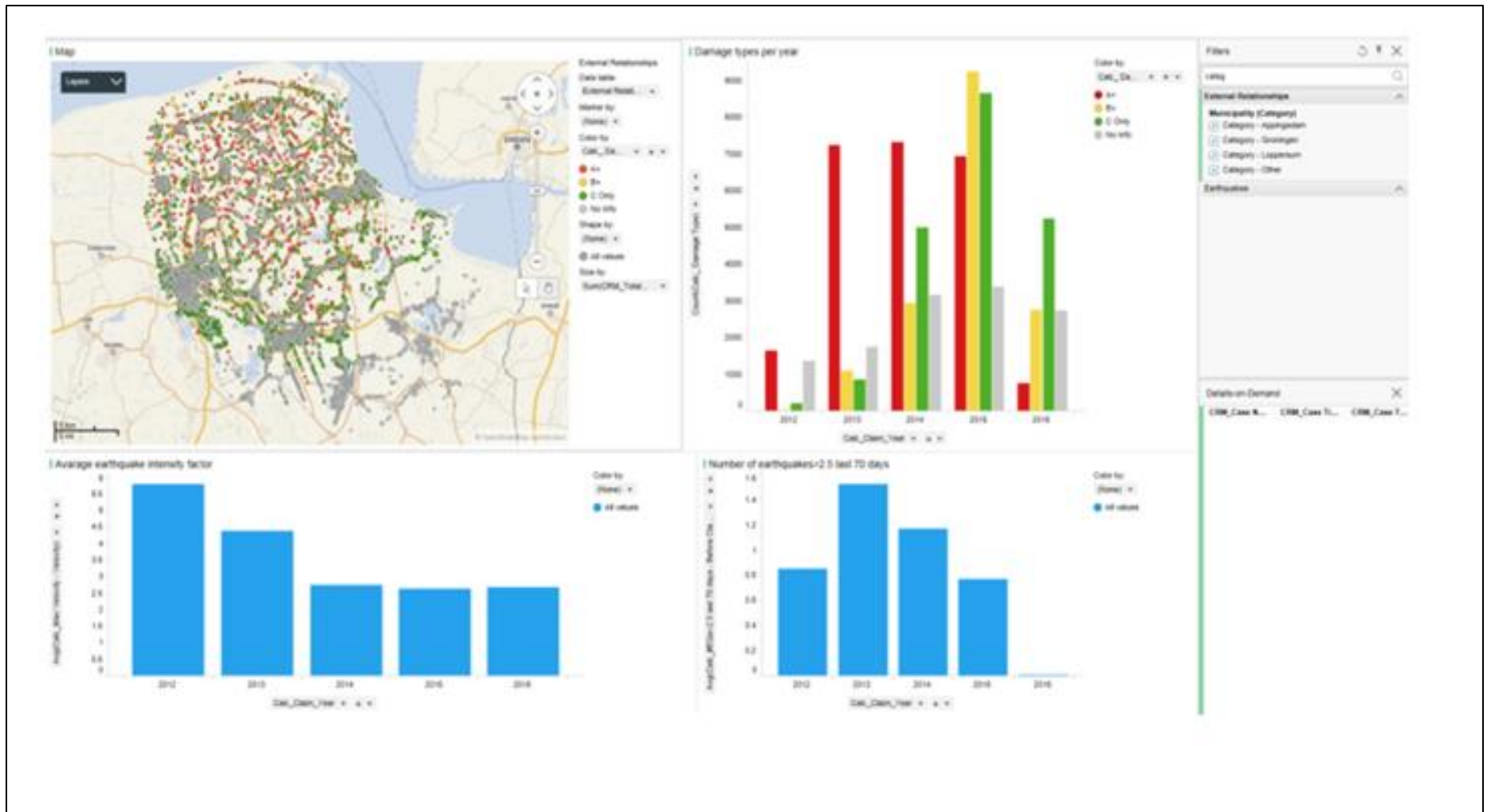
Figuur 5. Ontwikkeling van de aardbevingsdichtheid over de tijd. Het patroon staat weergegeven voor 2 magnitude klassen, links $M \geq 1.0$, rechts $M \geq 1.2$. Voor beide magnitude-klassen is het patroon vrijwel gelijk en consistent met een monotoon stijgend patroon voor Loppersum en enigszins fluctuerend maar ook stijgend patroon voor het gebied ten noordwesten ervan.



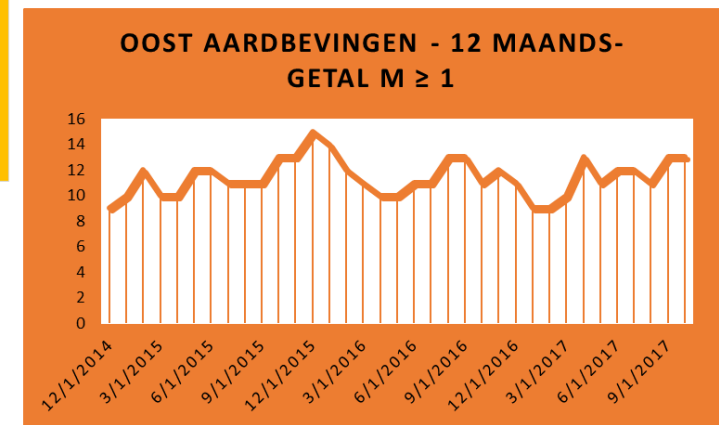
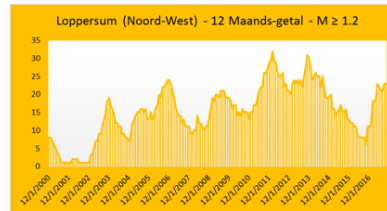
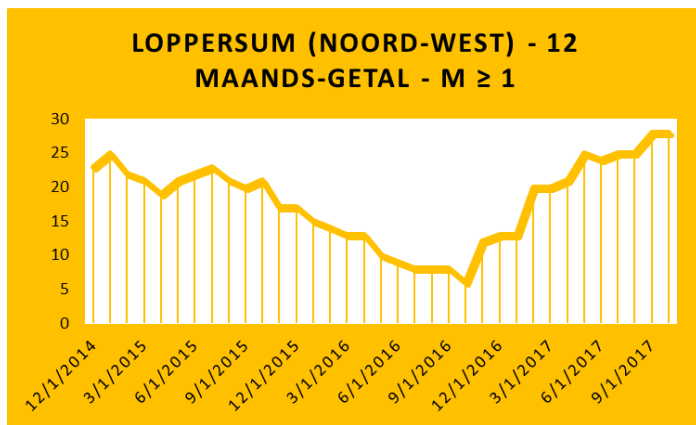
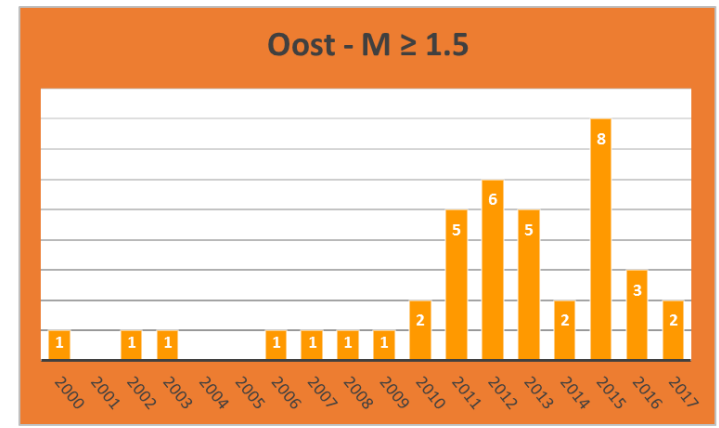
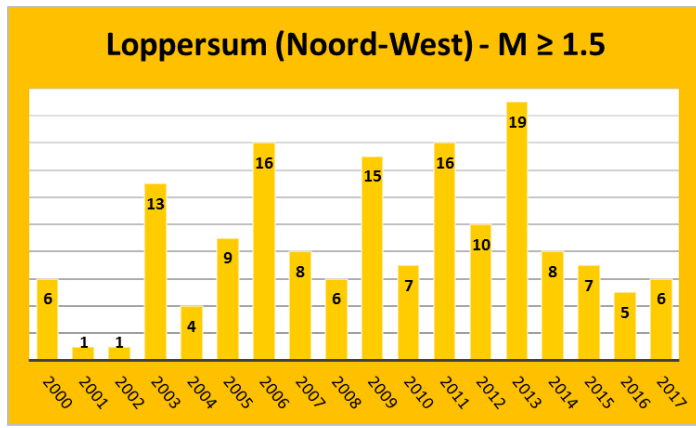
Figuur 6. Aardbevingsdichtheids-ontwikkeling over de tijd voor $M \geq 1.2$. De equivalente waarde van 0.30 voor $M \geq 1.0$ is 0.26 voor $M \geq 1.2$. De reden om $M \geq 1.2$ als basis te nemen voor dit figuurtje is dat er verder in de tijd teruggekeken kan worden dan met $M \geq 1.0$ (vanwege data-compleetheits-issues vóór 2014). Het laat zien dat de huidige aardbevingsdichtheids-waarde van rond de 0.26 aardbevingen (per vierkante kilometer, per jaar) in het verleden regelmatig bereikt werd (periode rond 2007 en van 2012 tot 2014).



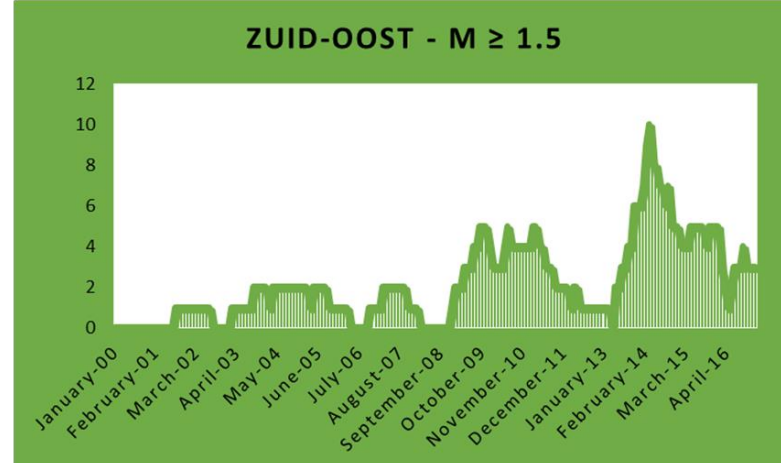
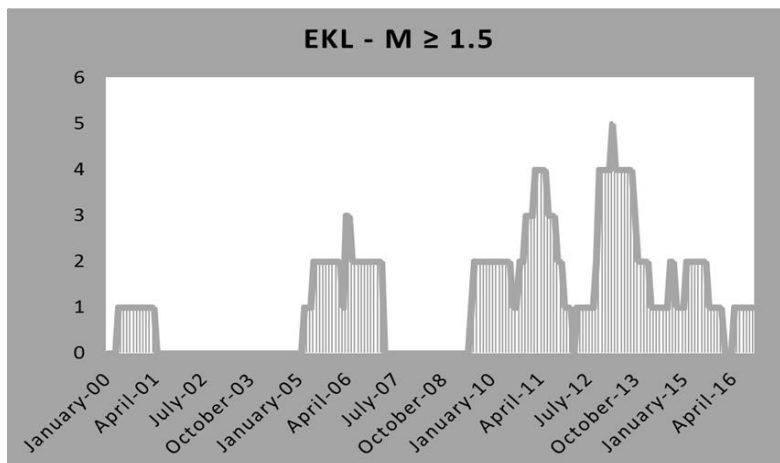
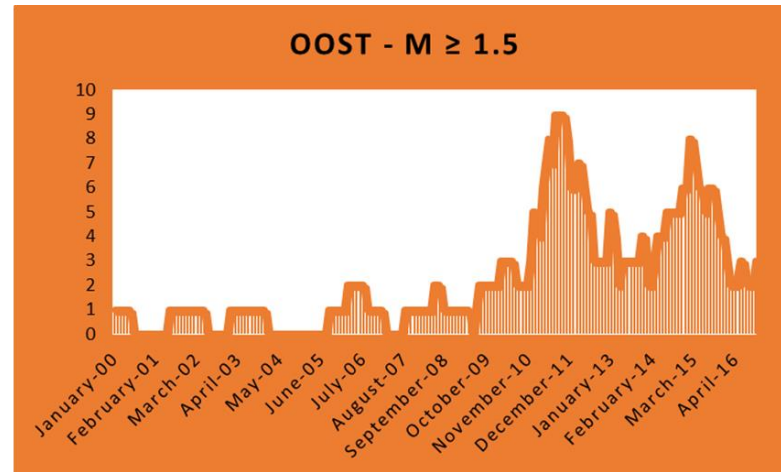
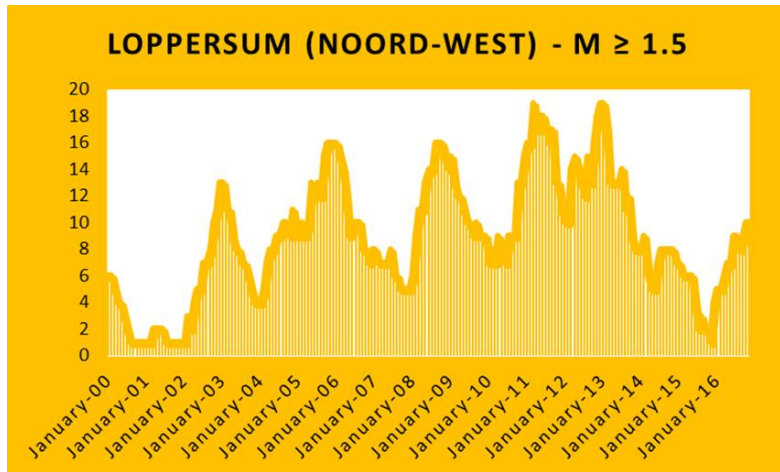
Figuur 8. Linker=panel: piek-grondsnelheid (“PGV”) zoals berekend uit data sinds 2012l. De recente beving in Slochteren (mei 2017) is net boven het “waakzaamheids-niveau” uitgekomen. Het rechter-paneel laat de relatie zien tussen gemeten PGV en aardbevings-magnitude. Uit dit plaatje kan worden geconcludeerd dat de PGV van de laatste 4 bevingen het “gewone” patroon volgen, dat wil zeggen een normale relatie met magnitude laten zien.



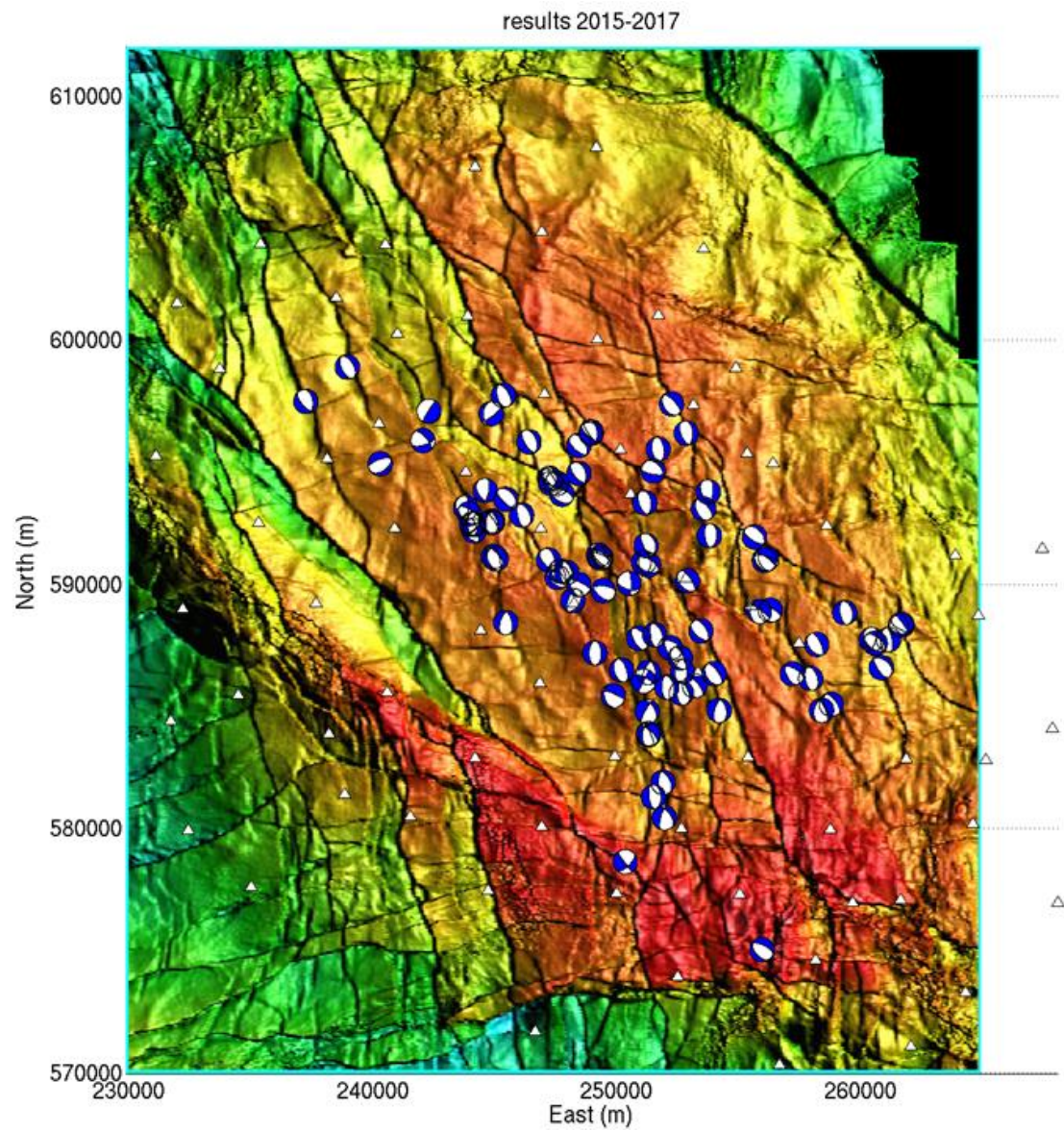
Figuur 10. A, B en schades op kaart en grafiek. Ook uitgezet aantal bevingen laatste 5 jaar.



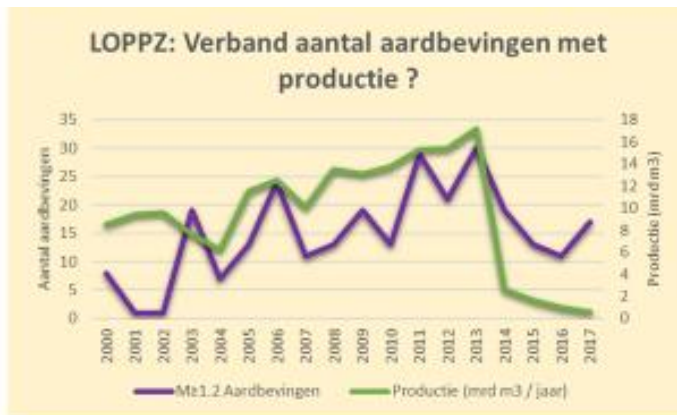
Figuur 11a. Verschillen in regionale ontwikkeling. De bovenste panelen laten de ontwikkeling zien aardbevingen met een magnitude $M \geq 1.5$ voor het gebied rond Loppersum (links, geel) en "Oost" (rechts, oranje). Voor Loppersum, op dit magnitude level ($M \geq 1.5$) is vooral het verschil tussen 2013 en 2014 opvallend maar is een recente stijging van bevingen in het gebied nog niet duidelijk. Anders wordt dit wanneer bevingen met $M \geq 1$ beschouwd worden. Onderste panelen: Het gebied rond Loppersum (gele kleuren) laat in 2017 een stijging zien van het aantal aardbevingen groter dan en gelijk aan 1 (maand-getallen) ten opzichte van 2016. Ook uitgedrukt in maand getallen laat het gebied "Oost" (rechterpaneel, oranje kleur) laat een min of meer stabiel aantal aardbevingen zien, eigenlijk sinds 2014



Figuur 11b. Maandgetallen voor vier regio's voor aardbevingen met $M \geq 1.5$. Regio Noord-West (gebied rond Loppersum) laat een praktisch monotoon stijgende lijn zien sinds oktober 2016. De andere regio's laten in diezelfde periode (het laatste jaar) geen noemenswaardig patroon zien. Voor deze drie regio's geldt ook dat de seismiciteit op een lager niveau ligt ten opzichte van een aantal jaar geleden. In termen van maandgetallen zit regio Noord-West zo ongeveer op het gemiddelde seismisch niveau van de laatste 15 jaar. Opvallend is ook dat de regio's Oost en zuid-oost aanvankelijk een stijging lieten vanaf 2013 tot ongeveer begin 2015 maar dat beide regio's sindsdien weer op lager niveau zitten.

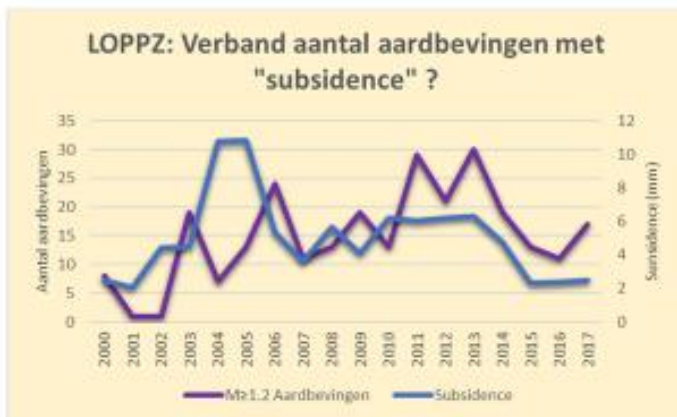


Figuur 14. Herziene positie van hypo-centra voor 99 recente aardbevingen. Aardbevingen lijnen wat meer op met gekarteerde breuken.

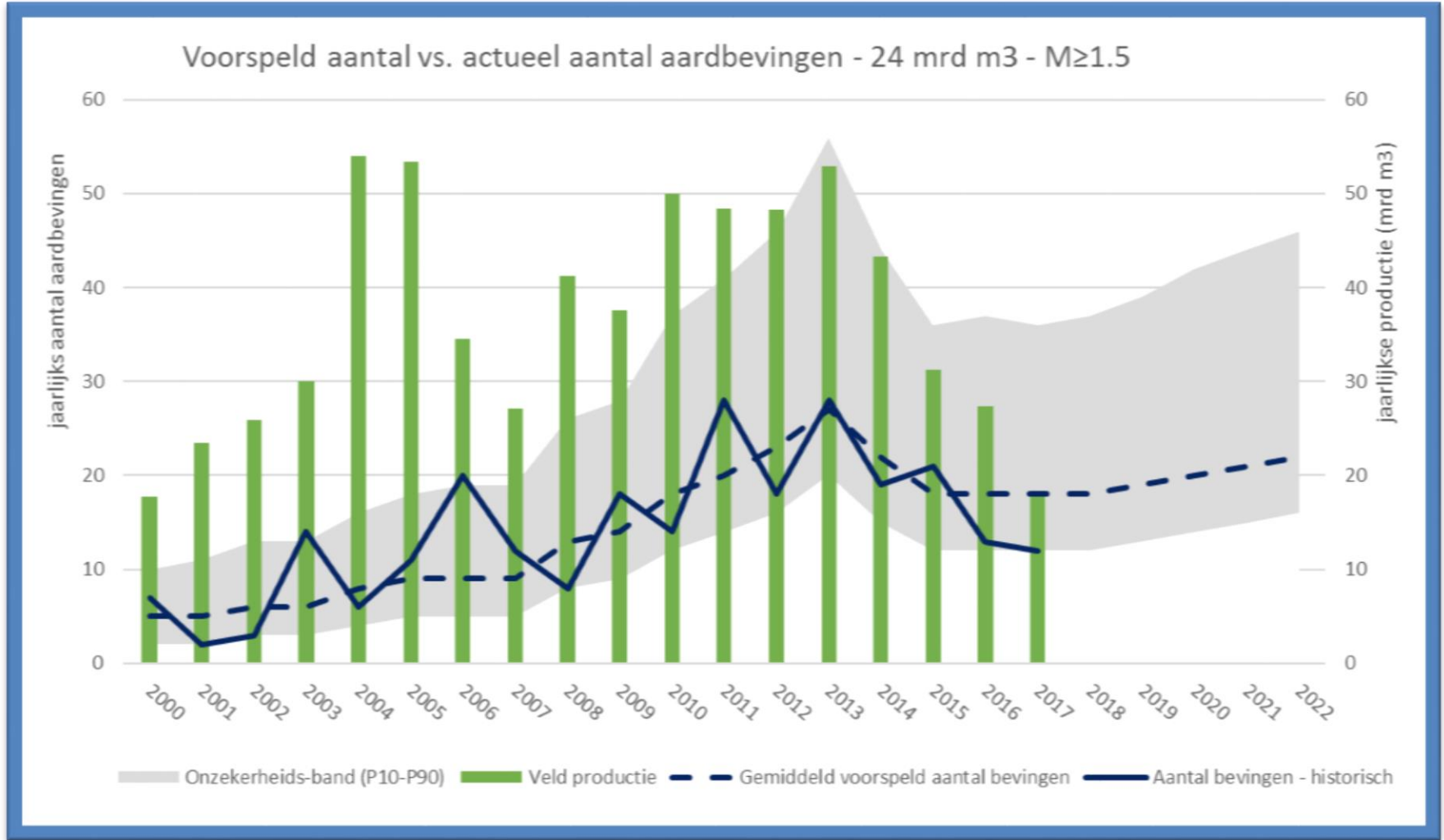


Correlatie aardbevingen met :	Spearman rank correlation coefficient
Productie	0.48
Subsidence (bodemdaling)	0.42

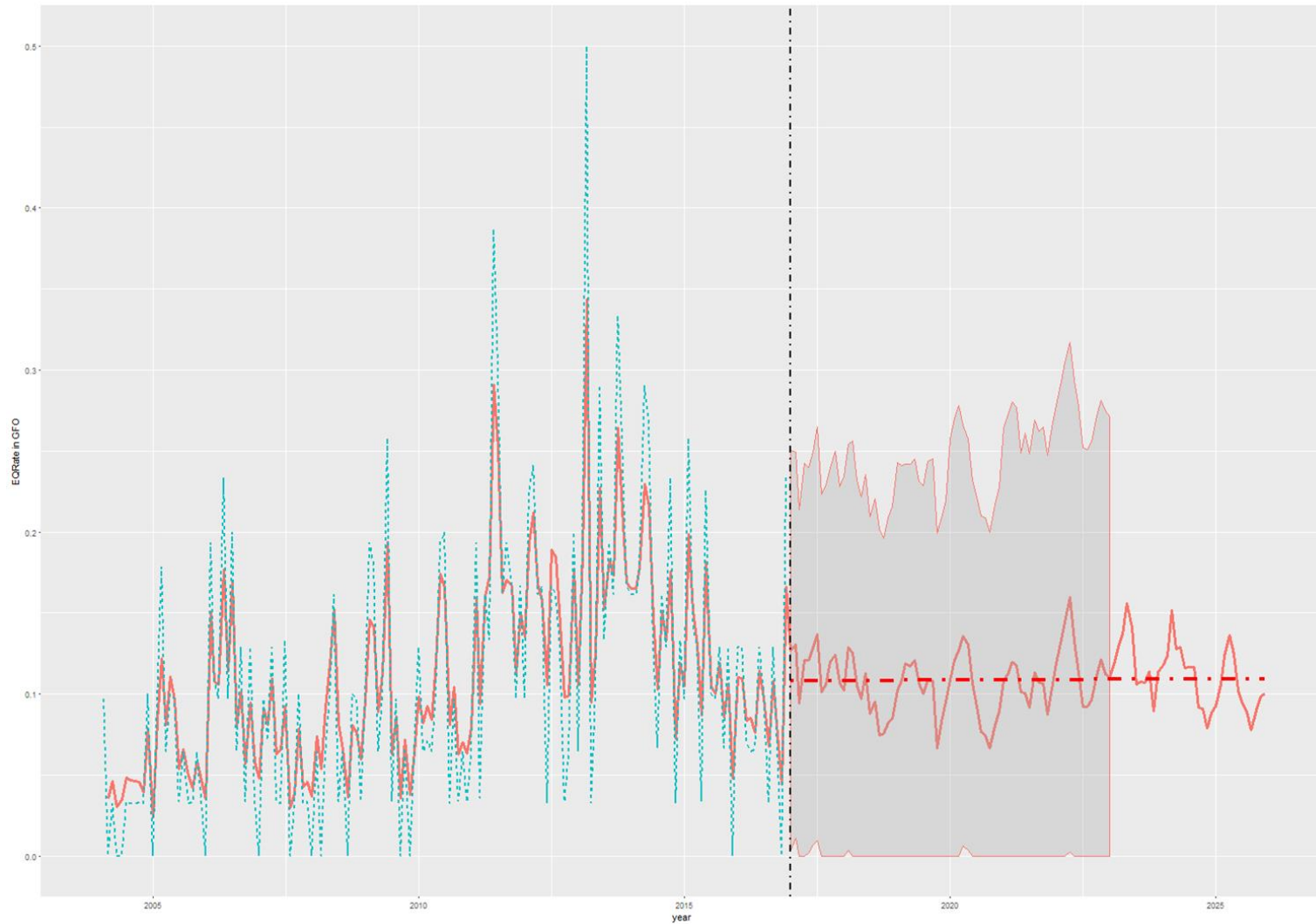
Correlatie aardbevingen met :	Spearman rank correlation coefficient
Druk-daling	0.68
Samengestelde variabele	0.70



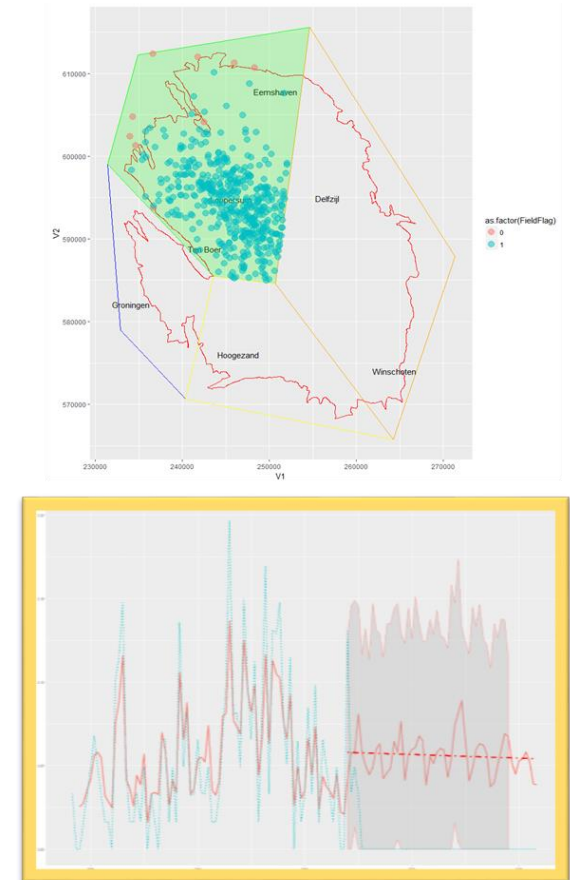
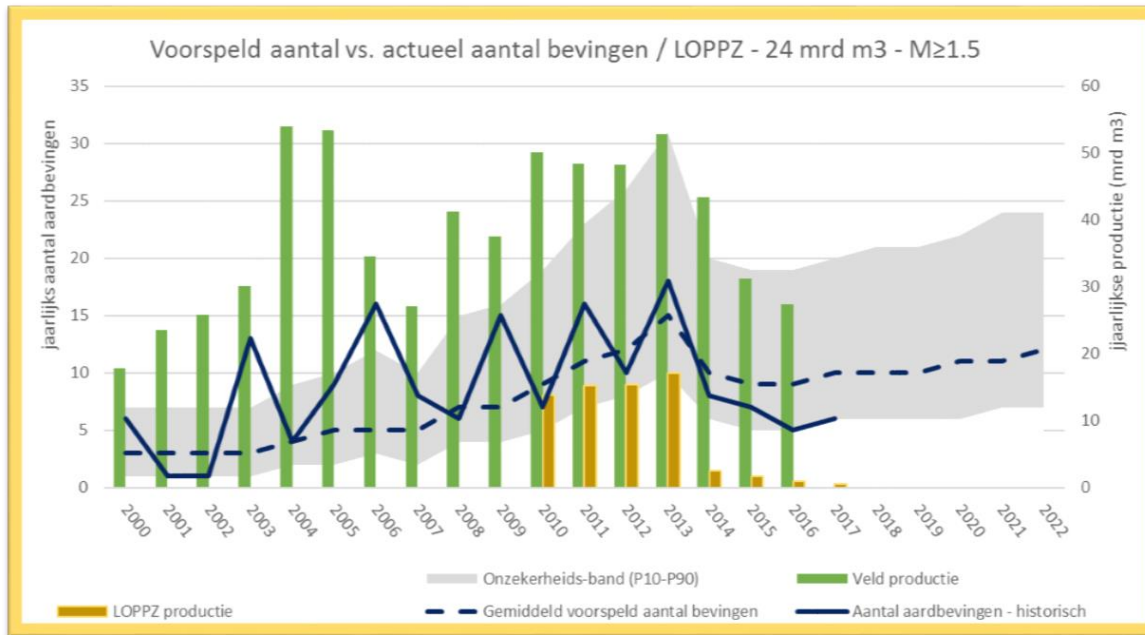
Figuur 22. Verbanden tussen de seismiciteit in het gebied rond Loppersum, productie, reservoir druk, bodemdaling en een "samengestelde variabele". In het panel linksboven is goed te zien dat de seismiciteit stijgt terwijl productie gelijk blijft of zelfs iets zakt. Het ligt voor de hand om andere verbanden proberen te leggen dan met productie. Drie andere verbanden zijn geprobeerd, met reservoir druk, met bodemdaling ("subsidence") en met een samengestelde variabele die zowel rekening houdt met historische bodemdaling als met recente. Tabellen tussen de figuren laten de resultaten van een non-parametrische correlatie test zien, de "Spearman-rank-correlation coëfficiënt", de non-parametrische tegenhanger van de "normale", parametrische, lineaire correlatiecoëfficiënt. Druk-daling en de relatie met de samengestelde variabele lijken een beter verband te laten zien dan productie en recente bodemdaling.



Figuur 23. “History match” en voorspeld aantal aardbevingen voor het Groningen veld voor een 24 mrd m³ volume scenario. Voorspeld met het verbeterde hybride geomechanisch/statistisch model (Referentie 7). Het verwacht aantal aardbevingen op veldbasis blijft het komend jaar vrijwel constant (behoudens statistische variaties) en stijgt daarna licht met gemiddeld 1 beving per jaar, naar 22 bevingen per jaar in 2022 (M \geq 1.5). De onzekerheidsband is echter groot.



Figuur 24. “History Match” en “Machine learning” voorspelling voor het aantal bevingen ($M \geq 1$) voor het Groningen veld. Voorspelling basis is een zogenaamd “Random-Forest” model wat als best uit de bus kwam (iets beter dan bijvoorbeeld een “Support-Vector” model). Voorspelling (met gestreept de trend-lijn) laat zien dat er een vrijwel constant level van aardbevingen verwacht wordt ($M \geq 1$), ongeveer 37 bevingen per jaar. Ook laat het model wat (half-jaarlijkse) fluctuaties zien mogelijk als gevolg van seizoens-fluctuaties in productie.



Figuur 25. Linker panel: "History match" en voorspeld aantal aardbevingen voor het gebied rond Loppersum voor een 24 mrd m3 volume scenario. Voorspeld met het verbeterde hybride geomechanisch/statistisch model (Referentie 7). Het verwacht aantal aardbevingen voor het gebied rond Loppersum blijft het komend jaar ook vrijwel constant (behoudens statistische variaties) en stijgt daarna licht met gemiddeld 1 beving per jaar naar ongeveer 12 bevingen per jaar ($M \geq 1.5$) in 2022. Panel rechtsonder: Voorpelling met behulp van een machine-learning model. Ook deze voorspelling laat een stabiele trend zien, maar de onzekerheidsband is (erg) groot. Panel rechtsboven laat gebied zien waarvoor voorspellingen zijn gedaan.

