

Groningen seismiciteit

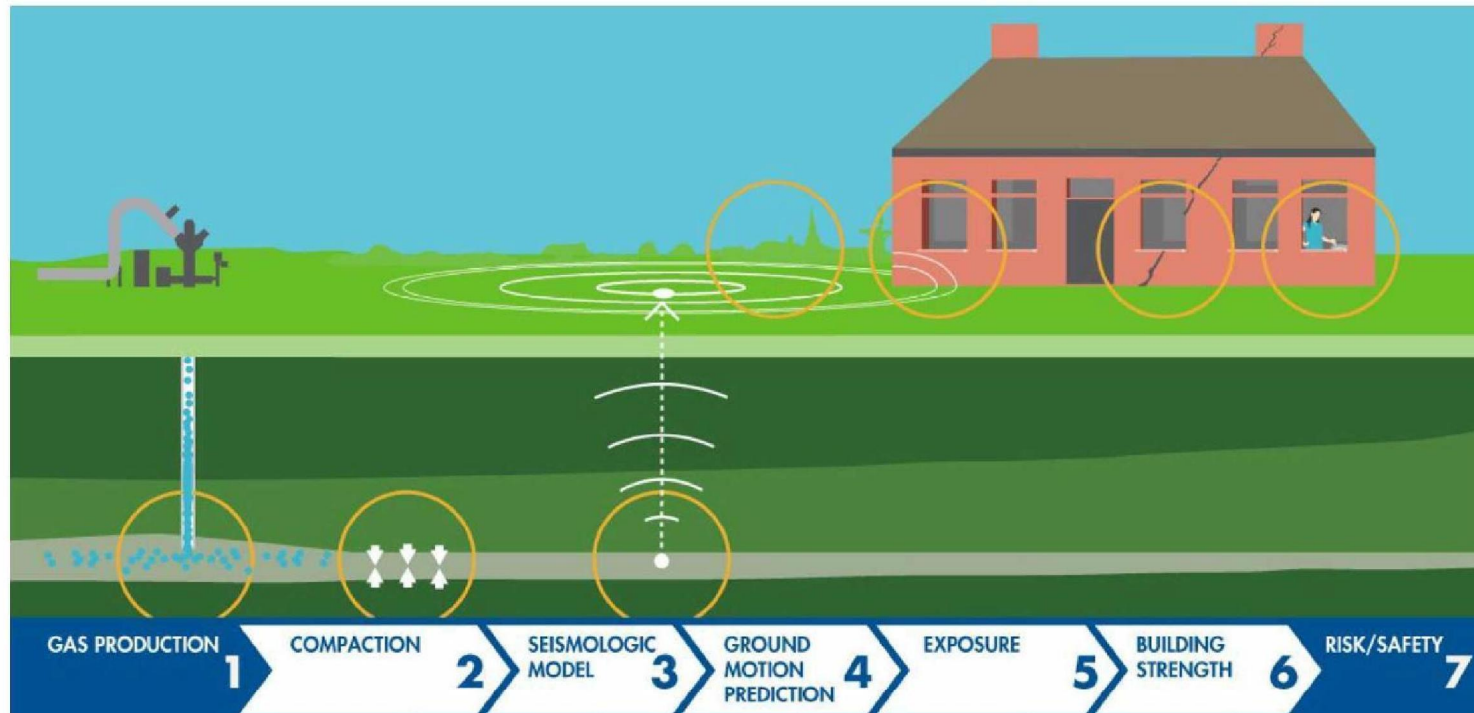
Storyline

- Grootste risico voor Groningen-stad ligt waarschijnlijk toch in Loppersum gebied
- Dat betekent dat huidige veiligheidsberekening en maatregelen ook heel relevant voor Stad Groningen zijn
- Situatie in Loppersum (en EKL) wordt mede gemanaged door MRP – MRP heeft een “vroeg-ingrijpen” filosofie
- Het “overslaan van magnitudes” is onwaarschijnlijk
- De bevingen in het Groningen aquifer hebben geen verontrustende geomachanische observaties opgeleverd – studie loopt nog wel door
- EKL insluiten kan wel positief effect hebben

Overzicht

- Rol Hazard en Risk model
- Rol meet en regel protocol
- De huidige stand van zaken – trends etc.
- Zeerijp
- Groningen

Componenten HRA “modeltrein”



Gas Production

Reservoir pressure

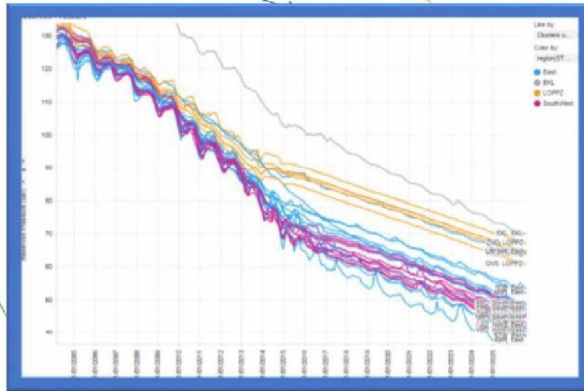
Rock Deformation, subsidence

Seismological model based on compaction

Ground movement

Building strength

Risk / safety



Gedachte modeltrein niet nieuw:
Fundamentals of Earthquake Engineering; from source to fragility, 2015, Amr S. Elneshai, Luigi Di Samo
Of
Fundamental concepts of earthquake engineering, 2008, Roberto Villaverde

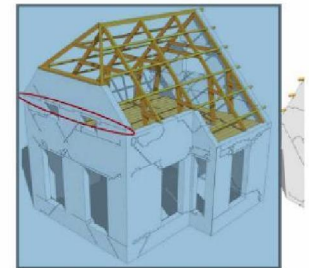
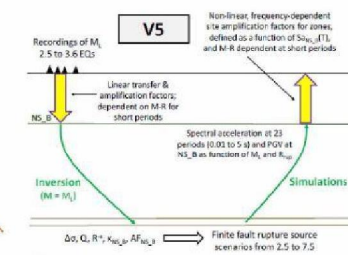
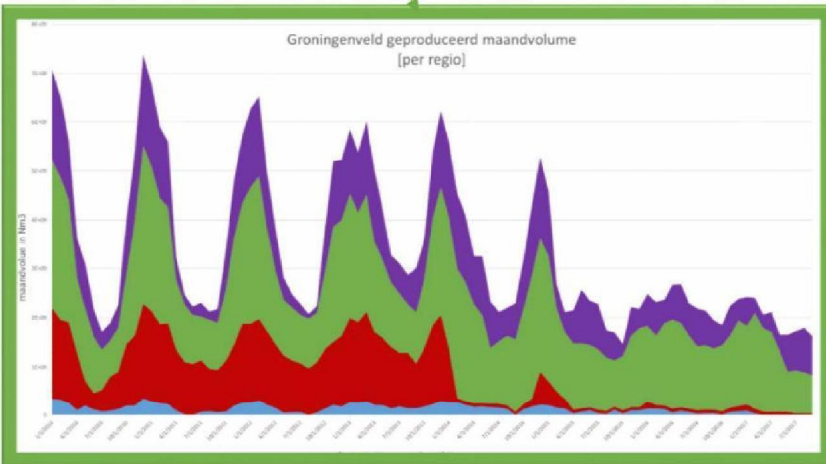
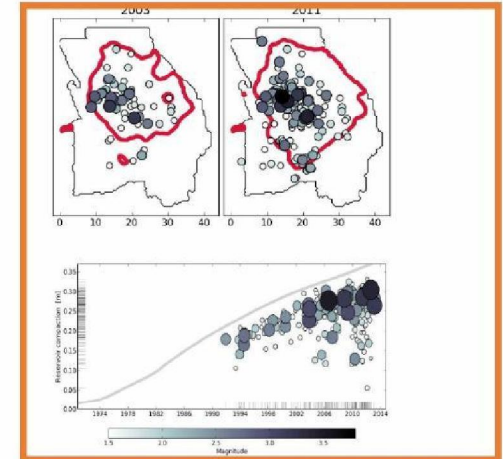
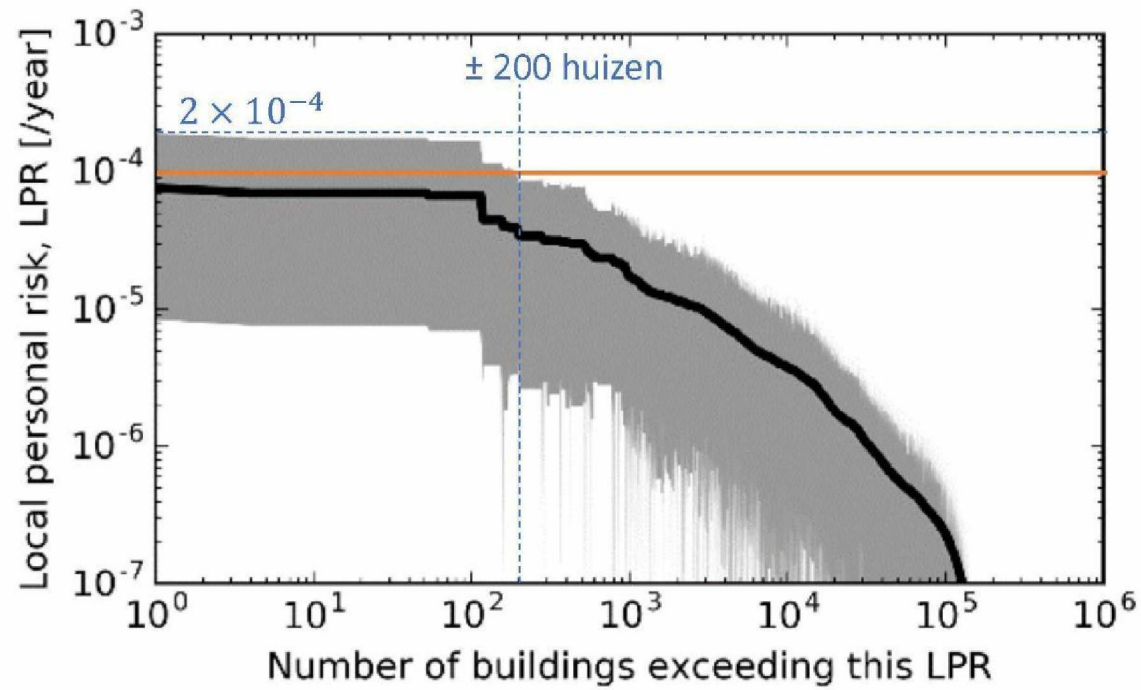


Figure 7.24 Detached house with building damage after final experi



- Geodetic Monitoring (Surveys and InSar)
- Geophone Network
- Coring of Zeerijp-C Well and Rock Experiments
- Rock compaction models and Compaction from Inversion.
- Geomechanical studies for input into seismological models





Wat is een meet en regel protocol ?

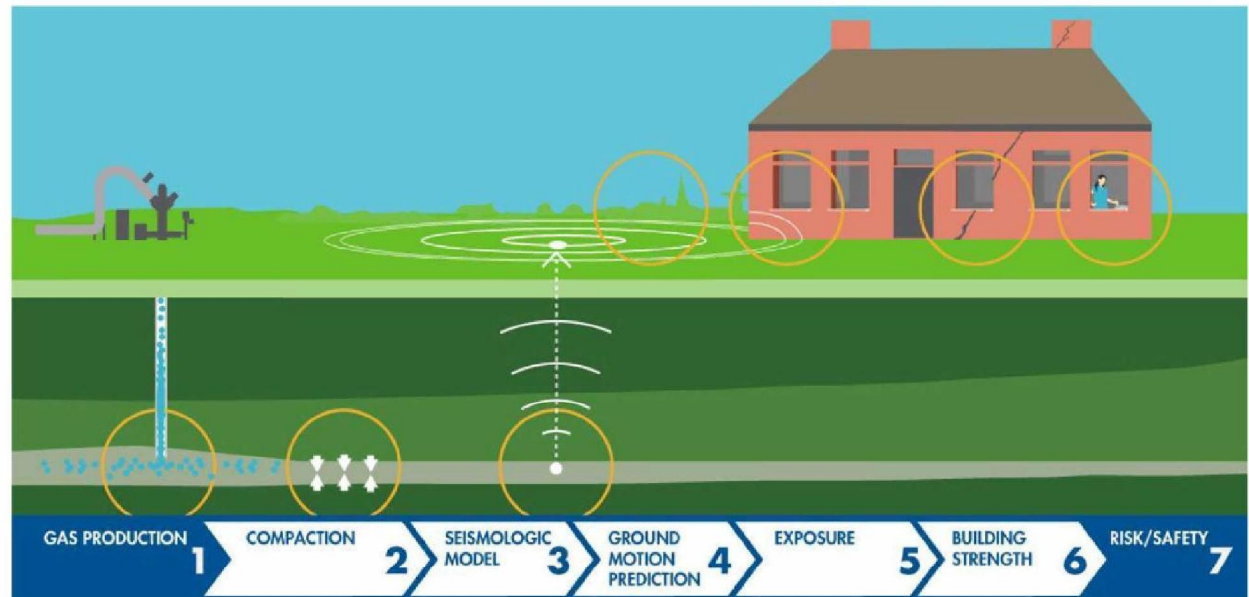
- Geinspireerd door Waddenzee protocol
- Relatie tussen productie en bodemdaling

“Hoe je seismische risico's en schade als gevolg van winning van gas beperkt”

“Op basis van een aantal meetgrootheden bijsturen en laten zien dat je “in control” bent”

“Hoe je je aardgaswinning aanpast als seismische ontwikkelingen daar aanleiding voor geven ”

Zo zuiver mogelijke, en zo precies mogelijk doorgedachte, afweging tussen bewonersbelangen en “leveringszekerheid”



Wat is er zo moeilijk aan ?

Technisch inhoudelijk

Indirecte relatie seismiciteit en productie; "lag-times", weglekken van seismiciteit; "statistical nature"

Reservoir verbindt alle regio's met elkaar

Verminder effectiviteit van regionale ingrepen

Gebrek aan voorbeelden / normen

Uniek in de wereld

Geen aardbevingsnorm, wel trillings-norm, wel "Schiphol", wel een risico-norm

Veel belanghebbenden

NAM

Shell, Exxon, EBN

SodM

Burgemeesters, provincie

EZ

Mogelijke grote consequenties

- Voor de bevolking
- Voor Nederland
- Voor NAM

Filosofie 2017 protocol

- Vooruitkijken
- Seismische ontwikkelingen plaatsen in model context maar ook historische context (en maatschappelijke context)
- Oog voor verontrustende/verrassende ontwikkelingen
- Concrete koppeling van maatregelen met ontwikkelende seismiciteit
- Gebaseerd op laatste geomechanische en statistische inzichten

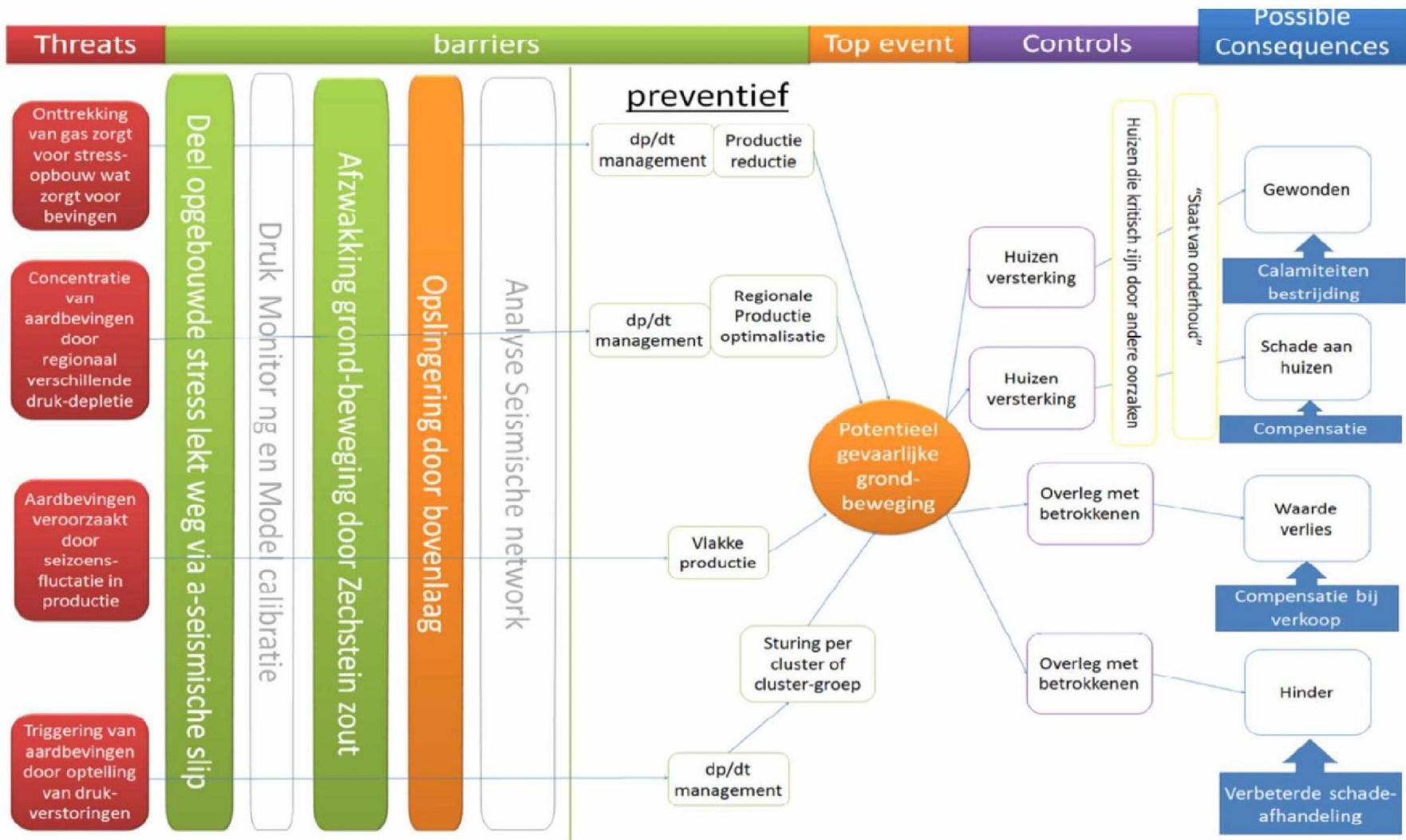
Veiligheid, schade en MRP

MRP

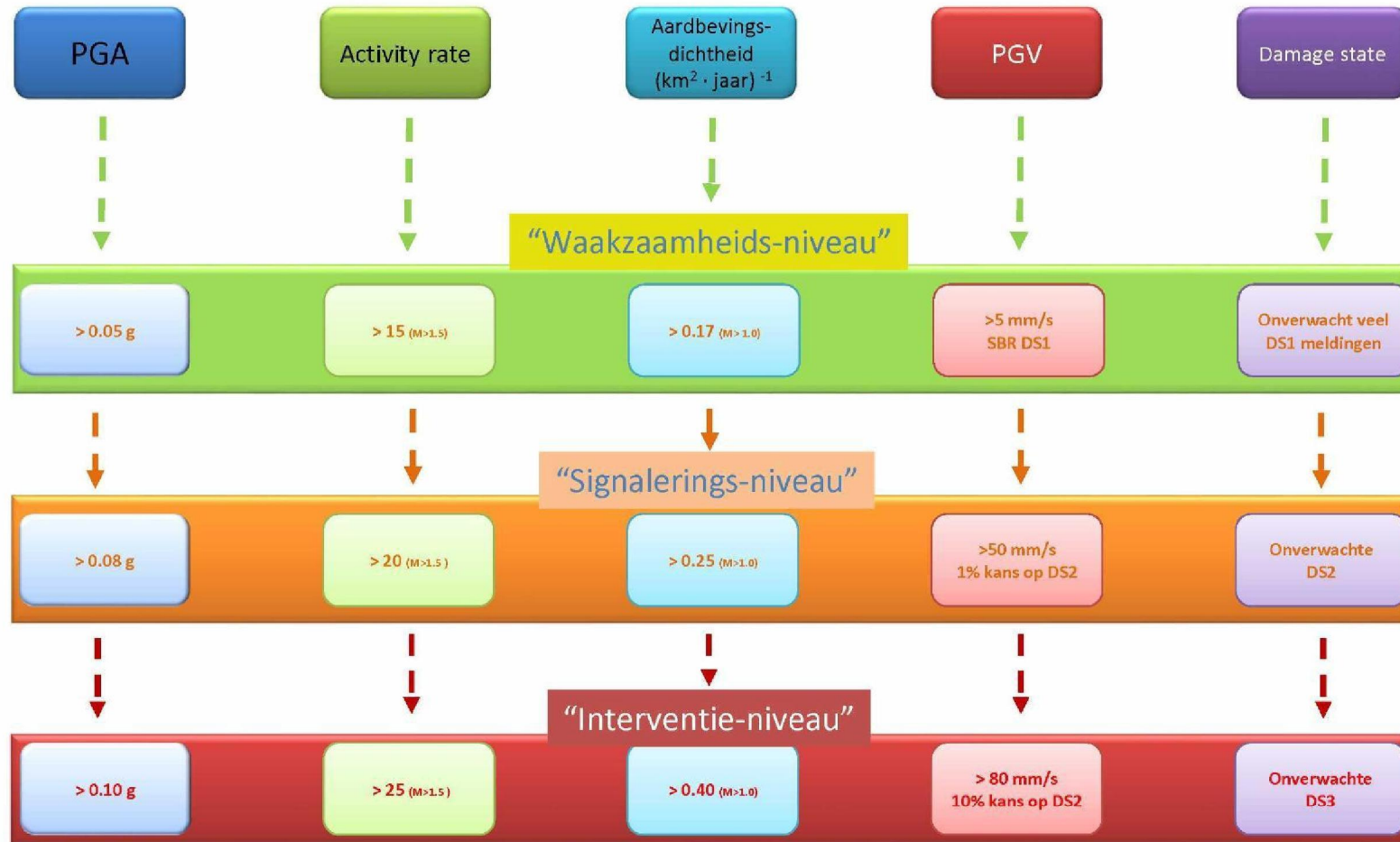
- Bedoeld om vroeg te intervenieren indien seismische ontwikkeling daar aanleiding toe geeft
- Bedoeld om afwijkende seismische ontwikkelingen vroeg te onderkennen
- Parameters gekozen met seismiciteit van 2013 in gedachte
- “Gevoel van veiligheid managen”
- Schade

Hazard and Risk model

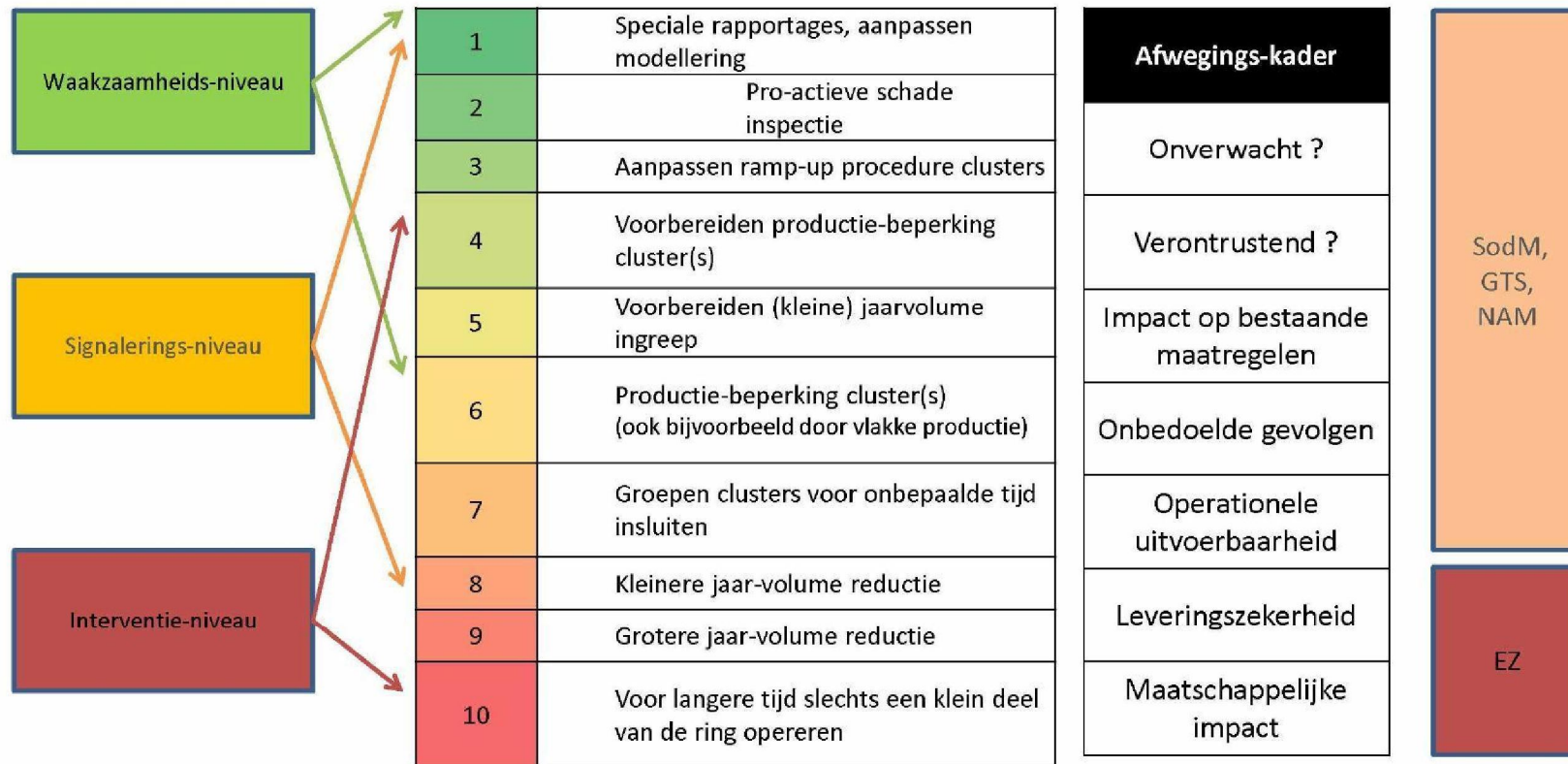
- Bedoeld om veiligheid uit te rekenen
- Om te toetsen aan de Meijdam norm – vergelijkbaar Schiphol en “overstroming”
- Statistische veiligheid voor de regio



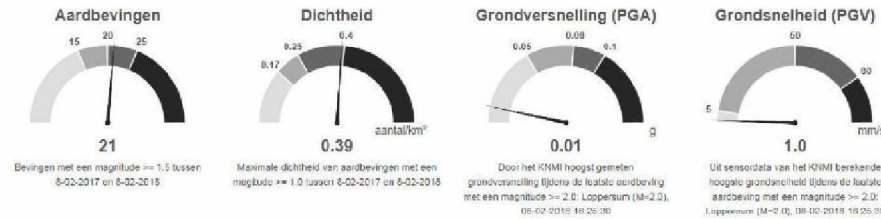
Structuur van het signalerings-systeem met voorgestelde grenswaarden



Koppeling signalerings-systeem met maatregelen

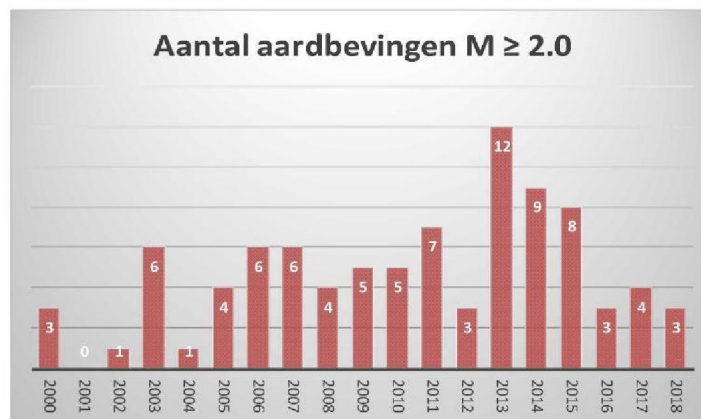
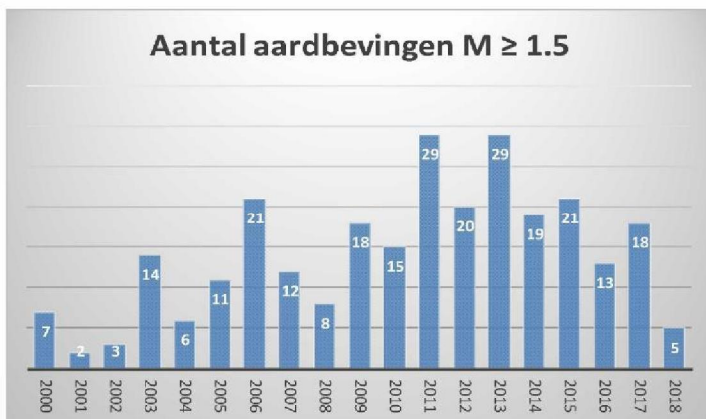
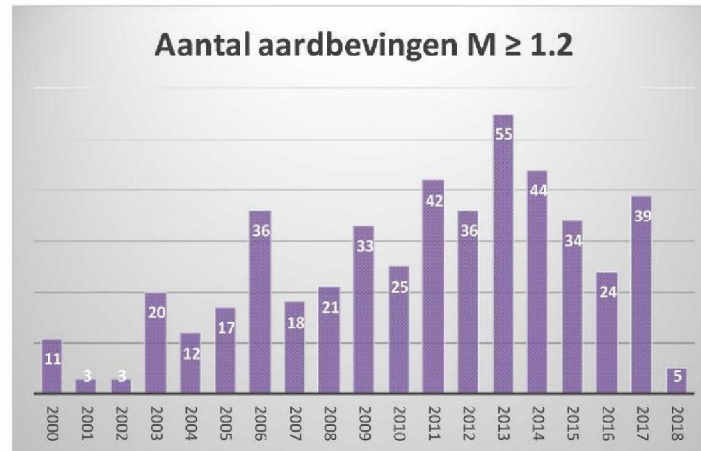
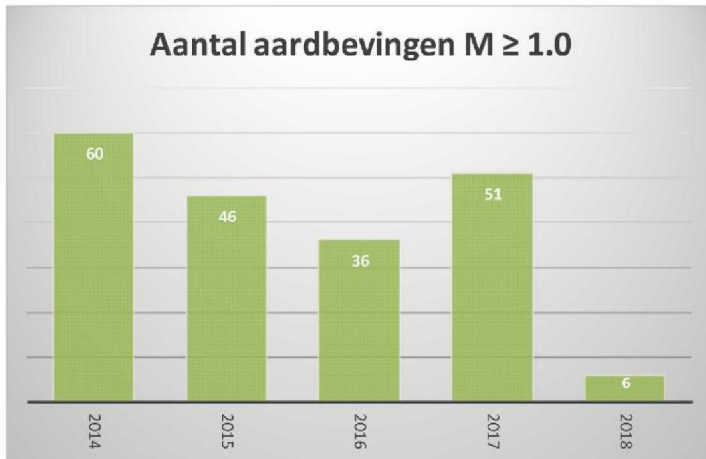


MRP PARAMETERS / HUIDIGE STAND VAN ZAKEN

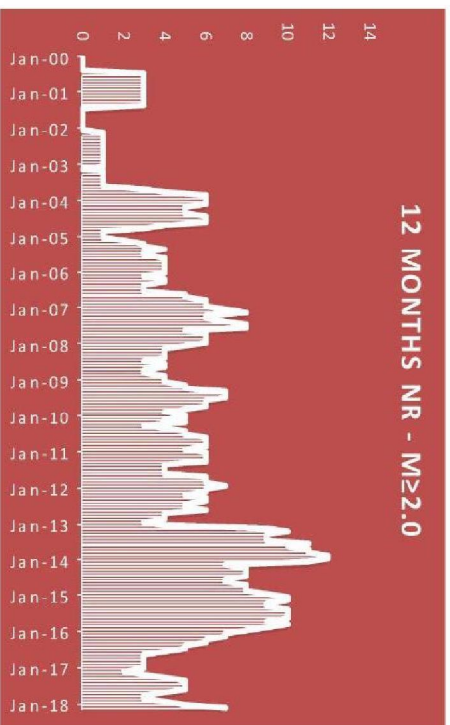
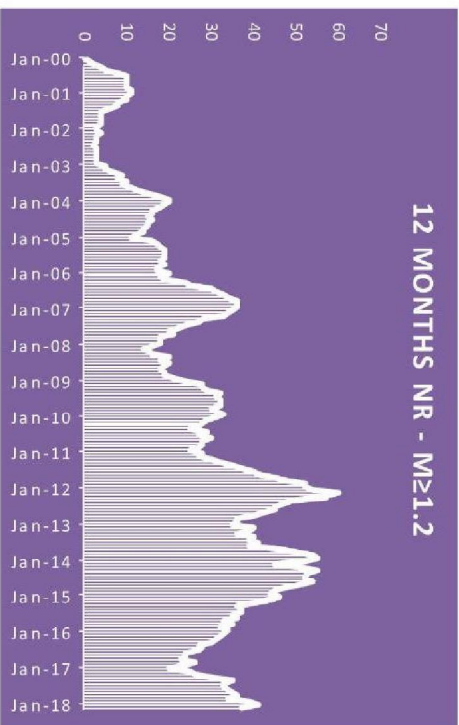
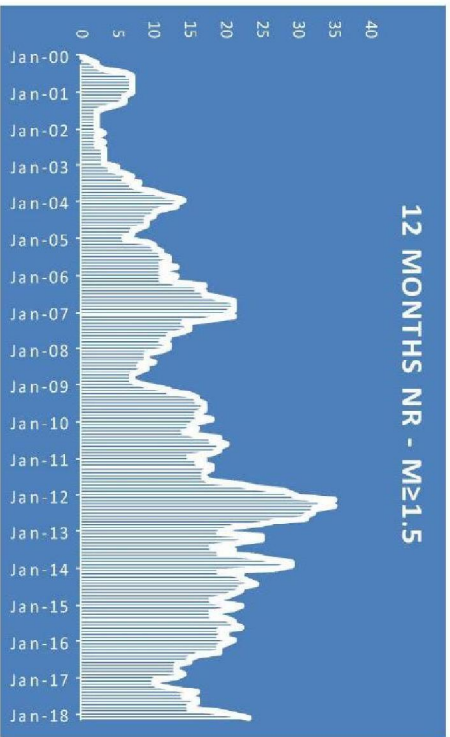


MRP status					
	10 Februari 2018	8 January 2018	Grenswaarden		
			Waakzaamheid	Signalering	Interventie
Activity Rate (# aardbevingen, $M \geq 1.5$)	21	19	15	20	25
EQ density (aantal \times km ⁻² jr ⁻¹ , $M \geq 1$)	0.39	0.38	0.17	0.25	0.40
PGA (in "g", laatste M2+)	0.005 (Loppersum)	0.11 (Zeerijs)	0.05	0.08	0.10
PGV (meest recente maximum, in mm/s)	1.0 (Loppersum)	32 (Zeerijs)	5	50	80
Damage State	DS1 ?	No DS2 observed (yet)	Δ (model, actual)		
Other patterns	Loppersum $M \geq 1$ trend	Loppersum $M \geq 1$ trend	"Expert Judgement"		

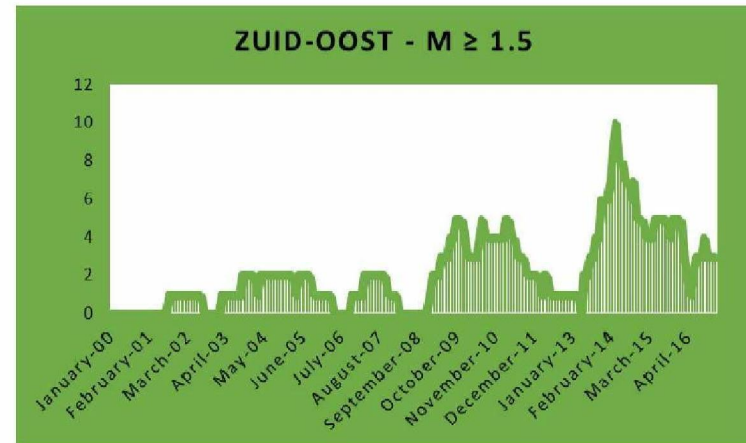
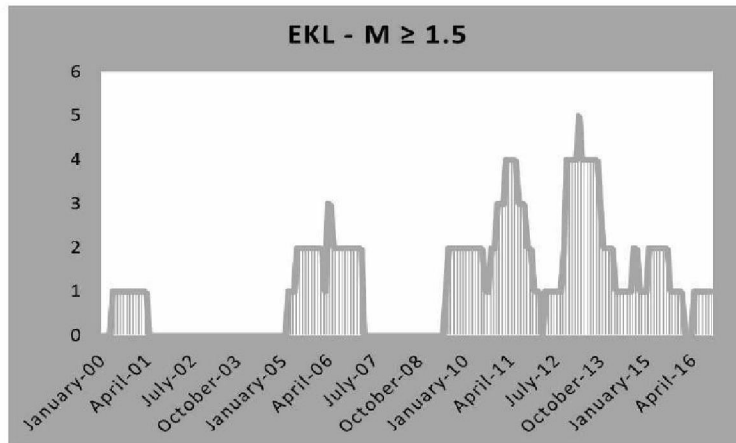
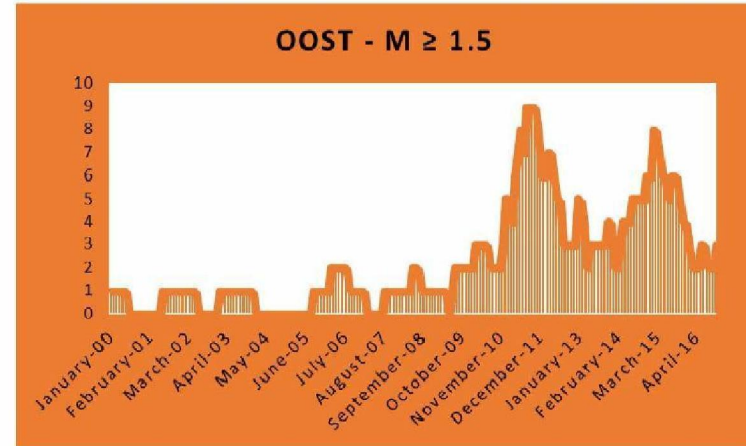
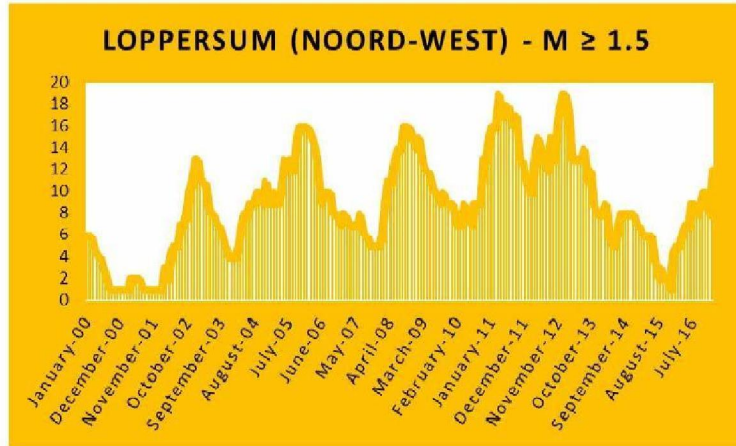
Context / history activity rate



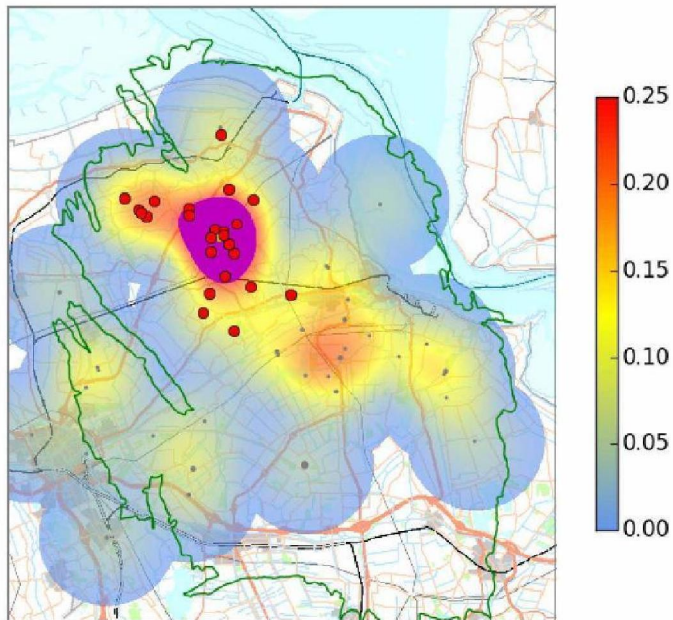
Context / history activity rate



Trends per region

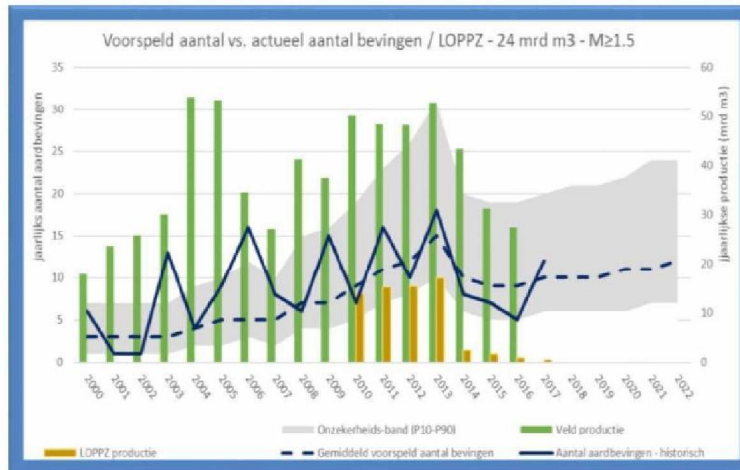
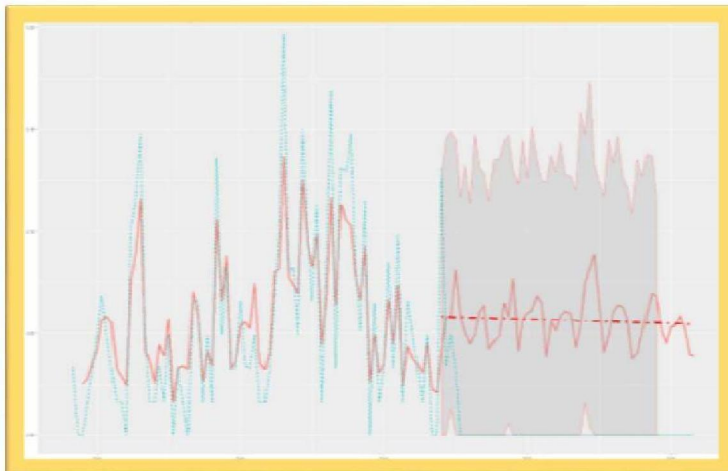
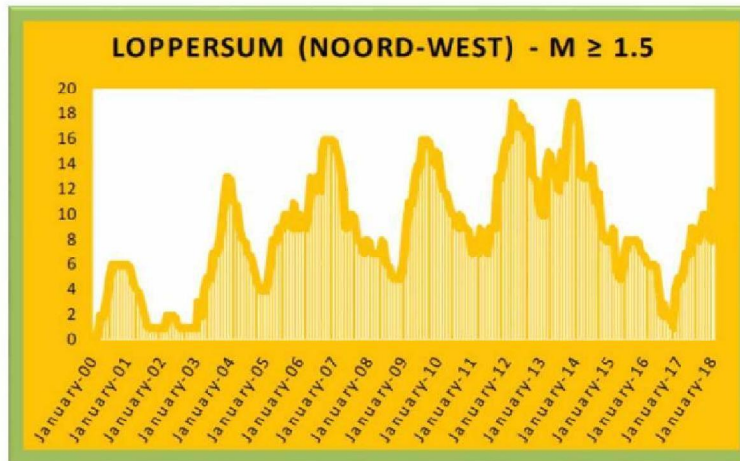
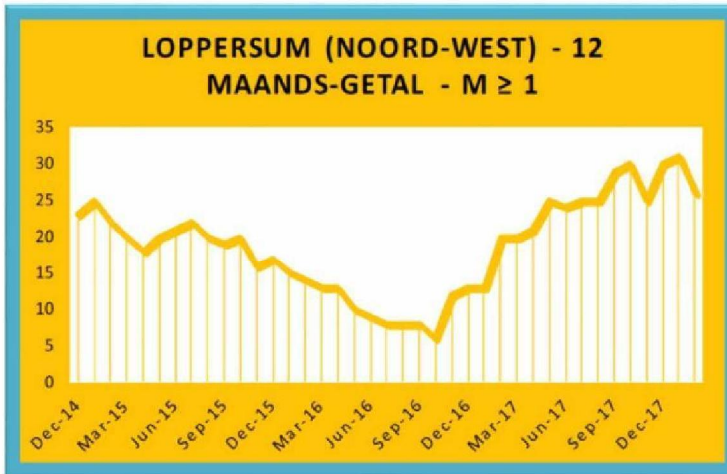


Aardbevingsdichtheden ($M \geq 1.0$, # km⁻² yr⁻¹)



Zijldijk	19-Feb-17	1.4
Loppersum	25-Feb-17	1.3
Zandweer	26-Feb-17	1.2
Wirdum	26-Feb-17	1.4
Zeerijp	11-Mar-17	2.1
Uithuizermeeden	13-Apr-17	1.4
Stedum	3-May-17	1.5
Rottum	14-May-17	1.4
Kantens	21-Jul-17	1.1
Loppersum	25-Jul-17	1.0
Garsthuizen	14-Aug-17	1.2
Appingedam	29-Aug-17	1.8
Zandweer	1-Sep-17	1.1
Garrelsweer	27-Sep-17	1.2
Kantens	15-Oct-17	1.0
Zeerijp	1-Dec-17	1.7
Zeerijp	1-Dec-17	1.3
't Zandt	6-Dec-17	1.8
't Zandt	10-Dec-17	2.1
Zeerijp	22-Dec-17	1.7
Zeerijp	29-Dec-17	1.4
Zeerijp	8-Jan-18	3.4
Loppersum	8-Feb-18	2.0
Garrelsweer	11-Feb-18	2.2

Trends for LOPPZ



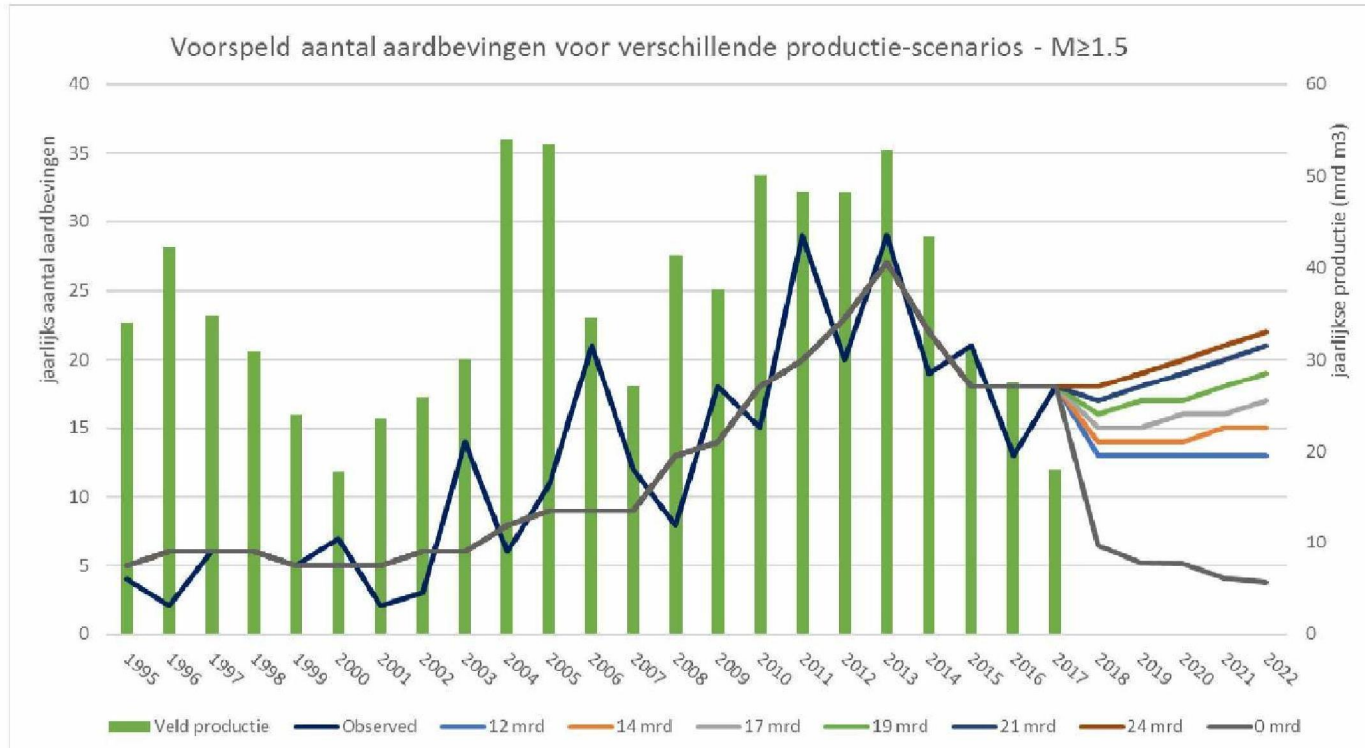
Elementen afwegingskader Zeerijp

- Another parameter of the MRP (Earthquake density) also approached the intervention-level
- An ongoing upward trend in Loppersum earthquakes has been observed (despite producing only a minimum of volume from local clusters).
- No anomalous PGA was observed (which means that GMPE is still valid)
- The duration of the actual seismic event was short (less than 1 second), as expected
- The probability of such an event happening has been estimated at >16%, i.e. such an event is likely to happen every 6 years.
- The probability of having higher magnitude earthquakes has not materially changed after this event
- No DS2 damage caused by the earthquake has yet been observed
- No new area has become seismically active,
- No special observations with respect to faults (this will be further studied)
- The current increase in seismicity was predicted by our model (NAM, 2017e), occurred actually somewhat later than predicted
- The predicted number of earthquakes in Loppersum shows a stabilization/slow increase rather than a steep increase.

MRP quantification of measures

Groningen Jaarvolume (bln Nm³)	% volume reduced	Activity Rate (jaar⁻¹)	Probability Earth-quake M ≥ 3.6	Earth-quake density (proportional) (km⁻² jaar⁻¹)	Earth-quake density (simulated) (km⁻² jaar⁻¹)
21.6	0%	18	16%	0.38	0.38
19.4	10%	14	12%	0.28	0.34
17.3	20%	13	11%	0.25	0.31
15.1	30%	11	9%	0.22	0.29
13.0	40%	10	8%	0.20	0.27
10.8	50%	9	7%	0.17	0.25
8.6	60%	8	6%	0.15	0.24
6.5	70%	6	5%	0.12	0.22
4.3	80%	5	4%	0.10	0.20
2.2	90%	4	3%	0.07	0.18
0.0	100%	3	2%	0.05	0.16

Context / effect van maatregelen



Vuistregel : 1 mrd m3 per jaar minder, om 1 beving van +1.5 minder te krijgen

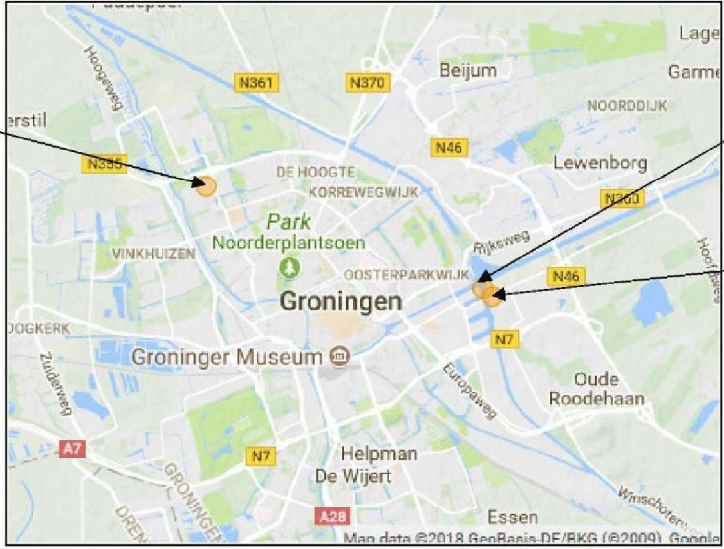
Groningen city Earthquakes

In the period 01-01-2017 to 15-02-2018, there were 3 earthquakes in the city of Groningen:

2017-10-29T11:04:29
 Place: Groningen
 Magnitude: 1.000567683
 Depth: 3

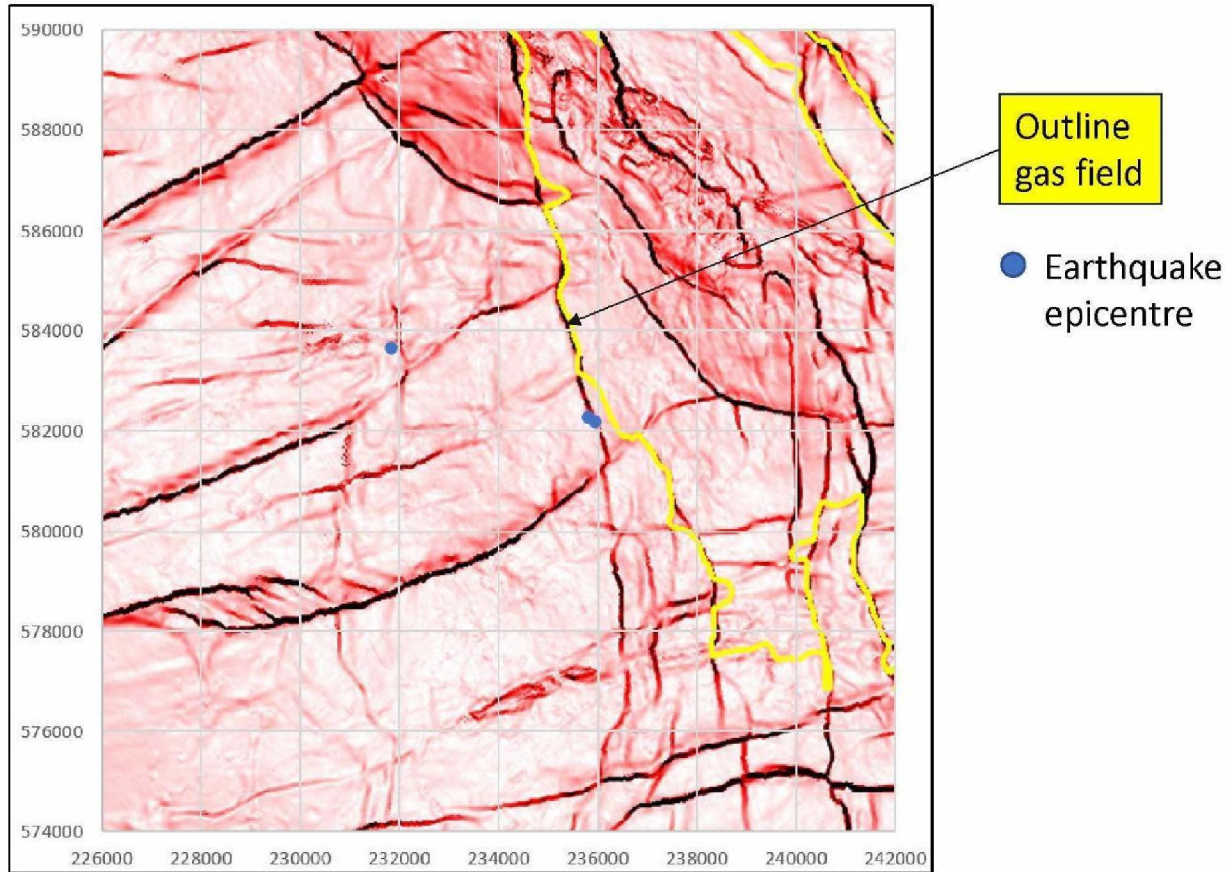
2018-01-17T04:37:39
 Place: Groningen
 Magnitude: 0.9810268737
 Depth: 3

2018-01-20T08:19:21
 Place: Groningen
 Magnitude: 0.9310600402
 Depth: 3

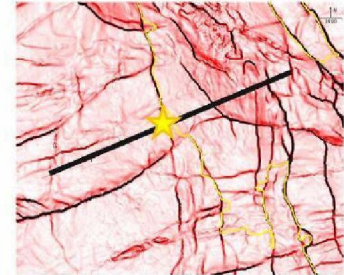


<input checked="" type="checkbox"/>	2018-01-20T08:19:21	0.9	MLn	53.2200	6.5990	3.0	Groningen	235939, 582168
<input checked="" type="checkbox"/>	2018-01-17T04:37:39	1.0	MLn	53.2210	6.5970	3.0	Groningen	235804, 582277
<input checked="" type="checkbox"/>	2017-10-29T11:04:29	1.0	MLn	53.2340	6.5360	3.0	Groningen	231840, 583659

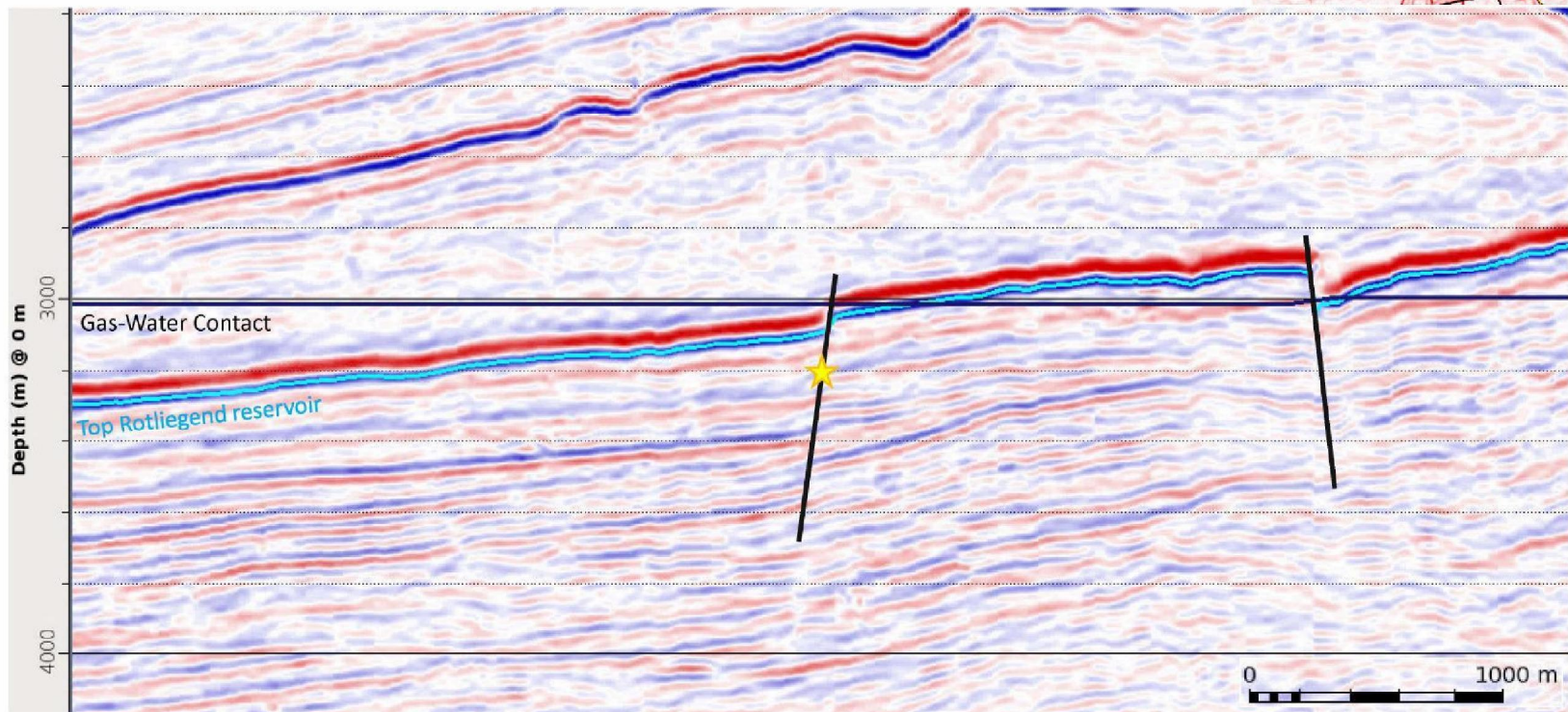
Dip map of the Top Rotliegend, indicating faults



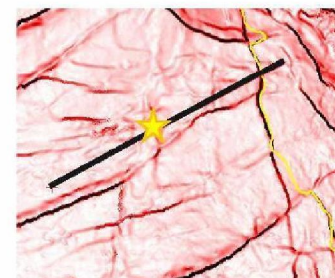
★ Two earthquakes at east side of Groningen city



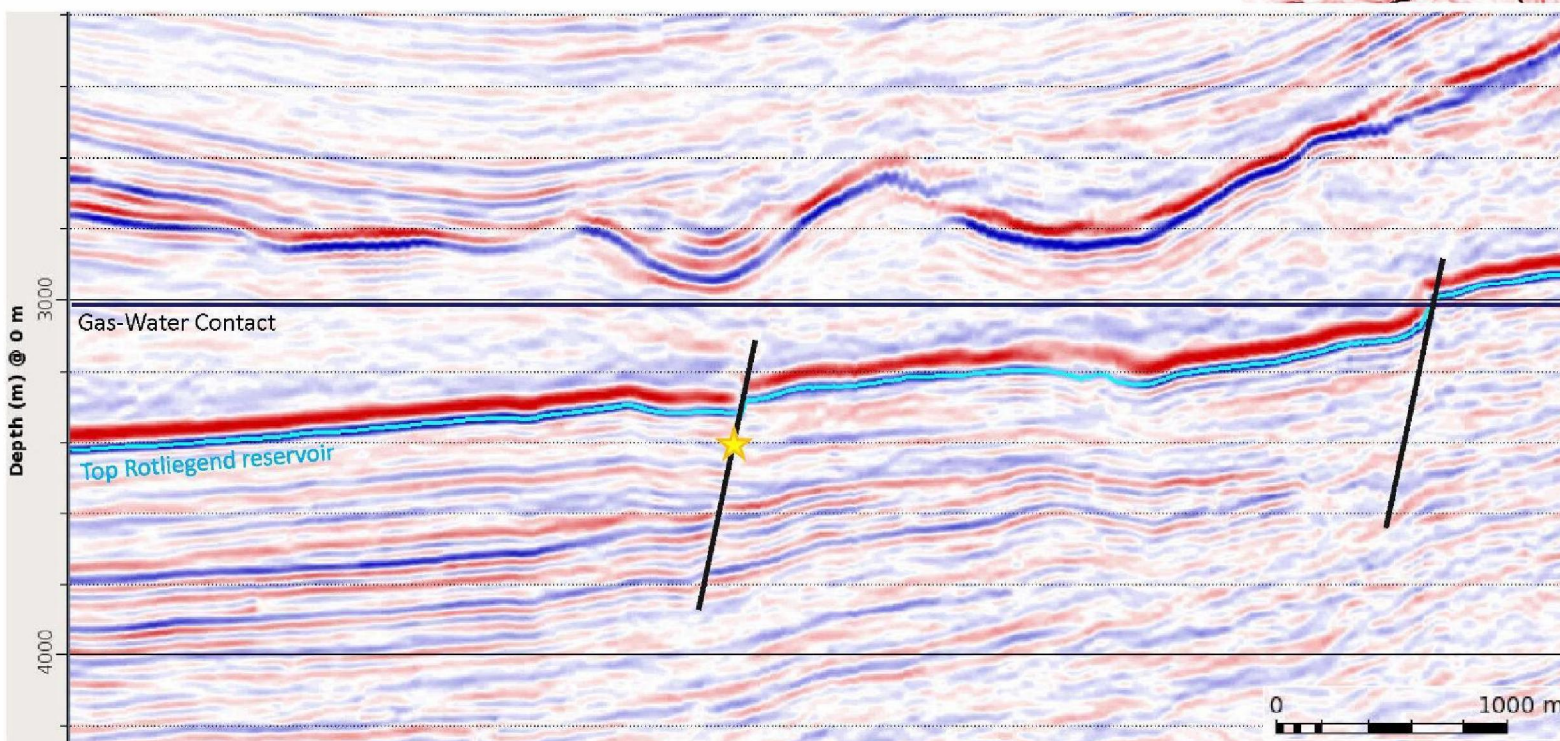
West to East cross section



★ Earthquake at Paddepoel, in waterleg

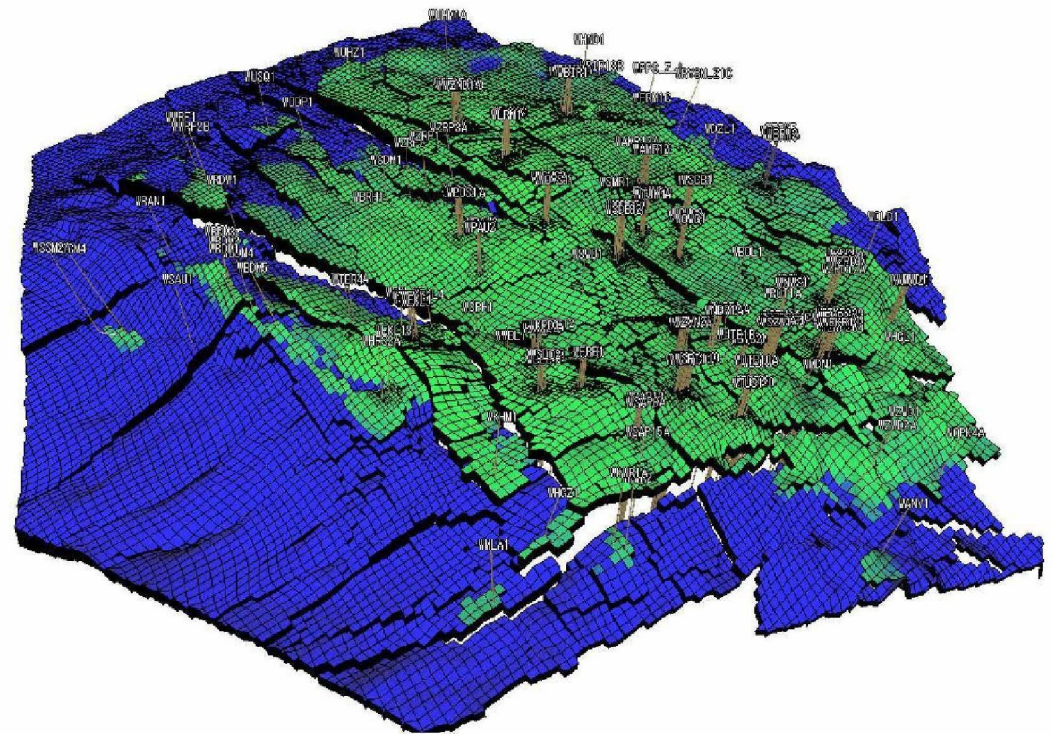
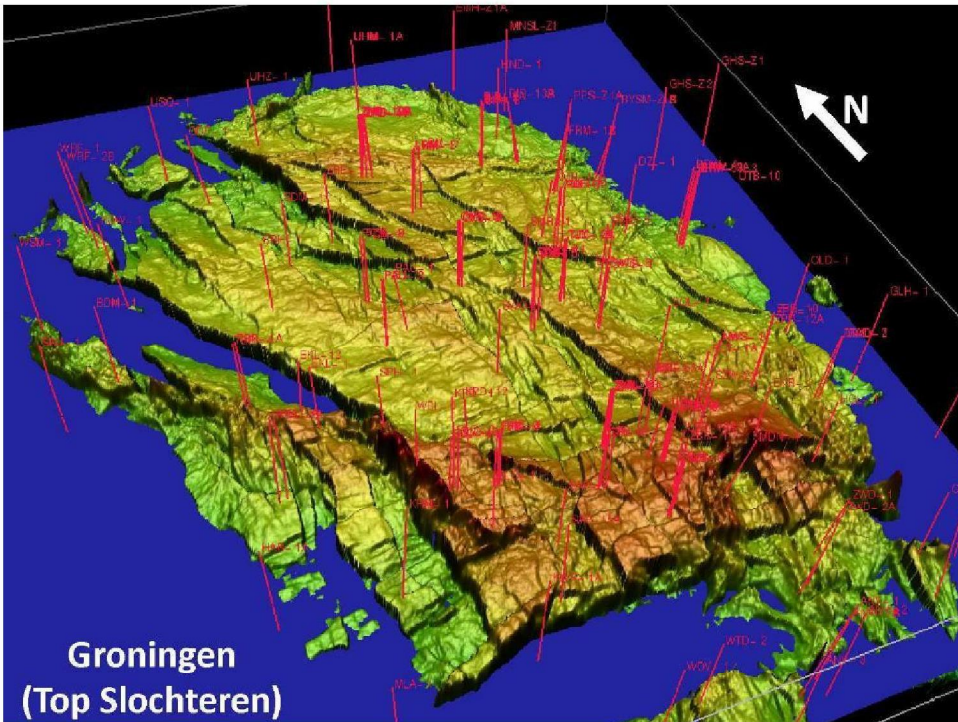


West to East cross section

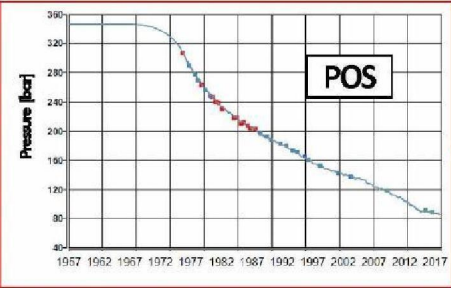


Groningen dynamic reservoir simulation model

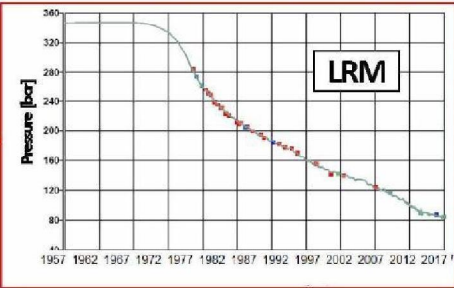
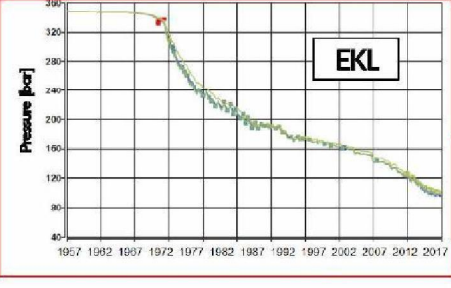
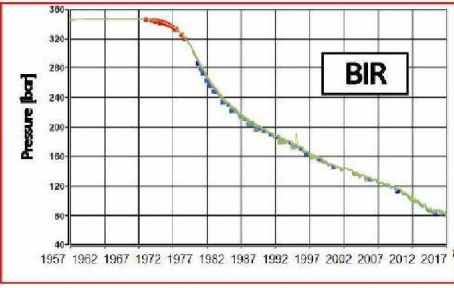
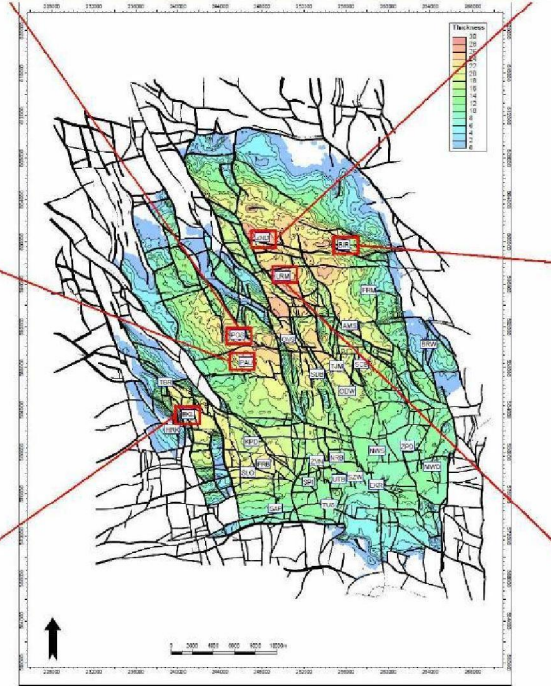
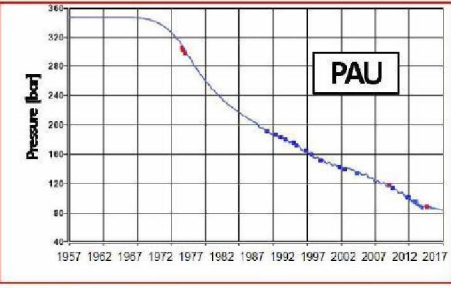
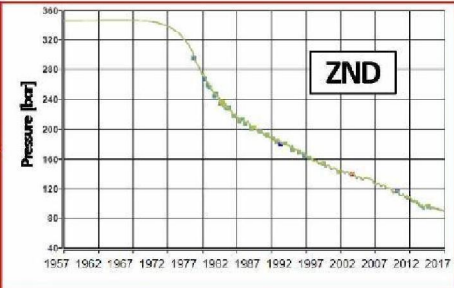
- Grid dimensions: 123 x 150 x 34
- Active gridblocks: 488,937
- Available dynamic data:
 - SPG: 1800
 - RFT: 41 wells
 - CITHP-to-BHP: >100,000 points
 - PNL/PNX: 220 surveys (30 wells)



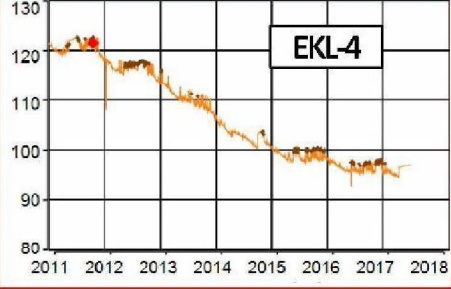
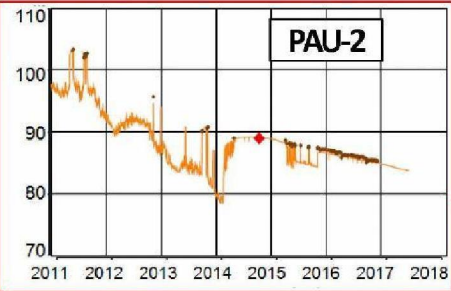
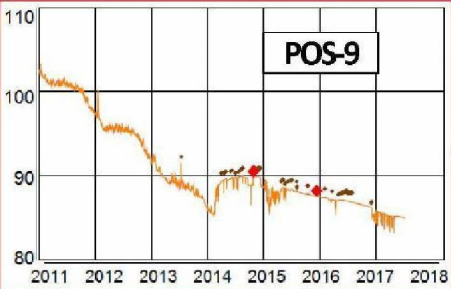
Dynamic model history match – SPG



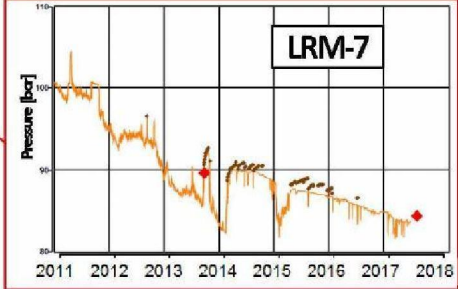
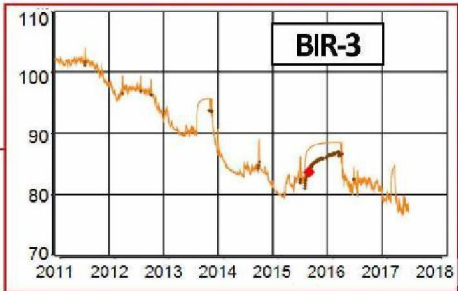
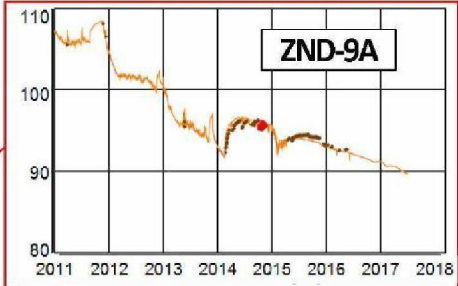
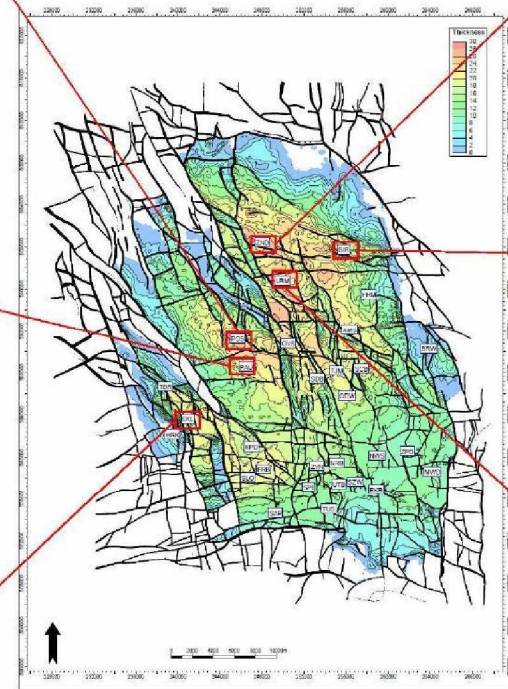
Parameter	Model		
	V2.5	V4	V5
SPG (bar)	2.2	2.3	2.1



Dynamic model history match – CITHP-to-CIBHP



Parameter	Model		
	V2.5	V4	V5
CIBHP (bar)	-	1.4	1.4

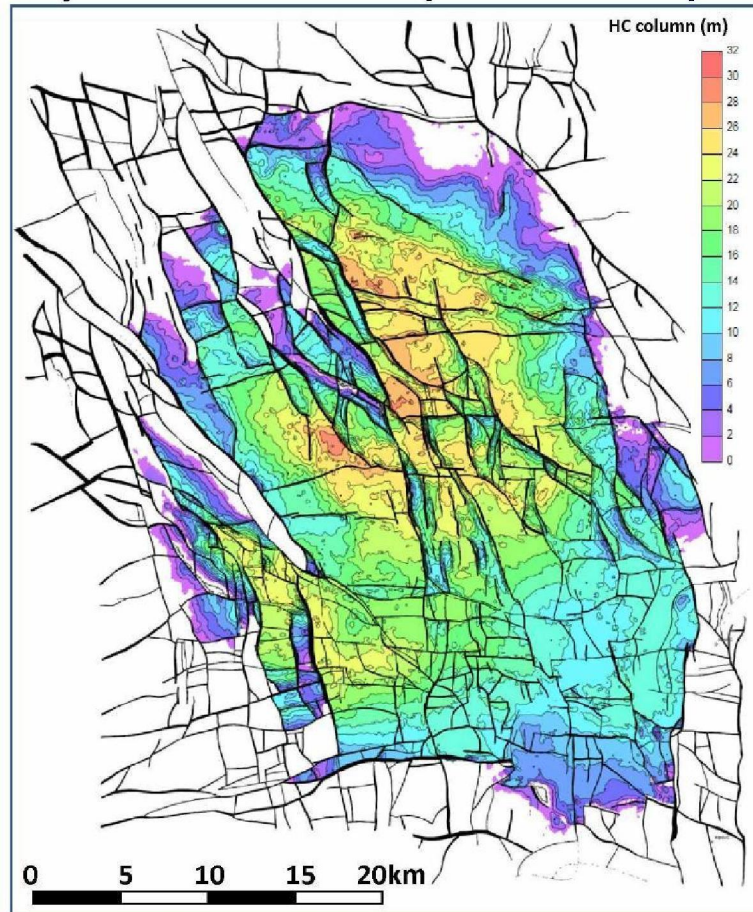


Groningen field in relation to Groningen city

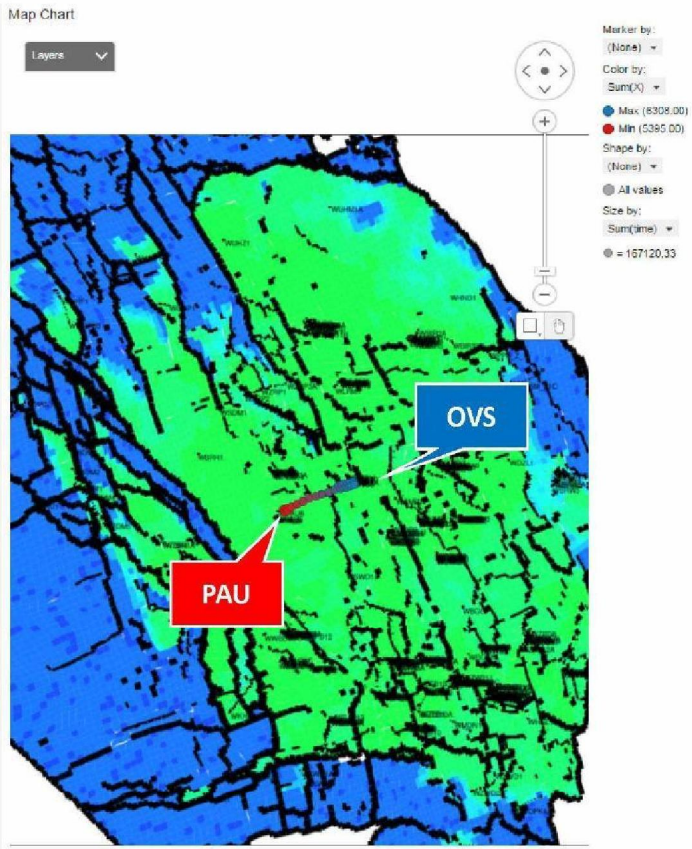
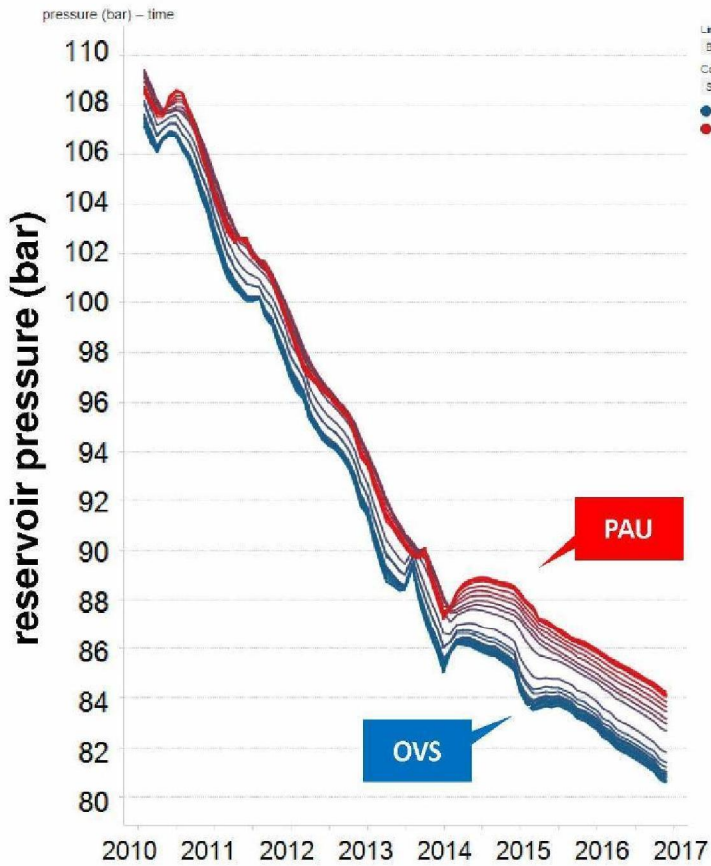
Production clusters



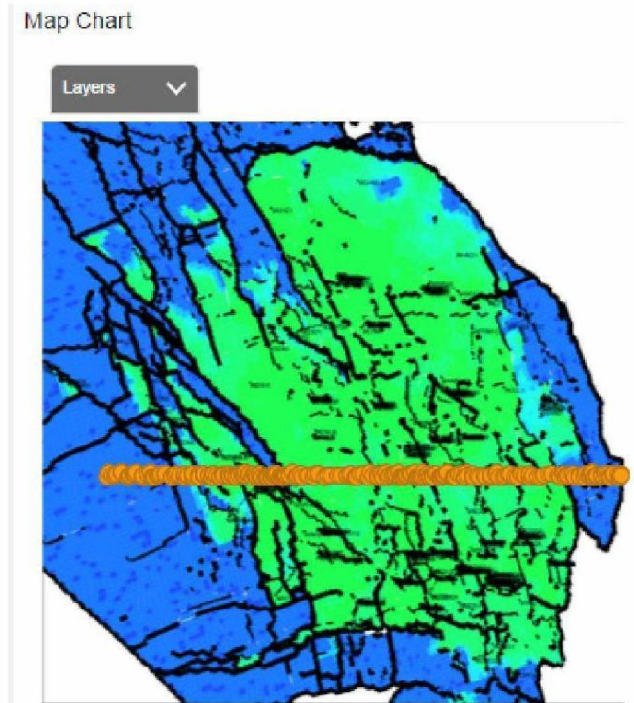
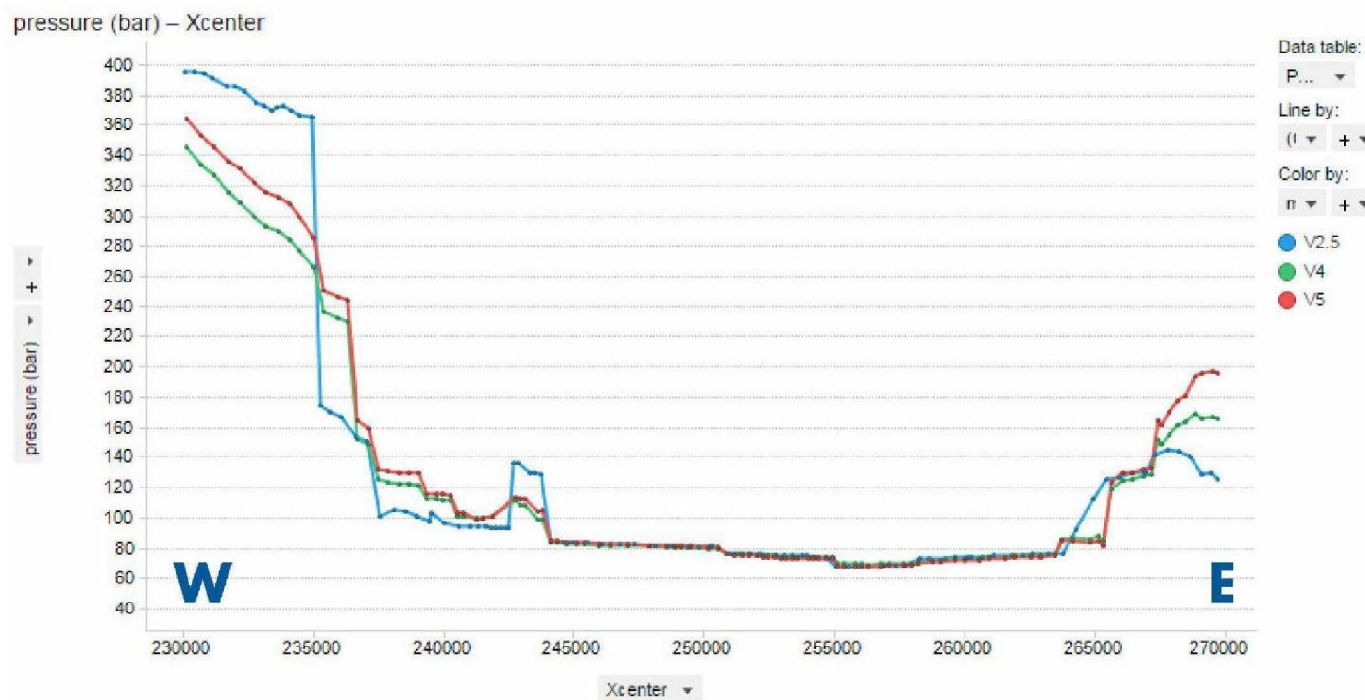
Hydrocarbon Column (Slochteren Fm)



Reservoir pressure within well control (V4)



Reservoir pressure from various model realizations



- Pressure tightly constrained in the gas leg, within area of well control
- Big uncertainty away from well control
- Big uncertainty in the water leg
- Loosely constrained by compaction match

Mechanisme (1)

Drukdaling is de drijvende kracht achter zowel bodemdaling als aardbevingen, en deze beperkt zich niet tot alleen de gashoudende lagen.

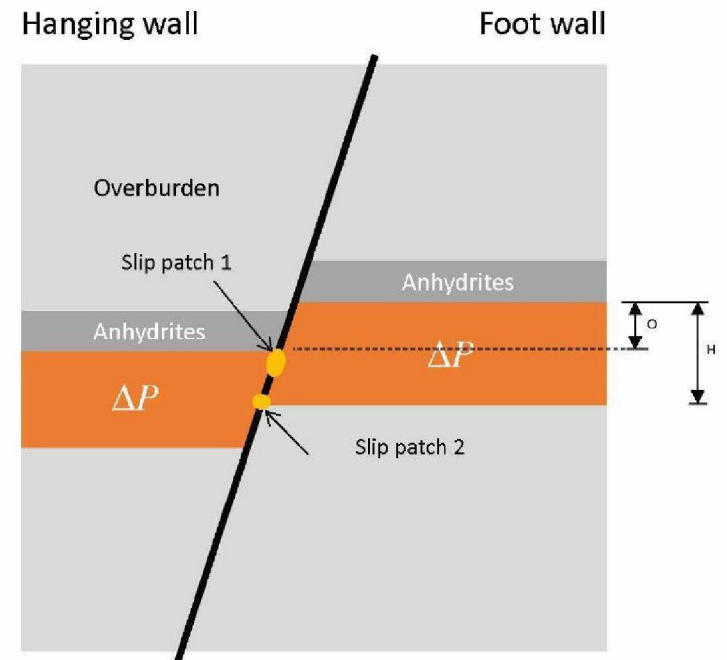
Ook de druk in aquifers daalt. Zowel history-matching van het reservoir model met bodemdaling gegevens alsmede Fibre-Optic compactie meetings tonen dit aan.

Dit betekent dat (schuif)spanningen oplopen in depleterende gas en water formaties alsmede langs aanwezige breuken.

In eerste instantie zal een breuk gaan slippen over een zeer klein oppervlak (<1m) waar de belasting door drukdaling de lokale schuifsterkte overschrijdt. Deze a-seismische slip gebeurt ongemerkt.

Het slip oppervlak zal toenemen met toenemende drukdaling. De breuksterkte in Groningen neemt zeer waarschijnlijk af als gevolg van de a-seismische slip. Deze veronderstelling is nodig om het voorkomen van aardbevingen (onder de stad Groningen) te kunnen verklaren.

Een aardbeving vindt plaats op een locatie waar de belasting de sterkte heeft overschreden, en waar de breuk is verzwakt (afnemende sterkte) door slip.

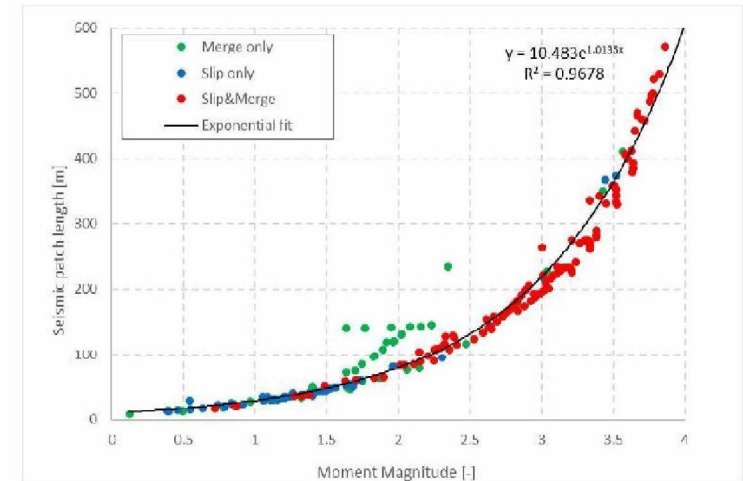


Mechanisme (2)

De grootte van de aardbevingen geeft een aanwijzing van de afmeting (diameter) van het seismische slip oppervlak. Deze is naar schatting tussen de 25 en 30 m voor $M_w=1.0$. De (maximale) seismische slip verplaatsing over dit oppervlak is naar schatting tussen 8 en 10 mm. Dit betekent dat de a-seismische slip patch bij het ontstaan van de aardbeving (een stuk) kleiner was, misschien minder dan 10 m.

De magnitude van de aardbeving geeft hierdoor ook een indicatie van de variabiliteit van de breuk sterkte: Bij de geldende reservoir druk zijn er drie lokaties (onder de Stad Groningen) met een grootte van naar schatting 15 m waar de breuk sterkte onvoldoende was om de schuifspanning te dragen. De drie aardbevingen hebben deze a-seismische oppervlakken doen groeien tot 25-30 m. De aardbeving is gestopt doordat het breukmaterial rondom de verzwakte a-seismische slip patch voldoende draagkracht heeft om de rotsmassa af te remmen. Kleine aardbevingen duiden op een relatief geringe sterkteafname van de breuk ter plekke.

Door de aardbeving zijn schuifspanningen verplaatst van de seismische slip patch naar het naast-gelegen breuk oppervlak. De grootte van dit gebied is vergelijkbaar met a seismisch slip oppervlak. Voortgaande drukkaling zal de belasting ook daar verder doen toenemen.



Activity rate

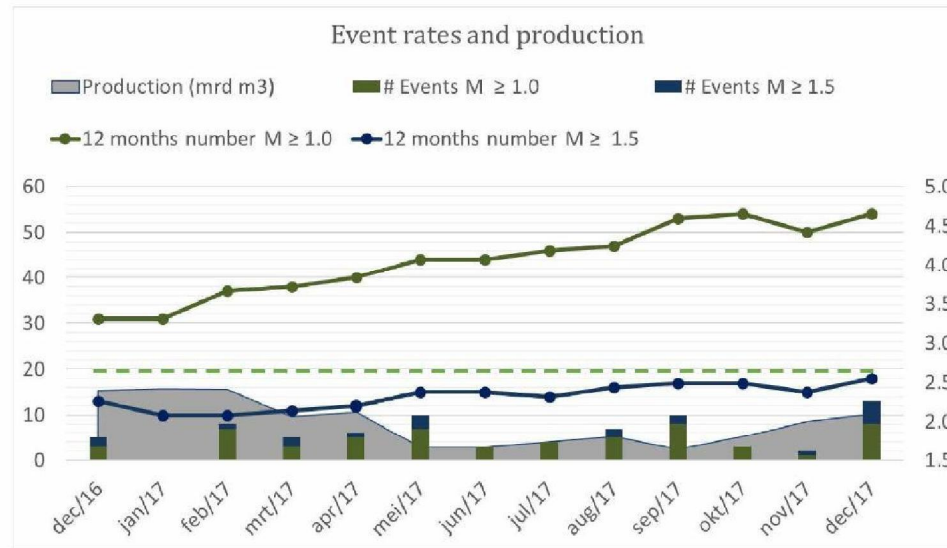


Figure 2. Earth-quake density (in space and time)

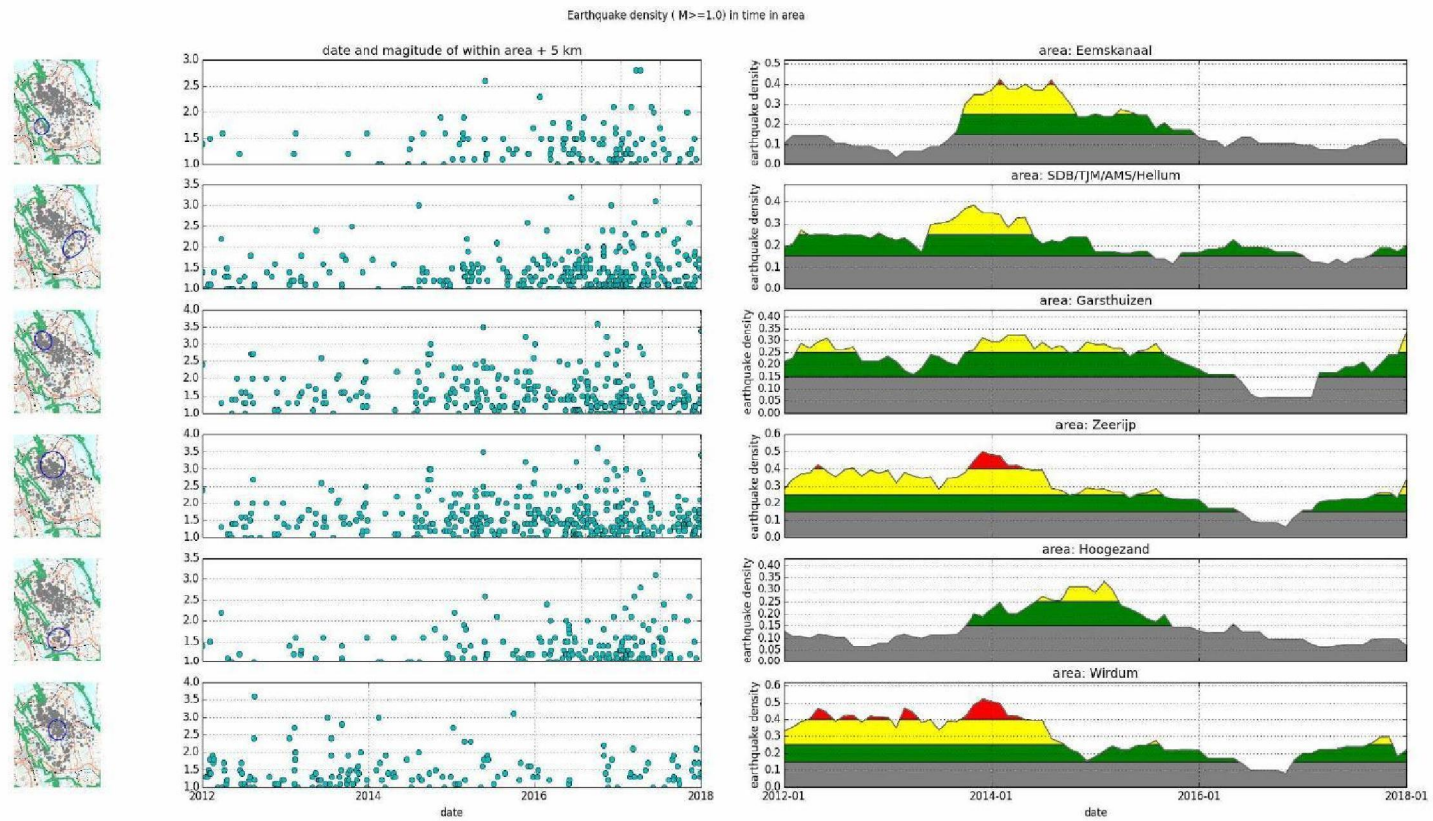


Figure 4. PGA

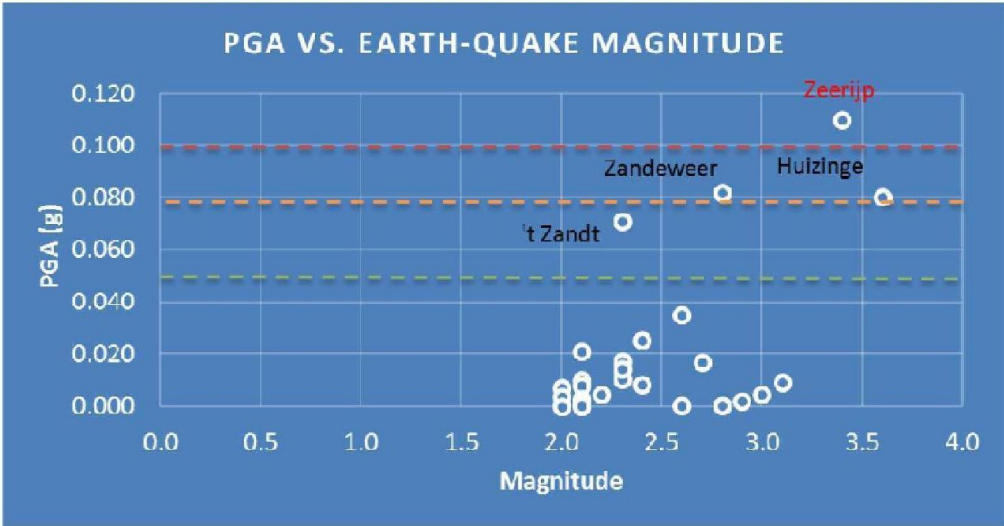
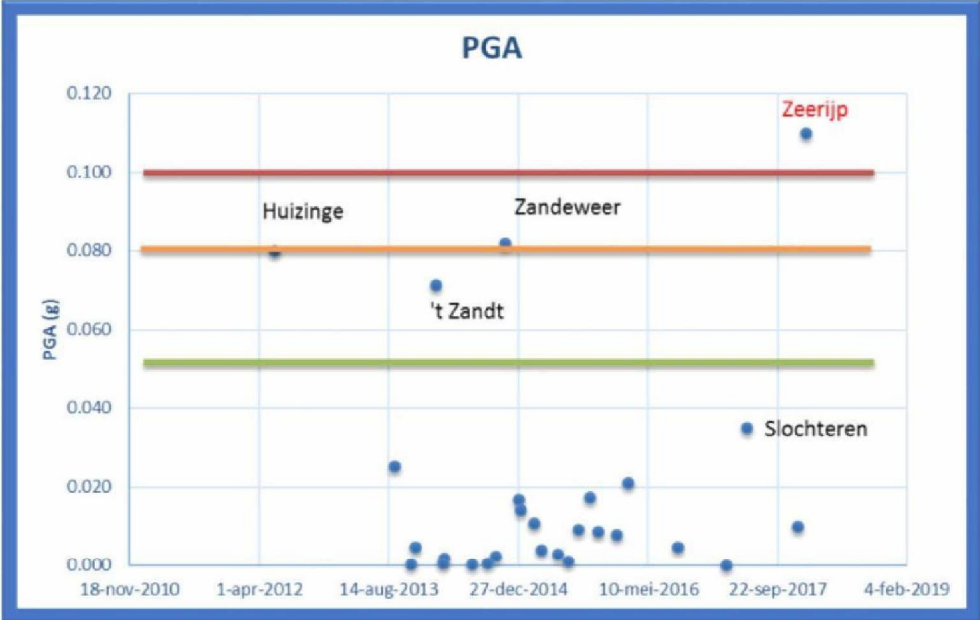
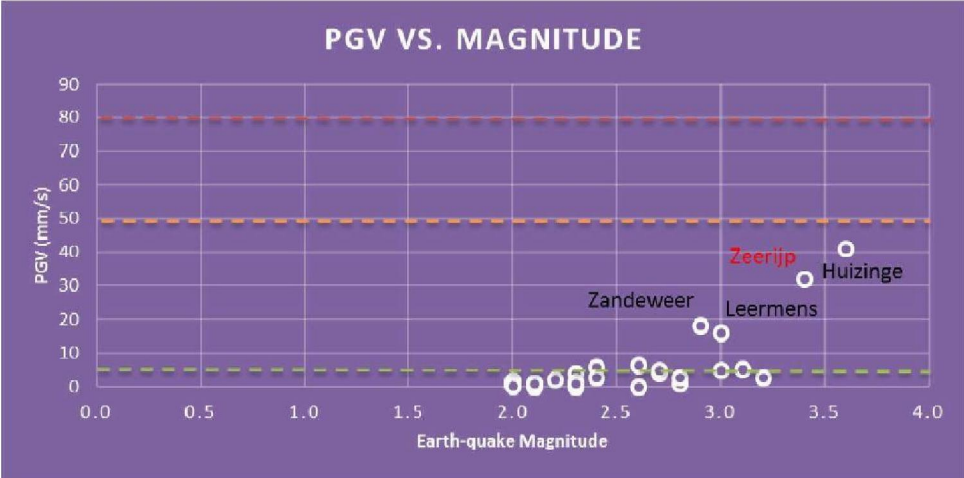
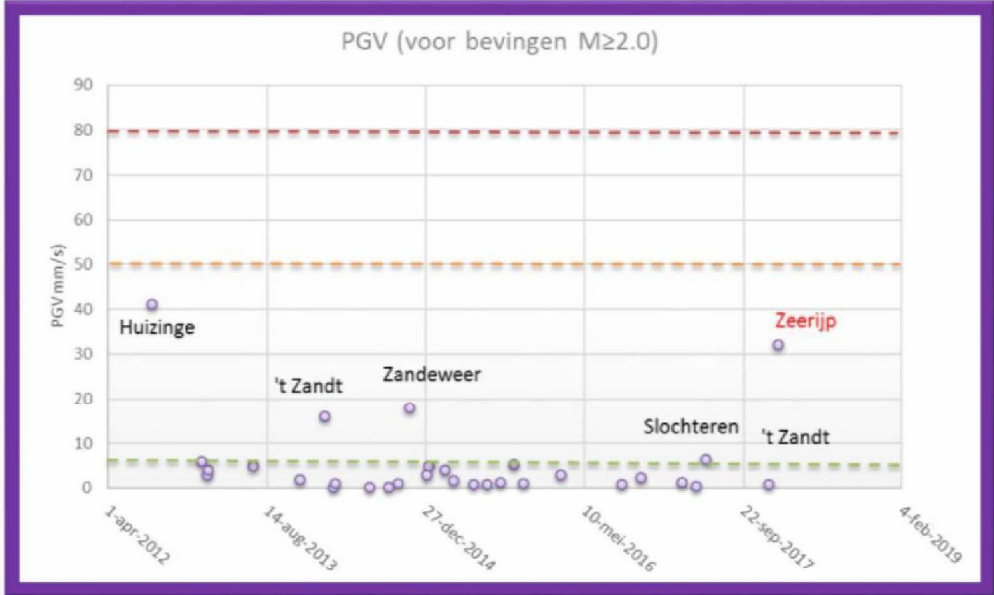
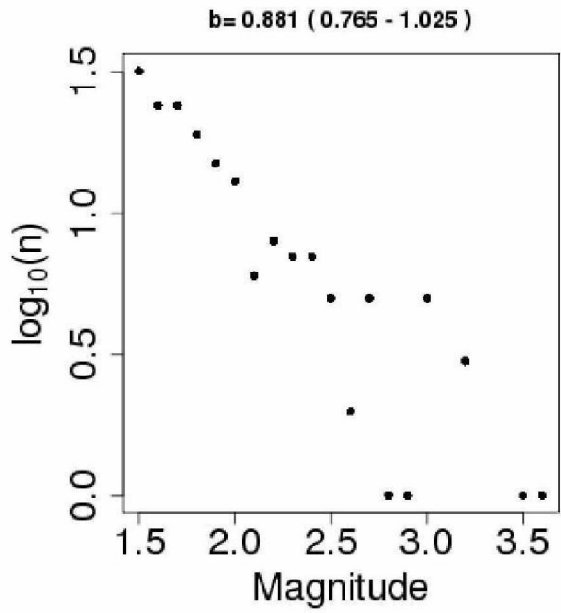
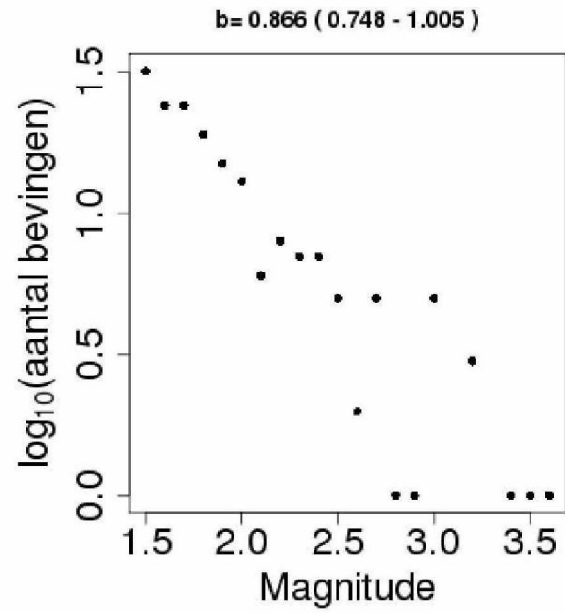


Figure 5. PGV



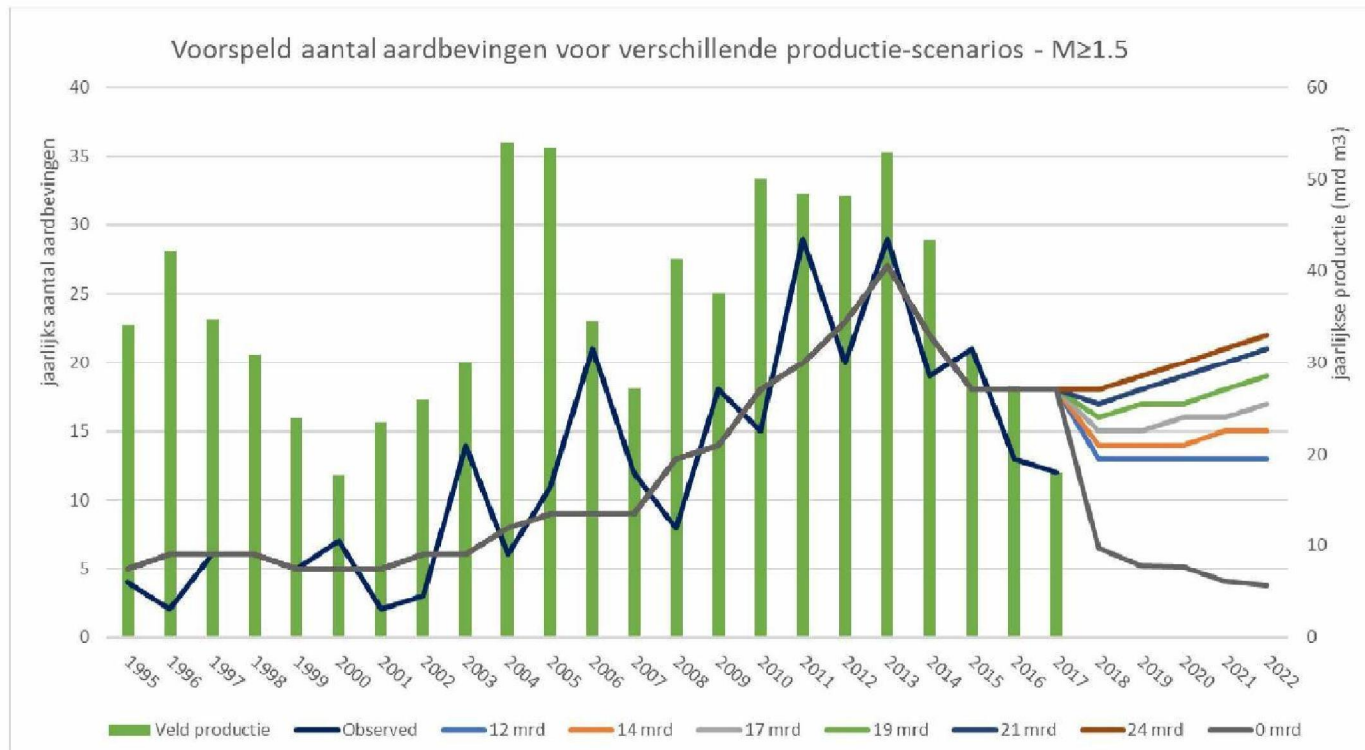


“Before”



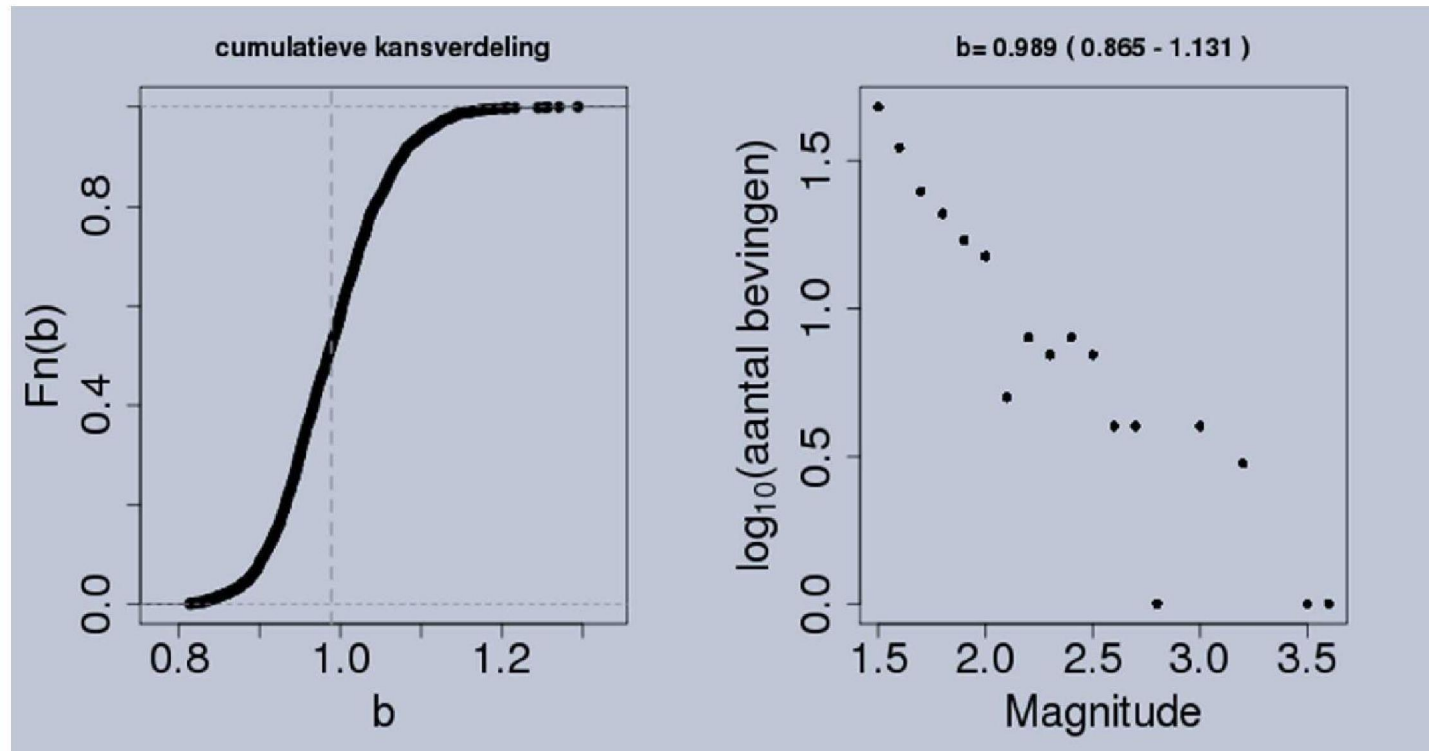
“After”

Context / effect van maatregelen



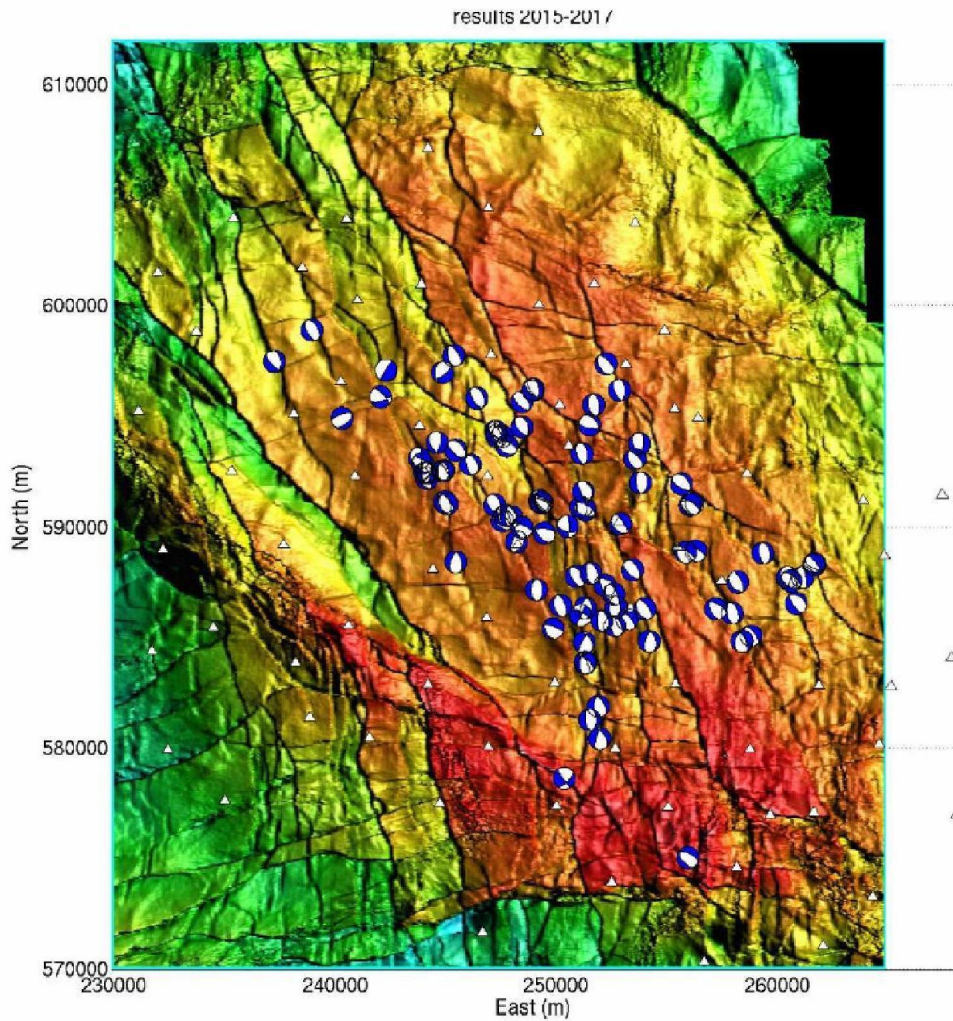
Vuistregel : 1 mrd m3 per jaar minder, om 1 beving van +1.5 minder te krijgen

Verhouding grote- en kleine bevingen



$$N = 10^{a-bM}$$

Lokatie van aardbevingen in de ondergrond (3km)



Full waveform re-location work:

Lining up on mapped faults

Onset of seismicity correlates with > 18 cm compaction

