NAM

Technisch Addendum bij het MR Protocol 2017

Mei 2017

Inhoudsopgave

1 Inleiding 5

2 Technische achtergrond: Samenvattingen geomechanisch en statistisch werk 6

2.1 Geomechanische modellen 6

2.2 Statistisch werk 8

2.3 Voorspelling grondbeweging 9

3 Onderbouwing signaalparameters 11

3.1 Inleiding 11

3.2 Waarden van de signaalparameters op 3 niveaus 11

3.2.1 Parameters op het eerste niveau: het waakzaamheidsniveau (groen) 11

3.2.2 Parameters op het tweede niveau: het signaleringsniveau (oranje) 13

3.2.3 Parameters op het derde niveau: het interventieniveau (rood) 15

3.3 Onderbouwing van de signaalparameters 16

3.3.1 PGA 16

3.3.2 Activity rate 18

3.3.3 Aardbevingsdichtheid 19

3.3.4 PGV 21

3.3.5 Damage State 22

4 Speciale en periodieke rapportages 24

4.1 Speciale rapportage 24

4.2 Periodieke rapportage 26

5 Operationele en opgelegde productiebeperkingen 27

5.1 Beperkingen aan Productie 27

5.2 Productiebeperkingen uit het instemmingsbesluit 27

5.3 Beperkingen van het Groningen Productiesysteem 28

6 Productieoptimalisatie 30

7 Kwaliteitsborging 31

8 Verwijzingen naar meer informatie 35

8.1 Rol van het dreigings- en risicomodel voor geïnduceerde bevingen in Groningen 35

8.1.1 Opbouw van het Model 35

8.1.2 Gegevensvergaring - specifieke meetcampagnes 35

8.1.3 Gegevensvergaring - Monitoring 36
8.1.4 Borgingsprocessen 38
8.1.5 Kwaliteitsbewaking 38
8.1.6 Optimalisatie van de verdeling van de productie 38
Referenties 39

1 Inleiding

Op 1 mei 2017 heeft de NAM het Meet- en Regelprotocol behorende bij het Winningsplan Groningen Gasveld 2016 ingediend bij Staatstoezicht op de Mijnen (verder: “SodM”) Het Meet- en Regelprotocol gaat vergezeld met dit Technisch Addendum waarin technische verdieping en achtergronden zijn gegeven ten behoeve van het Meet- en Regelprotocol. Het Technisch Addendum maakt onderdeel uit van het Meet- en Regelprotocol.

Dit Technisch Addendum geeft een overzicht van de achtergronden bij de bepaling van de signaalparameters en de maatregelen die mogelijk zijn indien er aanwijzingen zijn dat ingegrepen moet worden in het productiesysteem van het Groningenveld. Verder wordt de kwaliteitsborging verder besproken en worden er verwijzingen naar meer informatie gegeven. Dit betreft zowel de achtergronden van de modellen die gebruikt worden en de controles die daar aan zijn gekoppeld, als de afwegingen bij de keuze voor de regelmaatregelen.

In hoofdstuk 2 zal eerst worden ingegaan op de modellen en statistische achtergronden die gebruikt zijn als theoretische basis bij het opstellen van het Meet- en Regelprotocol. Deze achtergronden zijn gebruikt bij het identificeren van categorieën van maatregelen die kunnen worden genomen om de seismiciteit te beïnvloeden (paragraaf 4.4 van het Meet- en Regelprotocol). In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op de theoretische achtergronden van de parameters die worden gebruik om de seismiciteit te monitoren (paragraaf 6.3 van het Meet- en Regelprotocol). In hoofdstuk 4 worden de rapportages besproken die NAM oplevert en in hoofdstuk 5 de productiebeperkingen voortvloeiend uit het Instemmingsbesluit en het Groningen productiesysteem. Hoofdstuk 6 spreekt over de productie optimalisatie en hoofdstuk 7 gaat vervolgens in op de kwaliteitsborging. Hoofdstuk 8 tenslotte is het overzicht van de referenties.

2 Technische achtergrond: Samenvattingen geomechanisch en statistisch werk

2.1 Geomechanische modellen

Deze paragraaf bevat een samenvatting van een deel van het recente studiewerk, met name het deel dat de conceptuele basis vormt voor het Meet- en Regelprotocol. Deze modellen zijn gepubliceerd in wetenschappelijke peer-review journals, en representeren de huidige stand van wetenschap. Bij deze samenvatting ligt de nadruk op het vinden – en beargumenteren – van aanknopingspunten voor een Meet- en Regelprotocol. De modellen die genoemd worden in dit hoofdstuk zijn gebruikt bij het identificeren van categorieën van maatregelen die kunnen worden genomen om de seismiciteit te beïnvloeden.

Een volledige beschrijving van de modellen wordt gegeven in de referenties in hoofdstuk 8 van dit Technisch Addendum. De rapporten over de studies die aan de modellen ten grondslag liggen zijn beschikbaar op www.nam.nl. Deze paragraaf duidt zo veel als mogelijk waarom studies soms wel en soms niet direct een basis vormen voor het Meet- en Regelprotocol.

De reden dat ervoor is gekozen om een groot pallet aan theoretische achtergronden te beschouwen als basis van het Meet- en Regelprotocol, is dat NAM probeert de seismiciteit op elke tijd- en ruimteschaal te begrijpen en daarmee uiteindelijk hoopt te kunnen beïnvloeden (binnen de beperkingen die er inherent aanwezig zijn). Ieder model dat genoemd wordt, dekt een ander deel van het spectrum: het ene model kijkt alleen in groot detail naar seismiciteit op een enkele specifieke breuk, een ander model juist globaal naar de seismiciteit over het hele veld. In dit hoofdstuk ervoor gekozen om een opsomming te geven van de verschillende klassen van modellen die gebruikt worden in de Hazard and Risk analyse en voorspelling en daarnaast de modellen voor het onderzoek naar het fysische gedrag van breuken.

Tabel 1 geeft een viertal klassen van modellen, op te delen in drie types, die voorspellingen doen over de event-rate en over welk deel van de opgebouwde stress/strain seismiciteit veroorzaakt.

Het eerste type modellen, Model 1 en Model 2, gebruiken onder andere bodemdalings- en compactiedata (en bodemdalings- en compactievoorspellingen) om de seismiciteit te verklaren en te voorspellen. De belangrijkste kracht van vooral Model 2 is de geomechanische basis, de solide statistische analyse en de zorgvuldige kalibratie aan aardbevingsdata. Deze modellen geven een statistisch compleet beeld van toekomstige seismiciteit en de onzekerheden daarin. Vooral dat laatste is ook heel belangrijk voor kwantitatieve dreigings- en risicoanalyse.

Deze modellen geven een goede verklaring voor de waargenomen toename van seismiciteit in het verleden en geven aan dat drukdaling, bodemdaling en seismiciteit belangrijke monitoringsparameters zijn. De belangrijkste voorspelling die deze modellen doen is dat seismiciteit zal toenemen met toenemende gasproductie. De hoeveelheid seismiciteit per tijdseenheid kan worden beïnvloed door productiebeperkende maatregelen, maar de hoeveelheid seismiciteit per eenheid compactie veel minder.

Deze seismologische modellen zijn een onderdeel van de berekeningsketen voor de Hazard and Risk analyses. Zie voor de berekeningsketen Hoofdstuk 8.1, referenties 3 en 4. Voor de seimische modellen wordt verwezen naar hoofdstuk 8.1, referenties 32 en 33.

Model	Method	Strengths	Weaknesses	Forecast characteristic	Protocol consequence
Model 1: Stochastic-mechanical model of seismogenic reservoir strain partitioning	Exponential trend in total seismic moment density relative to reservoir compaction	Probabilistic model based on Kostrov's method for seismic strain and modified to include an empirical exponential trend between the observed geodetic and seismic reservoir strains.	Difficult to achieve robust maximum likelihood estimates due to the complexity of total seismic moment distributions. Spatial bias as the maximum seismicity and maximum compaction centers not co-located. No aftershocks.	Forecasts depend on the production scenario. Limited sensitivity to alternative production scenarios due to large stochastic variability and exponential trend.	Foundation of Probabilistic Seismic Hazard Assessments in WP2013.
Model 2: Stochastic-mechanical model of fault failure cascades within a smoothed-reservoir shear strain field	Poisson Point Process with exponential reservoir shear strain trend and Epidemic Type Aftershock Sequences	Based on the physics of initial failures within a heterogeneous fault network and elastic thin-sheet reservoir deformations. Includes aftershock processes and b-value covariation with reservoir deformation. Out-performs alternative models in prospective tests.	Resolution limited by the small number of observed events. *Forecasts* the spatially and temporally smoothed probability densities of earthquakes. Unable to *predict* individual earthquakes on individual faults. Large epistemic uncertainty in the maximum possible earthquake magnitude.	Forecasts depend on the production scenario. Limited sensitivity to alternative production scenarios due to large stochastic variability and exponential trend. Forecast response to Loppersum production constraint consistent with subsequently observed seismicity.	Probabilistic forecasts inform the choice of appropriate event rate thresholds. Foundation of Probabilistic Seismic Hazard and Risks Assessments in WP2016. Informs options for seismic hazard and risk mitigation decisions.
Model 3: Rate and State models with explicit faults	Deterministic geomechanical model using rate and state friction law	Fault based; Works directly with stress-based slip criterion for a single fault; explains moment release rate dependence initial off-set	Calibration; relies on largely unknown fault properties (friction coefficients and orientations)	Unable to show a relation between short-term production fluctuations and seismicity	Focus on longer-term trends and measures ?
Model 4: 2D/3D deterministic finite element scenario models	Solves full set of consititutive, kinematic and equilibrium equations;.	Identification of fault instabilities; interaction of instabilities between faults. In theory able to analyse impact production rate on seismic events	Calibration. Difficult to constrain fault-slip properties and initial stress-state. Deterministic only.	Can analyse impact of production rate on re-occurence of seismic events	Relationship between fault properties and event rate in different parts of the field

Tabel 1 Overzicht van klassen van seismische modellen.

Met het tweede type modellen (Model 3), "rate-and-state friction" modellen, kan in principe het gedrag van een individuele breuk bestudeerd worden. De twee belangrijkste voordelen van dergelijke modellen zijn dat direct gebruik gemaakt wordt van breukgeometrieën en dat het effect van productiesnelheid op stressontwikkeling op de breuk gemodelleerd kan worden. Het belangrijkste nadeel is dat deze modellen erg gevoelig zijn voor de (onbekende) breukeigenschappen en dat daarmee de voorspellende waarde niet voldoende is voor direct gebruik in dit protocol.

Het derde type modellen (model 4), "finite element scenario models", geven een fysisch meer gedetailleerd beeld. Deze modellen zijn in theorie met bijna perfecte statische en dynamische kennis van

alle belangrijke breuken in het veld in staat om de impact van productie op ontwikkelende seismiciteit op een naburige breuk te modelleren. Ook voor deze modellen geldt dat de voorspellende kracht onvoldoende is voor gebruik in het Meet- en Regelprotocol. Het nut van de modellen in deze twee klassen is voornamelijk gelegen in dat ze de mogelijkheid bieden de fysische processen die ten grondslag liggen aan de seismiciteit te onderzoeken.

De belangrijkste nadelen van dit type modellen is het gebrek aan kalibratie (met name de initiële stresscondities op de breuk), de grote berekeningsopgave met lange computertijden die een inschatting van de onzekerheid met een Monte Carlo-procedure uitsluiten en de hoge eisen die gesteld worden aan het model van de breuken en de eigenschappen ervan. Het directe gebruik van deze modellen in dit protocol is beperkt tot specifieke analyses aan breuken (speciale rapportage) en het bekijken of hypocentra stelselmatig op eenzelfde breuk plotten.

2.2 Statistisch werk

Tabel 2 hieronder geeft een samenvatting van het statistische werk dat gedaan is om de effectiviteit van productie-ingrepen te onderzoeken en relaties te leggen tussen bepaalde (signaal)parameters.

Study	Topic	Method	Strengths	Weaknesses	Main conclusions
1	Activity Rate	Verschil in gemiddelden (Bayes change Point)	Independent test on actual change point	Geen test Poisson validity	"Evidence for changes in 2003 and 2014 event rates (M>1.5, 1,0)"
2	Correlation production / AR	Cross-correlation (instantaneous, delay)	Pre-processing	Natural variability not addressed, no statistical test on strength correlation	"Strong evidence for seasonality, correlated with production swing"
3	Activity Rate	Compare observation with modeled outcomes (5 simple models)	Tried a distribution-free approach; simulated natural variability	Answers a different question ?	"Decrease in Loppersum event count"
4	Correlation reservoir pressure / AR	Cross-correlation; pressures and hypocentres to detect trends	Novelty approach; Simulated variability (space and time)	No test on significance; explanation locations with large depletion but no EQ	"Earth-quakes strongly related to pressure fluctations"
5	Activity Rate	Null-hypotheses based on Poisson model; test difference mean inter-event time	Test on distribution; test on significance; addresses natural variability	Test for difference in means; not for rate change; test may have low power	"Evidence for decrease in Loppersum event count; M>1"
6	Correlation production / AR	Null hypothese formulering op basis van Poisson model	Addresses natural variability; all assumptions statistically tested	Non-spatial approach	Only some evidence for seasonality M<1 events; also diurnal

Tabel 2 Overzicht van statistische analyses. More background for studies 1-6 can be found in refeences 1-5.

Studie 1 heeft geprobeerd om aan te tonen dat er in de geschiedenis van de seismiciteit in Groningen er bepaalde momenten zijn aan te wijzen waarop de seismiciteit significant verschilde van een periode ervoor of erna. Volgens deze studie was de hoeveelheid seismiciteit significant verschillend rond 2003 en in 2014. De verandering in 2014 wordt in studie 1 toegeschreven aan de verlaging van productie in 2014. Hoewel er statistisch wat kanttekeningen geplaatst kunnen worden (zie tabel 2) en associatie niet per se correlatie betekent, volgt het huidige Meet- en Regelprotocol studie 1 in de claim dat productie-ingrepen (in ieder geval een tijdelijke) invloed kunnen hebben op seismiciteit en dat daardoor productieverlaging

een valide ingreep is om seismiciteit te beïnvloeden. Dit is in feite ook consistent met de modellen 1 en 2 uit tabel 1.

Studie 2 heeft geprobeerd om een relatie te leggen tussen seizoensfluctuaties en de hoeveelheid seismiciteit. De studie claimt een sterke relatie te zien. In het Meet- en Regelprotocol wordt de lijn gevolgd dat productievariaties zo veel mogelijk vermeden moeten worden, maar de statistische basis en de geomechanische onderbouwing is zwakker dan bij de relatie tussen (totale) veldproductie en seismiciteit.

Studie 3 heeft geprobeerd aan te tonen dat de seismiciteit rond Loppersum significant is afgenomen sinds de Loppersum-ingreep. Het Meet- en Regelprotocol volgt de claim dat seismiciteit rond Loppersum inderdaad is afgenomen (studie 5 maakt een zwakkere, maar analoge claim). De correlatie met de productie-ingreep is niet “bewezen” (zeker niet voor events M≥1,5) maar wordt wel sterk gesuggereerd.

Studie 4 heeft geprobeerd aan te tonen dat er een sterk verband is tussen drukfluctuaties in het reservoir en seismiciteit. Dit is conceptueel geen grote stap bezien vanuit de geomechanische modellen (tabel 1), hoewel het mogelijk slechts één van de parameters is die seismiciteit beïnvloedt.

Studie 5 heeft ook gezocht naar statistisch sluitend “bewijs” voor een afname in het aantal Loppersum-aardbevingen en vond dat inderdaad voor bevingen met een magnitude groter dan 1,0. Voor een subset, bevingen groter dan 1,5, was dat statistisch minder duidelijk. Voor het Meet- en Regelprotocol betekent dit dat ermee rekening moet worden gehouden dat de Loppersum-ingreep minder effectief was dan gehoopt. Het monitoren van aardbevingsdichtheid in het Loppersum-gebied en aanvullende statistische testen (met meer data) kunnen deze onzekerheid verder verkleinen.

Studie 6 ten slotte heeft gekeken naar de relatie tussen seismiciteit en seizoensproductie. Deze studie zet vraagtekens bij de invloed van seizoensproductie op seismiciteit. Dat sluit ook aan bij geomechanisch werk dat eerder al aangaf dat de seizoensfluctuaties te kleine drukverstoringen teweegbrengen om seismiciteit significant te kunnen beïnvloeden. Voor het protocol betekent dit dat deze claim met enige regelmaat getest zal moeten worden.

Deze zes studies en de in paragraaf 2.2. beschreven modellen geven voldoende aanleiding om aan te kunnen nemen dat het Groningen productiesysteem in zekere mate regelbaar is. Deze set aan studies en modellen vormt dan ook de basis voor het Meet- en Regelprotocol.

2.3 Voorspelling grondbeweging

De laatste belangrijke vraag betreft de hoeveelheid grondbeweging die voorspeld wordt. Tabel 3 geeft een overzicht van de steeds verbeterde modellen die hiervoor ontwikkeld zijn. Belangrijk voor de ontwikkeling van deze modellen zijn:

- Beschikbare hoeveelheid seismische data. Vooral na uitbreiding van het KNMI-netwerk worden de aardbevingen op veel meer plaatsen geregistreerd dan voorheen.
- Grondonderzoek om de lokale grondbeweging beter te kunnen begrijpen en voorspellen. Dit gaat zowel om gedetailleerde kaarten en modellen van de ondiepe ondergrond als metingen van de eigenschappen van de verschillende grondlagen.

- Modellering van de voortplanting van seismische golven van de bron in het diepe reservoir naar het aardoppervlak.

De *ground motion prediction equation* (model voor de grondbeweging als gevolg van een seismische gebeurtenis) is in de afgelopen jaren sterk doorontwikkeld en bevat nu een model voor de reflectie en spreiding van de seismische golven (bijvoorbeeld door de Zechstein-formatie), voor de effecten door de lokale bodemgesteldheid en de afmetingen van de rupture. Belangrijke voorspelde grootheden zijn de Peak Ground Acceleration (PGA), de duur van de grondbeweging en de Peak Ground Velocity (PGV). PGA en PGV zijn daarom ook een signaalparameter in het Meet- en Regelprotocol. De in tabel 3 genoemde modellen versie V2 en V3 hebben ook gebruik gemaakt van inzichten verkregen door simulatie van seismische golven door de diepe ondergrond.

Model	Method	Strengths	Weaknesses	Protocol consequence
V0	Gebaseerd op lokale observaties voor kleinere bevingen en analogie met tectonische bevingen in zuid-europa.	Practische methode gegeven de korte tijd beschikbaar voor ontwikkeling. PGA en PGV.	Geen model voor de ondiepe en diepe ondergrond van Groningen gebruikt. Erg conservatief.	
V1	Gebaseerd op globale Groningen seismische data (geen model van de ondergrond)	Gedrag van de ondiepe ondergrond is globaal meegenomen (gemiddelde over Groningen).	Geen lokale effecten door ondiepe ondergrond meegenomen. Gedrag ondiepe ondergrond slechts globaal meegenomen.	
V2	Gebaseerd op een model van de diepe ondergrond en de ondiepe ondergrond van Groningen.	"Earthquake engineering best practice" voor PGA en duur van de grondbeweging; lokale grondbeweging, makkelijk statistisch op te nemen in Monte-Carlo, gecalibreerd met de beschikbare data.	Extrapolatie naar grotere magnitudes is aanleiding tot onzekerheden. Method is complex. Afgestemd op risicoberekeningen.	Protocol drempelwaarden moeten rekening houden met lokale bodemgesteldheid
V4 (in prep.)	Gebaseerd op een model van de diepe ondergrond en de ondiepe ondergrond van Groningen.	Dit is een verfijnde versie van V2, maar nu is ook de dimensie van de rupture meegenomen door simulatie met het programma EXSIM. PGA, duur van de beweging en ook PGV.		Protocol drempelwaarden moeten rekening houden met lokale bodemgesteldheid

Tabel 3 Ontwikkeling van het "Ground Motion Prediction Model" met opeenvolging van steeds verbeterde modellen.

3 Onderbouwing signaalparameters

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 6 van het Meet- en Regelprotocol is aangegeven welke parameters onderdeel zijn van dit protocol en waarom. In dat hoofdstuk zijn ook de drie niveaus van het signaleringssysteem beschreven, te weten het waakzaamheidsniveau, het signaleringsniveau en het interventieniveau. In dit hoofdstuk wordt beschreven en beargumenteerd welke grenswaarden voor deze parameters gebruikt worden. Daarbij wordt opgemerkt dat de parameters niet zijn vastgesteld op basis van enkel modelmatige achtergronden. Historische achtergronden hebben hierin ook een belangrijke rol gespeeld.

Uitgangspunt van het Meet- en Regelprotocol is dat geen productiemaatregelen worden genomen op het waakzaamheidsniveau. De reden dat hiervoor wordt gekozen en niet al op een eerder moment ingrepen worden gedaan, is erin gelegen dat NAM het Groningenveld nu opereert onder de voorwaarden die in het Instemmingsbesluit. Daarbij wordt rekening gehouden met alle daarin opgenomen eisen. Die wijze waarop nu geproduceerd wordt is zorgvuldig tot stand gekomen, waarbij nadrukkelijk is gekeken naar de veiligheid en de meest optimale wijze van produceren (onder andere in overleg met Gasunie Transport Services (“GTS”)). Daarbij moet worden bedacht dat iedere ingreep een mogelijk effect heeft op een van de in het Instemmingsbesluit gestelde voorwaarden. Het nemen van aanvullende maatregelen is daarnaast geen eenvoudig proces. Over het algemeen dienen operationele voorbereidingen te worden getroffen waarbij de maatregelen (en de kosten daarvan) ook proportioneel moeten zijn ten opzichte van het verwachte effect op en voordeel in seismiciteit. Dat betekent dat in beginsel op het waakzaamheidsniveau geen maatregelen worden genomen maar wel onderzoek zal plaatsvinden naar de optimalisatie van de productie van het Groningenveld. Waarden van de signaalparameters op drie niveaus.

3.2 Waarden van de signaalparameters op 3 niveaus

Elke parameter heeft zijn eigen waarde op de drie verschillende niveaus. In de onderstaande paragrafen wordt kort aangegeven waar de waarden op zijn gebaseerd en waarom dus voor die specifieke waarde op elk niveau is gekozen. In paragraaf 3.2 wordt vervolgens uitgebreider ingegaan op de achtergronden van de afzonderlijke signaalparameters.

3.2.1 Parameters op het eerste niveau: het waakzaamheidsniveau (groen)

De eerste (groene) laag van het systeem is nieuw ten opzichte van eerdere versies van het Meet- en Regelprotocol die NAM heeft voorgesteld. Daarnaast wijkt dit systeem af van het nu geldende alarmeringsprotocol in het Instemmingsbesluit. NAM monitort en analyseert de verschillende parameters. Op dit niveau worden gerichte analyses uitgevoerd om significante trends en/of ontwikkelingen te identificeren en eventuele maatregelen voor te bereiden. De aanleiding voor deze onderzoeken zijn zowel de in hoofdstuk 4 van het Meet- en Regelprotocol beschreven afwijkende ontwikkelingen als de waardes van de signaalparameters op dit niveau. De waardes van de signaalparameters zijn zodanig laag gekozen dat in de toekomst nagenoeg continu in het waakzaamheidsniveau zal worden geopereerd, waardoor deze parameters constant zullen worden gemonitord en onderzocht.

Er wordt geprobeerd op dit niveau een oranje of rood niveau zo veel mogelijk te voorkomen en/of de maatregelen voor te breiden die nodig zijn op het moment dat het escalatiedeel (oranje en rood) van dit model wordt bereikt. In tabel 4 staan de voorgestelde waarden waarbij het waakzaamheidsniveau van kracht wordt en de achtergrond van deze waarden.

- *PGA*: Een PGA-waarde van 0.05g (grootste horizontale component) wordt gehanteerd voor het waakzaamheidsniveau en deze is gerelateerd aan de aardbevingen “Huizinge 2012” en “ ’t Zandt 2014”.
- *Activity Rate*: De activity rate-grenswaarde is gezet op 15 aardbevingen per jaar (voor M≥1,5). Dit getal is ten eerste gerelateerd aan modellering (aan de onderkant van de onzekerheidsmarge), ten tweede aan het activiteitsniveau in 2015 en 2016. De huidige waarde ligt op 11 (april 2017). Het aanhouden van deze waarde in de toekomst zal waarschijnlijk betekenen dat deze grenswaarde met enige regelmaat overschreden wordt en dus een bijna continu onderzoek naar de ontwikkelingen van deze parameter zal plaatsvinden.
- *Aardbevingsdichtheid*: Een aardbevingsdichtheid van 0,17 aardbevingen/(km^2 · jaar) (M≥1,0) wordt voorgesteld. Analyse van dit getal over de historie van het veld laat zien dat deze waarde niet overschreden werd in de periode 2015 - begin 2016. Dit was een periode waarin het veld relatief seismisch rustig was.
- *PGV*: Een PGV-waarde van 5 mm/s wordt gehanteerd voor het signaleringsniveau om schade te monitoren. Deze waarde is gekoppeld aan de SBR-richtlijn[1] voor een kleine kans op DS1 schade.
- *Damage State:* De ”damage state”-waarde op dit niveau is enigszins kwalitatief met het label “onverwacht veel DS1-meldingen” en gerelateerd aan artikel 33 van de Mijnbouwwet (zorgplicht) in combinatie met verwachte maatschappelijke onrust. “Onverwacht” zal vooral gebruikt worden in relatie tot eerdere vergelijkbare gebeurtenissen en de voorspellingen binnen de modellen die gehanteerd worden voor schade. De keuze voor meldingen is gedaan omdat de oorzaken van DS1-schade bij inspectie niet altijd vastgesteld kan worden.

[1] SBR staat voor Stichting Bouw Research.

Waarden waakzaamheid-parameters

Parameter	Waarde	Reden	Basis
PGA	0.05g (horizontale component)	Risico (“hazard”)	Historisch; gerelateerd aan Huizinge beving
Activity rate (M≥1.5)	> 15	Zowel risico als schade	Gerelateerd aan seismisch niveau 2015/2016.
Aardbevings-dichtheid (epi-centrum)	0.17 (M>1)	Concentratie aardbevingen; (herhalings-) schade – indicator escalatie	Historisch; gerelateerd aan Loppersum regio, periode 2012 - 2014
PGV	5 mm/s	Schade-indicator voor niet-structurele schade	SBR DS1
Damage state	Onverwacht veel DS1 schade meldingen	Monitor schade ontwikkeling	Artikel 33, maatschappelijke verwachtingen

Tabel 4 Uitleg van parameters op waakzaamheidsniveau

3.2.2 Parameters op het tweede niveau: het signaleringsniveau (oranje)

De tweede (“oranje”) laag van het signaleringssysteem was ook opgenomen in eerdere versies van het Meet- en Regelprotocol maar kende toen minder parameters. Op dit niveau wordt in principe een directe actie geformuleerd, in eerste instantie door het NAM Risk Coordination Team. Dit team geeft binnen 48 uur een korte analyse van de gebeurtenis met een set van bijbehorende maatregelen die binnen een tijdsbestek van enkele weken uitgevoerd kunnen worden. Daarbij wordt in beginsel gebruik gemaakt van de maatregelen die reeds geïdentificeerd zijn op het waakzaamheidsniveau. Een voorgestelde maatregel heeft in de regel een regionaal karakter. In de meeste gevallen wordt deze maatregel genomen na overleg met SodM en GTS, en in sommige gevallen na goedkeuring door de Minister van Economische Zaken.

In tabel 5 staan de voorgestelde waarden waarbij het signaleringsniveau start en de grondslag van deze waarden.

- *PGA*: Een PGA-waarde van 0,08g wordt gehanteerd voor het signaleringsniveau en is gerelateerd aan “Huizinge 2012” ” en “ ’t Zandt 2014”. Een gevoel voor hoe vaak deze waarde getriggerd zal worden kan worden verkregen uit tabel 7, de historische waarden voor de PGA.

- *Activity Rate*: De activity rate-grenswaarde is gezet op 20 aardbevingen per jaar (voor M≥1,5). Dit getal is gerelateerd aan het activiteitsniveau in 2015 en 2016. Deze waarde werd in de periode 2015/2016 niet overschreden.
- *Aardbevingsdichtheid*: Een aardbevingsdichtheid van 0,25 aardbevingen/(km^2 · jaar) (M≥1,0) is eerder voorgekomen in het Loppersum-gebied en heeft geresulteerd in (voorstellen tot en daadwerkelijke) productie-ingrepen.
  Een equivalente aardbevingsdichtheid van 0,25 aardbevingen/(km^2 · jaar) (M≥1,0) wordt voorgesteld op basis van historische waarden. Analyse van dit getal over de historie van het veld laat zien dat deze waarde 2 keer overschreden werd tijdens fases waarin het veld relatief seismisch actief was.
- *PGV*: Een PGV-waarde van 50 mm/s wordt gehanteerd voor het signaleringsniveau om schade te monitoren. Deze waarde sluit aan bij modellering van DS2-schade.
- *Damage State*: De ”damage state”-waarde op dit niveau is gebaseerd op een vergelijking tussen wat de verwachte schade is en de werkelijke schade. “Onverwacht” zal vooral gebruikt worden in relatie tot eerdere vergelijkbare gebeurtenissen en de voorspellingen binnen de modellen die gehanteerd worden voor schade. De keuze voor meldingen is gedaan omdat de oorzaken van DS1-schade bij inspectie niet altijd vastgesteld kan worden.

Waarden Signaal-parameters

Parameter	Waarde	Reden	Basis
PGA	0.08 g (horizontale component)	Risico (“hazard”)	Historisch; gerelateerd aan Huizinge beving
Activity rate (M≥1.5)	> 20	Zowel risico als schade	Historisch: periode 2012-2014 lange tijd meer dan 20 bevingen; ook gerelateerd aan gecalibreerde modelering
Aardbevings-dichtheid (epi-centrum)	0.25	Concentratie aardbevingen; indicator escalatie	Historisch; gerelateerd aan Loppersum regio, periode 2012-2014
PGV	50 mm/s	Schade-indicator	Op basis van literatuur en voorlopig schade-modelerings-werk (kans van 1% op DS2 schade).
Damage state	DS2 gezien waar DS1 verwacht	Monitor schade ontwikkeling	Schade-modelering en schade-experimenten

Tabel 5 Uitleg van parameters op signaleringsniveau

3.2.3 Parameters op het derde niveau: het interventieniveau (rood)

De derde ("rode") laag van het signaleringssysteem was in eerdere versies van het Meet- en Regelprotocol nog niet opgenomen en is tevens het hoogste niveau van de escalatiestructuur. Dit is het niveau waarbij mogelijk direct een ingreep in het systeem wordt gedaan, indien nodig op veldschaal. Indien wordt gekozen voor een ingreep op veldschaal, zal in veel gevallen goedkeuring van de Minister van Economische Zaken nodig zijn omdat hiervoor mogelijk een wijziging van het Instemmingsbesluit is vereist. Een gebeurtenis op het interventieniveau betekent overigens niet dat automatisch sprake is van een gebeurtenis waarbij de veiligheid in het geding is.

- *PGA*: Een PGA-waarde van 0,10 g wordt gehanteerd voor het interventieniveau en die is in de regel gerelateerd aan een beving met een magnitude 4 of hoger waarbij significante schade of interruptie verwacht wordt.
- *Activity Rate*: De activity rate-grenswaarde is gezet op 25 aardbevingen per jaar (voor M≥1,5). Dit getal is gerelateerd aan het activiteitsniveau en is de verwachte waarde in de huidige modellering van activity rate (periode 2017-2018). Deze waarde werd sinds de periode 2015/2016 niet overschreden.
- *Aardbevingsdichtheid:* Een aardbevingsdichtheid van 0,40 aardbevingen/(km^2 jaar) (M≥1,0) wordt voorgesteld op basis van een historische vergelijking in het Loppersum gebied.
- *PGV*: Een PGV-waarde van 80 mm/s wordt gehanteerd voor het interventieniveau om schade te monitoren. Deze waarde sluit aan bij modellering van DS2-schade en kan mogelijk DS2-schade betekenen aan tientallen huizen.
- *Damage State*: De "damage state"-waarde op dit niveau is gebaseerd op een vergelijking tussen wat de verwachte schade is en de werkelijke schade. "Onverwacht" zal vooral gebruikt worden in relatie tot eerdere vergelijkbare gebeurtenissen en de voorspellingen binnen de modellen die gehanteerd worden voor schade. De keuze voor meldingen is gedaan omdat de oorzaken van DS1 schade bij inspectie niet altijd vastgesteld kan worden.

Waarden Interventie-parameters

Parameter	Waarde	Reden	Basis
PGA	0.10 g (horizontale component)	Risico (“hazard”)	> Huizinge
Activity rate (M≥1.5)	> 25	Zowel risico als schade	Relatief t.ov. gecalibreerde modelering; 25 is verwachtingswaarde van model voor komende jaren
Aardbevings-dichtheid (epi-centrum)	0.40	Concentratie aardbevingen; indicator escalatie	Historisch; gerelateerd aan Loppersum regio, periode 2014
PGV	80 mm/s	Schade	Onset DS2 schade gebaseerd op modelering en experimenten
Damage state	DS3 terwijl DS2 verwacht	Monitor schade ontwikkeling	Schade-modelering en schade-experimenten

Tabel 6 Uitleg van parameters op interventieniveau

3.3 Onderbouwing van de signaalparameters

3.3.1 PGA

PGA, peak ground acceleration, is een signaalwaarde die gebruikt is in eerdere versies van het Meet- en Regelprotocol. Het was vooral een grootheid waarmee risico en in minder mate schade geadresseerd werd. In het huidige protocol wordt op basis van voortschrijdend inzicht PGV (peak ground velocity) gebruikt als grootheid voor schade. Historische waarden voor de laatste 4 jaar voor de PGA staan in de tabel 7 hieronder:

Datum	PGA (g)	Magnitude	Locatie
11-mrt-2017	0.004	2.1	Zeerijp
11-jan-2016	0.008	2.2	Wirdum
2-sep-2016	0.005	2.1	Schildwolde
25-feb-2016	0.021	2.4	Froombosch
30-okt-2015	0.009	2.3	Meedhuizen
30-sep-2015	0.017	3.1	Hellum
18-aug-2015	0.009	2.0	Kolham
7-jul-2015	0.001	2.1	Zuidwolde
27-mei-2015	0.003	2.0	Uithuizen
24-mrt-2015	0.004	2.3	Appingedam
25-feb-2015	0.011	2.3	Appingedam
6-jan-2015	0.014	2.7	Wirdum
30-dec-2014	0.017	2.8	Scharmer
5-nov-2014	0.082	2.9	Zandeweer
30-sep-2014	0.002	2.8	Garmerwolde
1-sep-2014	0.000	2.6	Froombosch
2-jul-2014	0.000	2.1	Slochteren
18-mrt-2014	0.002	2.1	Rottum
11-mrt-2014	0.000	2.3	Schildwolde
13-feb-2014	0.071	3.0	Het Zandt
26-nov-2013	0.005	2.0	Appingedam
9-nov-2013	0.000	2.4	Wirdum
4-sep-2013	0.025	2.8	Zeerijp

Tabel 7 Overzicht van PGA-waarden voor het Groningen veld. Bron: KNMI.

In het voorgestelde protocol zal worden uitgegaan van de grootste horizontale component in plaats van de minder relevante verticale component: schade aan gebouwen en het risico voor diegenen die in deze gebouwen aanwezig zijn is voornamelijk afhankelijk van de horizontale component van de PGA. Gebouwen worden ontworpen om verticale krachten goed te kunnen weerstaan. De grenswaarden voor PGA in tabellen 4, 5 en 6 hebben dan ook alleen betrekking op de horizontale componenten (radiaal en transversaal) van de PGA.

Hierbij wordt opgemerkt dat het Protocol uitgaat van de gemeten waarden, niet van de afgeleide waarden van het epi-centrum; dit om geen berekening te hoeven afwachten maar meteen uit te kunnen gaan van een door het KNMI gemeten waarde.

De waarde van 0,05 is in het Instemmingsbesluit opgenomen in artikel 5. De reden dat de PGA-waarde zoals genoemd in het Instemmingsbesluit is opgenomen op het “groene” niveau is vanwege de verbeterde meetapparatuur in het veld. Door de uitgebreidere metingen zal deze waarde eerder worden waargenomen dan voorheen, hetgeen rechtvaardigt dat deze waarde nu op het groene niveau is opgenomen in plaats van het oranje niveau.

3.3.2 Activity rate

- De historisch gemeten activity rate (M≥1,5) staat weergegeven in figuur 1. De voorspelde activity rate staat in figuur 2 weergegeven (op basis van “model 2”, tabel 1). In het Meet- en Regelprotocol wordt de waarden 15 gehanteerd als “waakzaamheidwaarde”. Dit is een relatief lage waarde en het ligt in de lijn der verwachting dat met name de waakzaamheidwaarde op deze grootheid regelmatig gehaald zal worden (zie figuur 1 en figuur 2) waarmee deze parameter bijna continu zal worden onderzocht. De reden dat de activity rate en de aardbevingsdichtheid op een relatief laag niveau getriggerd kan worden (terwijl dit om relatief hele kleine, onvoelbare, bevingen kan gaan) is dat dit een relatief hoog onverwacht element in zich kan bergen, potentieel escalatie kan aankondigen, en daarom extra waakzaamheid en preventieve maatregelen kan vereisen. En zoals ook besproken in de paragraaf 4.5 van het Meet- en Regelprotocol kan er relatief veel tijd overheen gaan voor een maatregel effectief is.

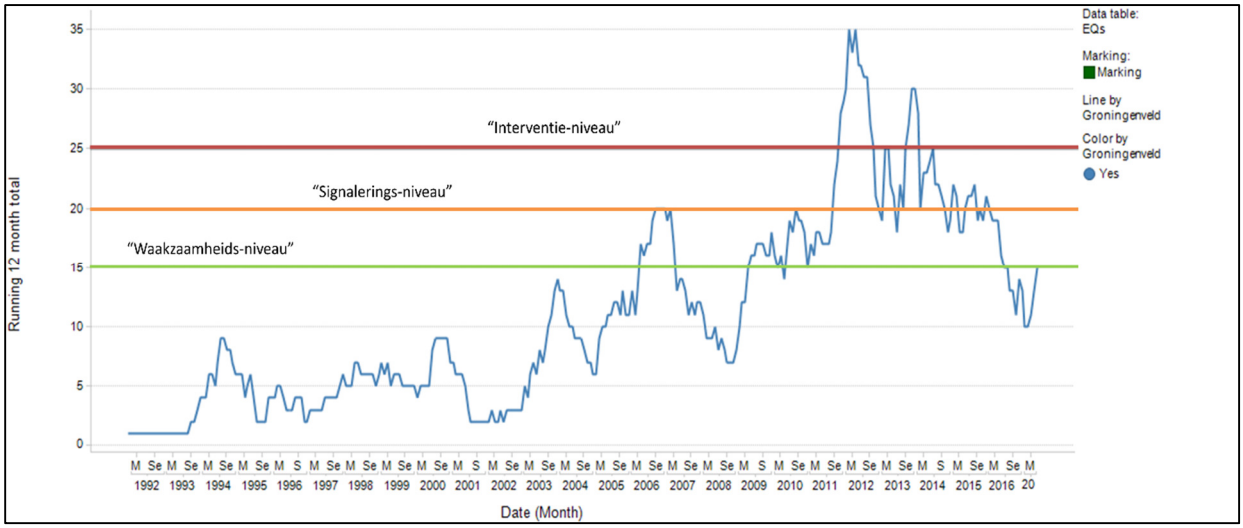
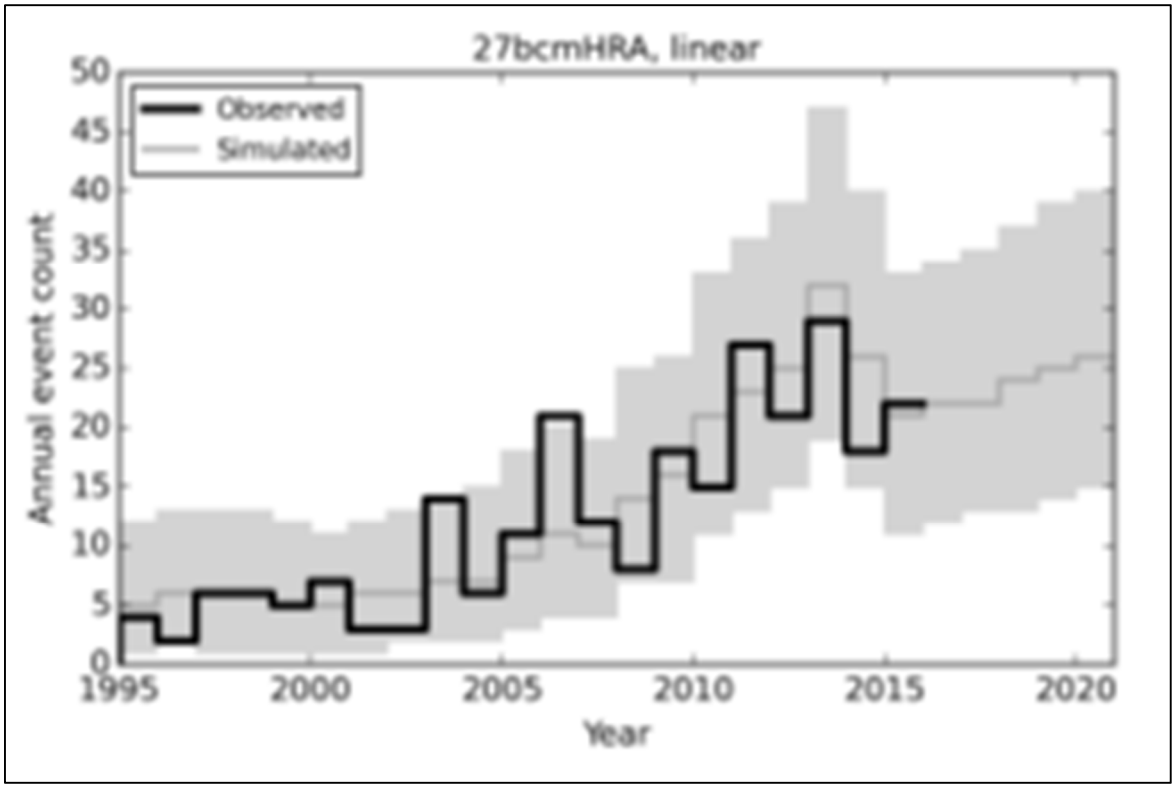


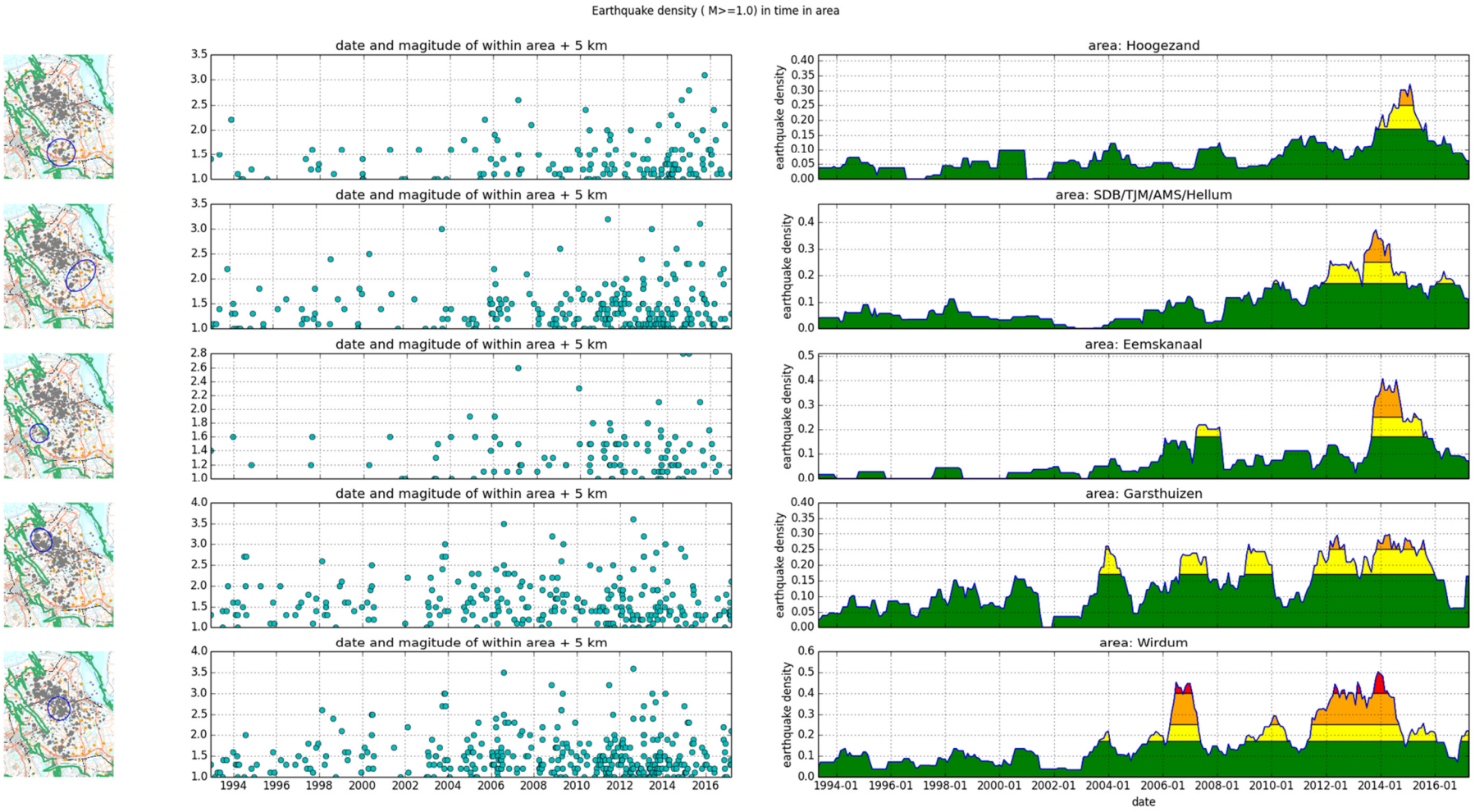
Figure 1. Activity rate over tijd. De blauwe lijn geeft het 12-maands-getal (M≥1.5) weer ("totaal aantal aardbevingen in een jaar, per maand telkens opgeschoven"). De groene, oranje en rode lijn geven de signaalwaarden weer.



Figuur 2. *De activity rate voor aardbevingen in Groningen voor de periode 1995 tot 2020 (zwarte lijn is historisch, grijze lijn is gemodelleerd gemiddelde en grijze band is onzekerheidsband).*

3.3.3 Aardbevingsdichtheid

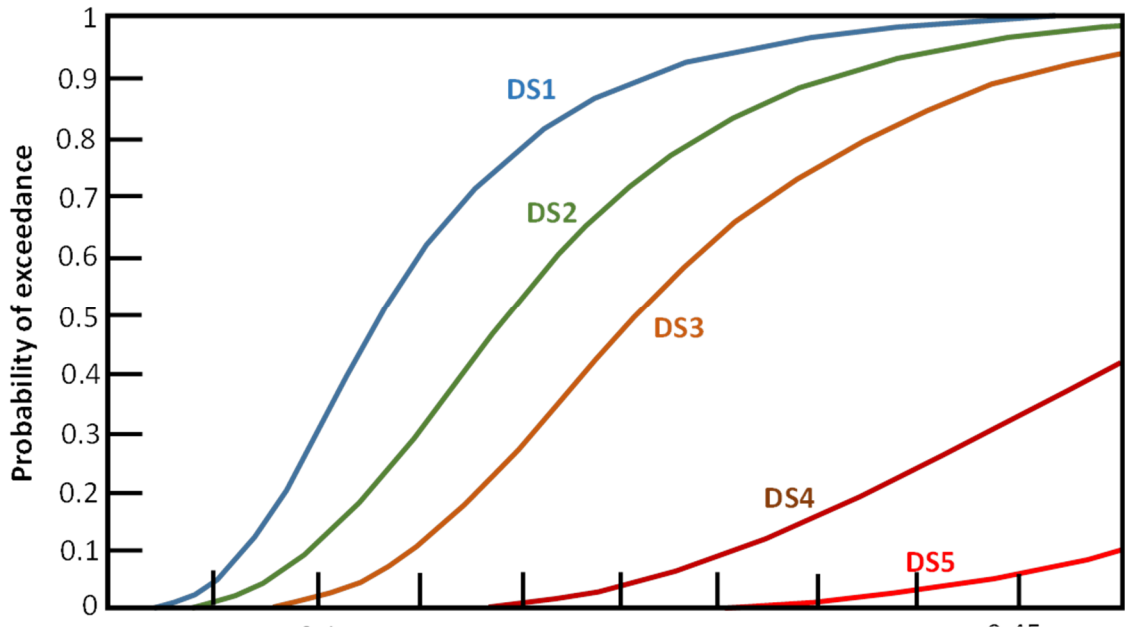
Aardbevingsdichtheid is een parameter die voorkwam in eerdere versies van het Meet- en Regelprotocol. De voorgestelde waarden in het huidige Meet- en Regelprotocol zijn gebaseerd op een historische analyse van M≥1,0 bevingen (zie figuur 3). Op basis van signaleringswaarde van 0.17 aardbevingen/($km^2 \cdot$ jaar) zou deze waarde gedurende 3 perioden getriggerd zijn in de afgelopen 10 jaar (rond 2007, 2010 en 2013) en recent (Q4, 2016, Q1 2017). De perioden rond 2007, 2010 en 2013 waren perioden van verhoogde seismiciteit. De waakzaamheidswaarde (0,17 aardbevingen/($km^2 \cdot$ jaar)) zou voor die periode getriggerd zijn en daarmee waarschijnlijk tijd hebben gegeven om een ingreep te doen.



Figuur 3 *De historische aardbevingsdichtheid rond een aantal gebieden.*

3.3.4 PGV

De onderbouwing voor de grenswaarden van PGV is nog in ontwikkeling en de gekozen grenswaarden zijn gebaseerd op een combinatie van gekalibreerde modellering en waarden gebruikt door de SBR. De voorgestelde waarde voor het waakzaamheidsniveau is gekoppeld aan de SBR-norm voor DS1-schade. Deze grootheid wordt ook gebruikt in andere industrieën die trillingen veroorzaken zoals de “Bouw” en het “Spoor”. De voorgestelde PGV-waarden voor het signalering- en interventie-niveau zijn gebaseerd op een zogenaamde fragility-curve, een curve die de sterkte van een gebouwentypologie representeert. Voor een typisch Groningse woning zou deze fragility-curve er ongeveer uitzien als in figuur 3. De term “DS” – Damage State – staat uitgelegd in de sectie hieronder. De voorgestelde grenswaarde op het signaleringsniveau is gebaseerd op een DS2 ”fragility curve”, met een 1% kans. In de tabel 8 hieronder staan een aantal waarden zoals die in de literatuur gebruikt worden. In de tabel 9 daaronder staan de waarden zoals die uit recente schud-tafel experimenten komen voor typisch Groningse huizen. De relatief laag gekozen waarden voor PGV (50 en 80 mm/s; ten opzichte van experiment en literatuurwaarden van ruim boven de 100 mm/s) in het signalerings-systeem komen voort uit het verlangen om zo vroeg in het onderzoek naar schade conservatieve waarden te kiezen (die mogelijk later dan, op basis van voortschrijdend inzicht, naar boven bijgesteld kunnen worden).



Figuur 4 *Generiek voorbeeld van een “fragility curve” voor een gebouwen typologie. De horizontale as vertegenwoordigt “Peak Ground Velocity”, de verticale as de “kans op overschrijding”. De labels DS1, DS2 etc. representeren “damage states” zoals uitgelegd in figuur 4. De groene curve, DS2, is gebruikt in dit protocol.*

PGV in mm/s	Hancilar et al. (2012)	Okada & Takai (2000)
DS2 – 1%	350	120
DS2 – 10%	480	260

Tabel 8. PGV waarden uit de literatuur die horen bij het ontstaan van eerste beschadigingen aan constructieve delen ("DS2"). Per auteur/publikatie staan er 2 getallen genoemd; Het bovenste getal geeft het getal weer dat hoort bij een overschrijdingskans van 1%, het onderste voor een overschrijdingskans van 10%. Zo claimen Okada & Takai bijvoorbeeld dat bij een PGV 120 mm/s er 1% van de huizen de eerste tekenen van schade aan constructieve delen zullen vertonen.

PGV in mm/s	Rijtjeshuis	Vrijstaand huis
DS1 – haar-scheurtjes	130	175

Tabel 9. PGV waarden uit recente "schud-tafel" experimenten van Groningse huizen. De geciteerde waarden horen bij het ontstaan van eerste beschadigingen aan constructieve delen. Er zijn hier twee huizen weergegeven, een rijtjeshuis en een vrijstaand huis. De geciteerde waarden geven de PGV waarden waarbij de eerste scheurtjes ontstaan (cosmetische schade, "DS1") en dus het voorstadium van DS2.

3.3.5 Damage State

De definitie van damage state is geïllustreerd in figuur 4 hieronder.

Classification of damage to masonry buildings	
	Grade 1: Negligible to slight damage **(no structural damage, slight non-structural damage)** Hair-line cracks in very few walls. Fall of small pieces of plaster only. Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.
	Grade 2: Moderate damage **(slight structural damage, moderate non-structural damage)** Cracks in many walls. Fall of fairly large pieces of plaster. Partial collapse of chimneys.
	Grade 3: Substantial to heavy damage **(moderate structural damage, heavy non-structural damage)** Large and extensive cracks in most walls. Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual non-structural elements (partitions, gable walls).
	Grade 4: Very heavy damage **(heavy structural damage, very heavy non-structural damage)** Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.
	Grade 5: Destruction **(very heavy structural damage)** Total or near total collapse.

Figuur 5 *Schaal van damage states zoals deze is gepubliceerd in "European Macroseismic Scale 1998, EMS-98" door de European Seismological Commission (G. Grünthal), in 1998.*

4 Speciale en periodieke rapportages

4.1 Speciale rapportage

Speciale rapportages worden uitgevoerd wanneer “waakzaamheidsniveau”-waarden overschreden worden, de gebeurtenissen uit hoofdstuk 4 van het Meet- en Regelprotocol plaatsvinden en soms op verzoek van SodM. Tabel 8 geeft een samenvatting van de typische elementen van een dergelijk rapport. Afhankelijk van welke parameter overschreden is (e.g. PGA, Activity Rate of aardbevings-dichtheid), zal een andere selectie uit deze tabel gemaakt worden. Daarbij moet ook worden bedacht – zoals ook aangegeven in paragraaf 8.4 van het Meet- en Regelprotocol – dat de mate van wetenschappelijke onderbouwing die kan worden gegeven is mede afhankelijk is van de vraag hoe snel het rapport moet worden opgeleverd. NAM zal altijd trachten een goede balans te vinden tussen snelheid en wetenschappelijke onderbouwing, waarbij altijd gekozen kan worden om na een eerste snelle rapportage later nog een tweede, uitgebreidere raportage op te leveren.

Data-element	Reden van beschouwing
Aardbevingsdichtheid kaart (12 maanden)	Bekijken of er een verschuiving in aardbevingsposities heeft plaatsgevonden, test op overschrijden grenswaarde (0,25 bevingen per km^2/jaar)
Aardbevingsdichtheid-kaart - historie	Testen of er een geheel nieuw gebied seismisch actief is geworden.
Activity rate	Algemeen niveau van seismiciteit; potentiele vroege indicator van verhoogde seismiciteit (inclusief hogere magnitude). Potentiële trigger van veldbrede productie-ingrepen. Context voor de andere parameters.
Hypo-centre locatie	Bepalen of de bevingen geassocieerd zijn met een specifieke breuk of breukintersectie. Dit zou analyse kunnen focusseren en eventuele beheersmaatregelen kunnen suggereren.
Fault offset-kaart	Bepalen of bevingen correleren met bepaalde breuken. Uit geomechanische studies is gebleken dat breuken met een offset van ongeveer de reservoir dikte aanleiding zouden kunnen geven tot hogere seismiciteit.
Recente productie individuele clusters	Ramp-up van cluster zou in theorie een stressverandering teweeg kunnen brengen die op zijn beurt een beving zou kunnen veroorzaken. Hier zijn ook statistische aanwijzingen voor.
Drukkaarten van het gebied geassocieerd met hogere bevings-intensiteit of PGA	De fysica van vloeistofstroming in een poreus medium wordt beschreven door een diffusief proces dat ervoor zorgt dat een piek in productie van een bepaald cluster zich vertaalt in een in de ruimte (en tijd) sterk verspreide drukverstoring; m.a.w. een scherpe stap omhoog in productie van een cluster zorgt al op korte afstand van dat cluster in heel gelijkmatig verdeelde drukverstoring in het reservoir.
Stroomlijnen patroon	Poging om vast te stellen welk cluster de meeste invloed heeft op het drukverloop van een bepaalde locatie.
Reservoir-drukvermindering per tijdseenheid.	Bepalen of de vermindering in de druk in het Loppersum-gebied gevarieerd heeft in de tijd en of dat correleert met de ontwikkelende seismiciteit.
HC-kolom thickness map	Voor een gelijke reservoirdrukdaling is dit het gebied waar je de meeste compactie verwacht en waar je misschien ook meer seismiciteit zou kunnen verwachten; met andere woorden, een gelijke drukdaling heeft in een gebied met een grotere gaskolom waarschijnlijk meer effect op de compactie dan in gebieden met een kleinere kolom.
Dalingsgrafiek	Bekijken of er een anomaal dalingspatroon vastgesteld kan worden in het gebied dat meer bevingen heeft laten zien.

Trends in alle signaalparameters	Oppakken van potentieel verontrustende patronen om eventuele escalatie te voorkomen (e.g. [regionale] Gutenberg-Richter plots)
Drukontwikkeling (dp/dt)	De drukontwikkeling wordt gezien als de drijvende kracht achter ontwikkelende seismiciteit.
Schadeontwikkeling	Schade moet zo veel mogelijk voorkomen worden. Omdat schade modellering en kalibratie nog volop in ontwikkeling zijn, is het belangrijk om te bepalen of de schadeontwikkeling geen ander beeld laat zien dan verwacht.
Review van GMPE	Indien een gemeten PGV sterk afwijkt van de voorspelde waarde zal de ground-motion prediction equation mogelijk aangepast worden.

Tabel 10 Overzicht van de studie elementen die in een speciale rapportage zullen worden geadresseerd.

4.2 Periodieke rapportage

Periodieke rapportages zullen halfjaarlijks worden uitgevoerd en bevatten onder andere de volgende elementen:

Rapportage-element	Reden van beschouwing
Activity rate	Algemeen niveau van seismiciteit; potentiele vroege indicator van verhoogde seismiciteit (inclusief hogere magnitude). Potentiële trigger van veldbrede productie-ingrepen.
Aardbevingsdichtheid	Geeft beeld voor eventuele verschuiving of concentratie van seismiciteit. Potentiële trigger voor het veranderen van de productieverhouding tussen de verschillende regio's/clusters.
Trends alle signaalparameters (e.g. Gutenberg-Richter plots)	Oppakken van potentieel verontrustende patronen om eventuele escalatie te voorkomen. Voor het hele veld en voor een aantal deel-regio's.
Drukontwikkeling (dp/dt)	De drukontwikkeling wordt gezien als de drijvende kracht achter ontwikkelende seismiciteit.
Schadeontwikkeling	Schade moet zo veel mogelijk voorkomen worden. Omdat schade modellering en kalibratie nog volop in ontwikkeling zijn, is het belangrijk om te bepalen of de schadeontwikkeling geen ander beeld laat zien dan verwacht.
Gebruikte modellen	Inzichtelijk maken van gebruikte modellen met mogelijkheden en beperkingen die daarbij gelden. Bij de rapportage zal ook een vergelijking worden gemaakt tussen de gemeten waarden en de modelmatig verwachte waarden.
Productieveranderingen	Om eventuele verbanden te kunnen leggen met het verschuiven van aardbevingsdichtheid patronen. Ook relatie met Gutenberg-Richter b-waarden.
PGV	Vergelijking van gemeten grondbeweging met de gebruikte modelering van grondbeweging ("GMPE"). Voor bevingen met een magnitude boven de 2.0.

Tabel 11 Overzicht van de elementen die in een periodieke rapportage zullen worden geadresseerd.

5 Operationele en opgelegde productiebeperkingen

5.1 Beperkingen aan Productie

De ruimtelijk verdeling van de productie van het Groningenveld wordt geoptimaliseerd met het doel om aardbevingen te verminderen (Artikel 3.2 Instemmingsbesluit). Ook kunnen beheersmaatregelen leiden tot een andere verdeling van de productie over de productieclusters of vermindering van de productie uit bepaalde productieclusters.

Bij de afweging over productiebeperkingen moet ook rekening gehouden worden met de mogelijkheid van het Groningen gasbehandelings- en pijpleidingensysteem om deze productie af te leveren aan de verschillende overslagen. Sommige overslagen beleveren een bepaalde markt of ondergrondse gasopslag. In de volgende sectie wordt hier verder op ingegaan.

De optimalisatie van de verdeling van de productie wordt dus gelimiteerd door de productiebeperkingen die met het Instemmingsbesluit zijn opgelegd en als gevolg van fysische beperkingen in het gasproductiesysteem.

5.2 Productiebeperkingen uit het instemmingsbesluit

Het Instemmingsbesluit bevat verschillende voorschriften (artikelen 2, 3 en 4) die invloed hebben op de gasproductie uit het Groningen veld:

- Artikel 2.1 Bepaalt de gasproductie uit het veld op 24 Bcm/gasjaar;
- Artikel 2.2 Extra gasvolume afhankelijk van de graaddagen tot maximaal 6 Bcm/gasjaar;
- Artikel 2.3 Extra gasvolume afhankelijk van optreden van technische problemen (transportbeperkingen, falen van het GTS-systeem of de hi-cal compositie) tot maximaal 1.5 Bcm/gasjaar;
- Artikel 3.1 Regionale productie van het veld binnen regionale maximale niveaus;
- Artikel 3.3 Insluiting voor productie van vijf productieclusters rond Loppersum (wel beschikbaar voor capaciteit);
- Artikel 4.1 Vermindering van seizoens- en maandelijkse variaties; vlakke productie over de tijd.

De regionale productieniveaus in artikel 3.1 refereren aan de ruimtelijke verdeling die is opgelegd op 30/1/2015. Deze verdeling is als volgt:

- LOPPZ-clusters[2]: stand-by productie uitsluitend voor leveringszekerheid (ongeveer 1,6 Bcm/jaar)
- Eemskanaal-cluster: 2,0 Bcm per jaar
- Zuid-West-clusters: 9,9 Bcm per jaar
- Oost-clusters: 24,5 Bcm per jaar

De som van de regionale productieniveaus is groter dan de totale veld productie van 24 Bcm/gasjaar. Dit staat flexibiliteit toe voor de optimalisatie van de productie.

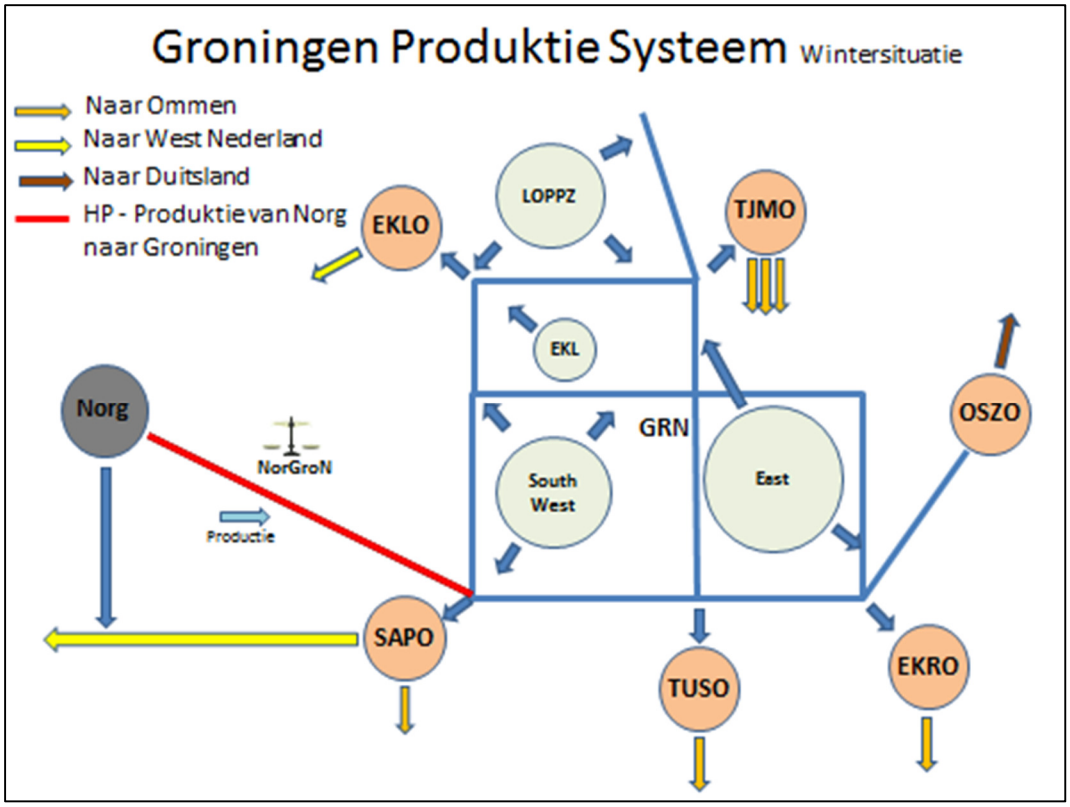
[2] De LOPPZ-clusters liggen in het seimische meest actieve gebied en zijn de productie clusters **L**eermens, **O**verschild, De **P**aauwen, Ten **P**ost en 't **Z**andt.

5.3 Beperkingen van het Groningen Productiesysteem

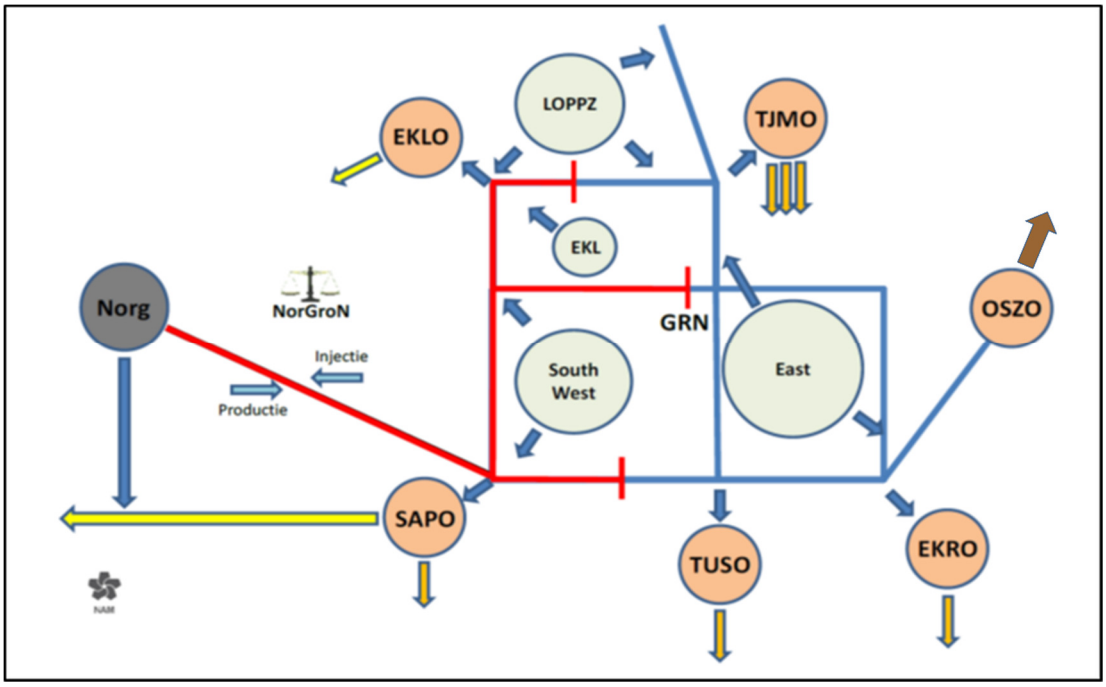
Naast de opgelegde productiebeperkingen zijn er ook fysieke beperkingen van het productiesysteem van het Groningenveld:

- Putten — De productiecapaciteit van putten is beperkt en afhankelijk van de lokale reservoir druk,
- Compressoren — De capaciteit van compressoren wordt beperkt door het vermogen van de motoren van de compressoren,
- Ring Systeem — Het pijpleidingensysteem kan slechts beperkt het geproduceerde gas van de productieclusters herverdelen en afleveren aan de overslagen waar het aan GTS-transportleidingennetwerk wordt geleverd. Met name de Oudestatenzijl Overslag, van waaruit Duitsland wordt beleverd, kan slecht door een beperkt aantal productieclusters gelegen in het zuiden van het veld van gas worden voorzien.
- Beschikbaarheid — De gasbehandelingsinstallaties moeten regelmatig uit bedrijf worden genomen voor onderhoud en verplichte veiligheidsinspectie.
- Gas Opslag — Afhankelijk van het werkvolume dat aan de ondergrondse gasopslag Norg (Norg UGS) tijdens het winterproductieseizoen wordt onttrokken, moet tijdens de zomer ditzelfde volume worden teruggeïnjecteerd (tot 7 Bcm). Hiervoor moet een hogere druk in het zuidoostelijke deel van het ringpijpleidingensysteem worden gehandhaafd en hogere productie gerealiseerd van de productieclusters in het zuidoostelijke deel van het veld waar de aansluiting van de Norg-Groningenpijpleiding (NorGroN) is gelegen.

Strevend naar vlakke productie van het Groningenveld (zie artikel 4 van het Instemmingsbesluit), wordt de marktvraag verschillend tussen het zomerseizoen en het winterseizoen opgevangen door het inzetten van de Norg UGS. Hierdoor wordt het Groningenveld anders geproduceerd in de zomer dan in de winter. In de zomer wordt gas door de NorGroN-pijpleiding tussen het Groningenveld en de Norg UGS naar de Norg UGS gestuurd om deze weer op te vullen. Vóór het begin van het winterseizoen moet het geproduceerde volume van het voorgaande winterseizoen weer zijn aangevuld. Dit vereist drukscheiding om een hogere druk te handhaven in het zuidelijk pijpleidingensysteem van het veld. Productie uit de clusters in het zuidoostelijk deel (rond de Sappemeer-overslag) van het veld wordt gebruikt om de UGS Norg op te vullen (zie figuur 5). Tijdens de winter, is de bovengenoemde drukscheiding niet nodig (zie figuur 6).



Figuur 6 Het Groningen-productiesysteem zoals ingezet gedurende de het winterseizoen.



Figuur 7 Het Groningen-productiesysteem zoals ingezet gedurende de het zomerseizoen.

6 Productieoptimalisatie

Het eerdergenoemde Hazard and Risk analyse (ook wel dreigings- en risicomodel) wordt ook gebruikt voor de optimalisatie van de verdeling van de gasproductie over de verschillende productieclusters van het Groningen-gasproductiesysteem. Dit vereist dat een groot aantal verschillende productiestrategieën moet worden doorgerekend en de effecten moeten worden ingeschat en vergeleken. Gebaseerd op van tevoren vastgesteld criteria zal dan de optimale productiestrategie worden vastgesteld. Dit optimalisatieproces stelt hoge eisen aan de betrouwbaarheid van de voorspellingen van het dreigings- en risicomodel.

Het gaat hierbij dus om een complexe en intensieve berekeningen die veel computertijd vereisen. Om praktische redenen moet hierbij in verschillende delen van het model gebruik worden gemaakt van vereenvoudigde modelimplementaties en vereenvoudigde modellen. Dit zijn de zogenoemde proxy-modellen.

De validiteit van deze proxy-modellen moet, voor het parameterbereik dat voor de optimalisatie van belang is, worden getest en verzekerd. Daarnaast zal met een aantal testberekeningen door het volledige dreigings- en risicomodel worden gevalideerd dat het berekende en gevonden optimum inderdaad (gebaseerd op de criteria) een optimum is.

Van groot belang is dat de gevonden theoretische geoptimaliseerde verdeling van de productie uit de verschillende clusters ook in het veld praktisch geïmplementeerd kan worden binnen de gestelde beperkingen aan de productie, zoals eerder beschreven in het vorige hoofdstuk.

De oplevering van resultaten en evaluatie van eventuele beheersmaatregelen is gepland voor 1 november 2017 (in lijn met Instemmingsbesluit). Tussentijdse resultaten van deze analyses zullen maandelijks gedeeld worden met SodM.

7 Kwaliteitsborging

Deze sectie beschrijft onafhankelijke borging op verzoek van NAM. Dit is een van de zeven lagen van het borgingsproces (zie hoofdstuk 10 van het Meet- en Regelprotocol). De kwaliteit van het borgingsproces is sterk afhankelijk van de expertise van de academici en wetenschappers die het werk beoordelen. In deze sectie geven we daarom een overzicht van de wetenschappers die het werk, uitgevoerd als deel van het door NAM geleide studieprogramma, hebben beoordeeld en suggesties hebben gedaan voor verdere verbetering. Achtergrond, overzicht van publicaties en de CV's van deze academici en wetenschappers zijn op het internet (www.nam.nl) beschikbaar.

De borgingsteams – de mensen die zich op verzoek van NAM bezighouden met de kwaliteitsborging van het Dreigings- en risicomodel – zijn geïnformeerd over de studies en modellen door middel van uitgebreide technische informatie en speciale workshops. De aanbevelingen van de borgingsteams zijn verwerkt in de technische rapporten in de sectie "verdere aanbevelingen". Deze rapporten zijn beschikbaar op www.nam.nl.

De borging van de geologische en reservoirmodellen van de diepe ondergrond (met name het gasreservoir) is gedaan door SGS Horizon. Deze heeft een uitgebreid beoordelingsverslag en een beoordelingsbrief geschreven die samen met de documentatie van deze modellen op www.nam.nl te vinden is.

In de tabellen hieronder staan de borgingsteams voor de verschillende onderdelen van het dreiging- en risicomodel genoemd.

Het borgingsteam voor "Ondiep Geologische Model":

Externe Expert	Afkomstig van	Belangrijkste Expertise Gebied
Adriaan Janszen	Exxonmobil	Ondiep Geologische Model
Eric Meijles	University Groningen	Ondiep Geologische Model
Joep Storms	TU Delft	Ondiep Geologische Model
Tijn Berends	Student; University Groningen	Site Response en Ondiep Geologische Model

Tabel 10 Het Borgingsteam voor "Ondiep Geologische Model".

Het Borgingsteam voor “Ground Motion Prediction”:

Externe Expert	Afkomstig van	Belangrijkste Expertise Gebied
Gail Atkinson	Western University, Ontario, Canada	Ground Motion Prediction
Hilmar Bungum	NORSAR, Norway	Ground Motion Prediction en lid van het panel voor de maximum magnitude van aardbevingen
Fabrice Cotton	GFZ Potsdam, Germany	Ground Motion Prediction
John Douglas	University of Strathclyde, UK	Ground Motion Prediction
Jonathan Stewart	UCLA, California, USA	Ground Motion Prediction
Ivan Wong	AECOM, Oakland, USA	Ground Motion Prediction en lid van het panel voor de maximum magnitude van aardbevingen
Bob Youngs	AMEC, Oakland, USA	Ground Motion Prediction en lid van het panel voor de maximum magnitude van aardbevingen

Tabel 11 Het Borgingsteam voor “Ground Motion Prediction”. Ivan Wong en Bob Youngs zitten ook in het panel voor maximum magnitude van aardbevingen.

Verschillende experten en academici hebben advies gegeven over het gebruik van “finite fault rupture simulations” in de ontwikkeling van “ground-motion prediction equations”. Doel was om aan te sluiten bij de state-of-the-art op dit gebied, dat nog in ontwikkeling is. De experts van wie advies is gevraagd zijn:

Externe Expert	Afkomstig van	Belangrijkste Expertise Gebied
Norm Abrahamson	University of California at Berkeley	Simulaties van breuken voor de California GMPEs
Christine Goulet	Southern California Earthquake Center (SCEC)	Validation en benchmarking van simulatie codes voor bewegingen op breukvlakken.
Luis Angel Dalguer	SwissNuclear	Huidige stand van simulatie van bewegingen op breukvlakken
Bob Youngs	AMEC Foster Wheeler	Simulatie van bewegingen op breukvlakken voor de NGA-East GMPEs

Tabel 12 External experts in workshop over finite fault simulations in de ontwikkeling van GMPE.

Door de mathematische complexiteit zijn de seismologische modellen die het dreigings- en risicomodel ondersteunen kritische beoordeeld door Prof. Ian Main (of Edinburgh University).

In een formele workshop volgens de richtlijnen voor een SSHAC niveau 3 process, is een panel van experts gevraagd om een inschatting te maken van de verdeling van M_{max} waarden voor het Groningen gebied, gebaseerd op de huidige kennis en onzekerheden.

Dit panel bestond uit:

Externe Expert	Afkomstig van	Rol
Kevin Coppersmith	Geomatrix Consultants Inc.	Voorzitter SHACC-panel
Ivan Wong	AECOM, Oakland, USA	Ground Motion Prediction en lid van het SHACC-panel
Bob Youngs	AMEC, Oakland, USA	Ground Motion Prediction en lid van het SHACC-panel
Jon Ake	US Nuclear Regulatory Commission	Lid van het SHACC-panel
Hilmar Bungun	Norsar Norway	Lid van het SHACC-panel
Torsten Dahm	GFZ Potsdam	Lid van het SHACC-panel
Art McGarr	US Geological Survey	Lid van het SHACC-panel
Ian Main	University Edinburgh	Seismogenic Model/Statistics en lid van het SHACC-panel

Tabel 13 Het panel voor de bepaling van de Mmax verdeling.

De externe experts die in de workshop presentaties hebben gegeven aan het panel zijn:

Externe Expert	Afkomstig van	Rol
Serge Shapiro	Freie Universiteit Berlin	Onafhankelijk Adviseur
Emily Brodsky	University of California, Santa Cruz	Onafhankelijk Adviseur
Jenny Suckale	Stanford University, Department of Geophysics	Onafhankelijk Adviseur
Gilian Foulger	Durham University, Department of Geophysics	Onafhankelijk Adviseur
Gert Zöller	University of Potsdam Institute of Mathematics and Focus Area for Dynamics of Complex Systems	Onafhankelijk Adviseur

Tabel 14 Experts die presentaties hebben gegeven aan het SSHAC-panel voor M_{max}.

Het borgingsteam voor “Building Fragility” bestaat uit:

Externe Expert	Afkomstig van	Belangrijkste Expertise Gebied
Jack Baker	Stanford University, USA	Fragility Functions en Risicoanalyse
Paolo Franchin	University of Rome “La Sapienza”	Fragility Functions en Risicoanalyse
Michael Griffith	University of Adelaide, Australia	Modelleren en testen van baksteen (Masonry) gebouwen
Curt Haselton	California State University, US	Modelleren van baksteen (Masonry) gebouwen
Jason Ingham	University of Auckland	Seismic Response of baksteen (Masonry) gebouwen
Nico Luco	United States Geological Survey	Risicoanalyse voor Building Fragility
Dimitrios Vamvatsikos	NTUA, Greece	Fragility Functions en risicoanalyse

Tabel 15 Het Borgingsteam voor “Building Fragility”.

8 Verwijzingen naar meer informatie

In deze sectie kunt u meest belangrijke verwijzingen naar technische rapporten vinden die de verschillende delen van het Meet- en Regelprotocol verder ondersteunen. Omdat deze lijst met verwijzingen naar rapporten steeds zal worden bijgewerkt, is ervoor gekozen om deze in een Technisch Addendum op te nemen en niet in de tekst van het Meet- en Regelprotocol zelf.

Voor elk onderwerp besproken in de tekst zullen verwijzingen worden gegeven.

8.1 Rol van het dreigings- en risicomodel voor geïnduceerde bevingen in Groningen

8.1.1 Opbouw van het Model

Overzicht van de activiteiten om het dreigings- en risicomodel te bouwen zijn vast gelegd in het "Study and Data Acquisition Plan". Dit document in verschillende keren geactualiseerd:

1. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, Jan van Elk & Dirk Doornhof, January 2013, submitted in November 2012.
2. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen for the update of the Winningsplan 2016, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, Jan van Elk & Dirk Doornhof, December 2014, submitted in March 2015.
3. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 - Part 1, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st April 2016.
4. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 - Part 2, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st April 2016.
5. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 - Progress and Schedule, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st December 2016.

8.1.2 Gegevensvergaring - specifieke meetcampagnes

Zwaartekrachtsmetingen boven het hele veld en omliggende aquifers.

6. Gravity monitoring of the Groningen gas field 2015, Quad Geometrics, Ola Eiken, April, 2016.

Bodemonderzoek om de ondiepe ondergrond en aarde.

7. De ondergrond van Groningen: een Geologische Geschiedenis, Erik Meijles, April 2015.
8. Geological schematisation of the shallow subsurface of Groningen (For site response to earthquakes for the Groningen gas field) – Part I, Deltares, Pauline Kruiver and Ger de Lange.
9. Geological schematisation of the shallow subsurface of Groningen (For site response to earthquakes for the Groningen gas field) – Part II, Deltares, Pauline Kruiver and Ger de Lange.
10. Geological schematisation of the shallow subsurface of Groningen (For site response to earthquakes for the Groningen gas field) – Part III, Deltares, Pauline Kruiver and Ger de Lange.

Geofysische metingen bij de KNMI-stations.

11. Geophysical Measurements of shear wave velocity at KNMI accelerograph stations in the Groningen field area, Deltares, Marco de Kleine, Rik Noorlandt, Ger de Lange, Marios Karaoulis and Pauline Kruiver, July 2016.

Flexibel geofoonnetwerk

12. Presentatie flexibel netwerk geofoons, Jan van Elk, Dirk Doornhof and Xander Campman, March 2017.

8.1.3 Gegevensvergaring - Monitoring

Reservoirdruk

13. Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013; Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds), November 2013.
14. Groningen Field Review 2015 Subsurface Dynamic Modelling Report, Burkitov, Ulan, Van Oeveren, Henk, Valvatne, Per, May 2016.
15. Independent Review of Groningen Subsurface Modelling Update for Winningsplan 2016, SGS Horizon, July 2016.
16. Monitoring Reservoir Pressure in the Groningen gasfield, Leendert Geurtsen and Quint de Zeeuw, April 2017.

Bodemdaling

17. Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013; Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds), November 2013.
18. Regularised direct inversion to compaction in the Groningen reservoir using measurements from optical levelling campaigns, S.M. Bierman, F. Kraaijeveld and S.J. Bourne, March 2015.
19. Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2016 - Production, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard and Risk Assessment in the Groningen Field, PART II - Subsidence, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds), 1st April 2016.
20. Subsidence inversion on Groningen using leveling data only, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Onno van der Wal, Rob van Eijs), December 2016.

Reservoircompactie

21. In-situ compaction measurements using gamma ray markers, Pepijn Kole, June 2015
22. Regularised direct inversion to compaction in the Groningen reservoir using measurements from optical levelling campaigns, S.M. Bierman, F. Kraaijeveld and S.J. Bourne, March 2015.

Seismiciteit

23. Voortgangsrapportage Diepe Geofoons, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, September 2014.
24. Voortgangsrapportage Diepe Geofoons, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, June 2015.
25. A re-estimate of the earthquake hypo-centre locations in the Groningen Gas Field, Matt Pickering, March 2015.

26. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 - Part 1, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st April 2016.
27. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 - Progress and Schedule, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st December 2016.
28. Bierman, S, R. Paleja and M. Jones, Statistical methodology to test for evidence of seasonal variation in rates of earthquakes in the Groningen field, April 2015.
29. Measuring changes in earthquake occurrence rates in Groningen – Update October 2016, Shell Statistics Group, Rakesh Paleja and Stijn Bierman, October 2016.
30. Local and Moment Magnitudes in the Groningen Field, Bernard Dost, Ben Edwards and Julian J Bommer, March 2016.
31. Harkstede 2A microseismic monitoring summary, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, Jelena Tomic, March 2016.

Grondversnelling en snelheid

32. An activity rate model of induced seismicity within the Groningen Field, (Part 1), Stephen Bourne and Steve Oates, February 2015.
33. An activity rate model of induced seismicity within the Groningen Field, (Part 2), Stephen Bourne and Steve Oates, June 2015.
34. Development of Version 1 GMPEs for Response Spectral Accelerations and for Strong-Motion Durations, Julian J Bommer, Peter J Stafford, Benjamin Edwards, Michail Ntinalexis, Bernard Dost and Dirk Kraaijpoel, March 2015.
35. Development of Version 2 GMPEs for Response Spectral Accelerations and Significant Durations for Induced Earthquakes in the Groningen field, Julian Bommer et al., October 2015.

Versnelling en snelheid van het fundament van een gebouw

36. TNO rapport, Monitoring Network Building Vibrations - Analysis Earthquakes in 2014 and 2015, ir. H. Borsje, ir. J.P. Pruiksma and ir. S.A.J. de Richemont TNO 2016 R11323/A, December 2016.

Gebouwenschade

37. Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2016 - Production, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard and Risk Assessment in the Groningen Field, PART V - Damage and Appendices, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st April 2016.
38. Methodology prognosis of building damage and study and data acquisition plan for building damage Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, Jan van Elk and Jeroen Uilenreef, February 2016.

Sociaal-maatschappelijke effecten

39. Maatschappelijke Effecten Inventarisatie van aardbevingen in Noordoost-Groningen 2016, Tweede Inventarisatie, 2016, Royal Haskoning (Klant: Nederlandse Aardolie Maatschappij BV).

8.1.4 Borgingsprocessen

Het borgingsproces gebruikt voor de studies die hebben bijgedragen aan het dreigings- en risicomodel zoals het is gebruikt voor Winningsplan 2016 staat beschreven in:

40. Study and Data Acquisition Plan Induced Seismicity in Groningen Update Post-Winningsplan 2016 - Part 1, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st April 2016.

8.1.5 Kwaliteitsbewaking

Een gedetailleerde beschrijving van het kwaliteitsbewakingsprotocol staat, samen met een toepassing op de dreigings- en risicovoorspellingen voor Winningsplan 2016, beschreven in:

41. Summary and discussion of software benchmarking for Groningen PSHRA code, Stephen Bourne and Steve Oates, April 2016.

8.1.6 Optimalisatie van de verdeling van de productie

De studies om de optimalisatie te kunnen uitvoeren en geschikte proxy-modellen te bouwen zijn opgestart in 2015, nadat het dreigings- en risicomodel

42. Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2016 - Production, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard and Risk Assessment in the Groningen Field, PART I – Summary and Production, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (Jan van Elk and Dirk Doornhof, eds.), 1st April 2016.
43. Methodology for the Optimisation of the distribution of gas production from the Groningen field with the aim to reduce seismicity, Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, Leendert Geurtsen, Per Valvatne and Henk van Oeveren, April 2017.

Referenties

1. Statistics of seismic events at the Groningen field, Bulletin of Earthquake Engineering 14(77), 2016, Manuel Nepveu (TNO), Karin Van Thienen-Visser (TNO), Danijela Sijacic (TNO).
2. Trend changes in ground subsidence in Groningen, update May 2016. Frank Pijpers en D. Jan van der Laan.
3. A phenomenological relationship between reservoir pressure and tremor rates in Groningen, 2016., Frank P. Pijpers, CBS.
4. Statistical methodology to test for evidence of seasonal variation in rates of earthquakes in the Groningen field, Stijn Bierman (Shell), 2015, 2016.
5. Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field, 2015, TNO, Karin van Thienen-Visser, Danijela Sijacic, Manuel Nepveu, JanDiederik van Wees, Jenny Hettelaar.
6. An activity rate model of induced seismicity within the Groningen Field (Part 1) Stephen Bourne and Steve Oates, 2015.
7. Impact of various modelling options on the onset of fault slip and the fault slip response using 2-dimensional Finite-Element modelling, 2015, Peter van den Bogert (Shell).
8. Okada, S. and Takai (1999) Classifications of structural types and damage patterns of buildings for earthquake field investigation, Jour. Of Struct. And Constrt. Eng. 524, doi: 10.3130/aijs.64.65_5
9. Hancilar et al (2012) Empirical fragility assessment after the January 12, 2010 Haiti Earthquake. Risk Analysis VII: Eight international conference on simulation in risk analysis and hazard mitigation. WitPress ISBN 978-1-84564-620-2. P 353-365