



> Retouradres Postbus 24037 2490 AA Den Haag

De Minister van Economische Zaken  
t.a.v. de heer H.G.J. Kamp  
Postbus 20401  
2500 EK DEN HAAG

**Staatstoezicht op de Mijnen**

**Bezoekadres**

Henri Faasdreef 312  
2492 JP Den Haag

**Postadres**

Postbus 24037  
2490 AA Den Haag

T 070 379 8400 (algemeen)  
F 070 379 8455 (algemeen)

sodm@minez.nl  
www.sodm.nl

**Behandeld door**

J.W. de Jong MEng

T 070 379 8437

**Ons kenmerk**

14005929

**Uw kenmerk**

**Bijlage(n)**

1

Datum 13 januari 2014  
Betreft aanbieding advies 'wijziging Winningsplan Groningen 2013'  
en 'Meet- en Monitoringsplan'

Excellentie,

Met deze brief bied ik u het advies van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) aan over de wijziging van het Winningsplan Groningen 2013 (hierna: winningsplan Groningen 2013) en het 'Meet- en Monitoringsplan' van de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM), ingediend op 29 november 2013. In bijgaand advies is de toelichting op het winningsplan betrokken, die NAM op 23 december 2013 aan u heeft aangeboden.

Uit de totale beoordeling van het winningsplan Groningen 2013 blijkt dat het plan op de meest essentiële onderdelen tekortkomingen vertoont. Daarom adviseert SodM u niet in te stemmen met het winningsplan Groningen 2013. Tevens adviseert SodM u NAM op te dragen op zo kort mogelijke termijn vijf clusters<sup>1</sup> rondom Loppersum tijdelijk in te sluiten. Tot slot adviseert SodM u onder voorwaarden, wel in te stemmen met het 'Meet- en Monitoringsplan'.

### **Aanleiding**

Vanwege een toename van het aantal zwaardere, schadeveroorzakende aardbevingen in het Groningen gasveld, de relatie met de gaswinning aldaar en de onzekerheid over de maximaal mogelijke sterkte van bevingen, heeft NAM in januari 2013 van u opdracht gekregen het bestaande winningsplan voor het Groningen gasveld aan te passen. Met de toename van het aantal zwaardere aardbevingen in het Groningen gasveld is immers ook het veiligheidsrisico voor de bevolking in het gebied toegenomen.

In het winningsplan Groningen 2013 moet, naast het voorkomen en beperken van schade, duidelijk zijn wat de huidige grootte van het veiligheidsrisico door aardbevingen in het Groningen gasveld is. Zo kan een oordeel worden gevormd over mogelijke schade en letsel. Ook moet NAM in het plan maatregelen beschrijven, die zowel de kans op als het effect van meer en zwaardere aardbevingen verminderen. Daarbij zijn de grootte en verdeling van de gasproductie de belangrijke bepalende factoren, naast het voortvarend aardbevingsbestendig maken van gebouwen.

<sup>1</sup> Cluster: groep putten die aan hetzelfde veld gas onttrekken

U hebt SodM gevraagd op basis van het winningsplan Groningen 2013 te beoordelen of de gaswinning op een verantwoorde wijze plaatsvindt en wat de gevolgen zijn voor het veiligheidsrisico voor de bewoners van het gebied waaronder het gasveld zich bevindt.

### **Ontwikkelingen in 2013**

Het veiligheidsrisico voor de inwoners van het hierboven genoemde gebied is, door een aantal ontwikkelingen sinds januari 2013, onverminderd hoog. Zo laten data van KNMI ten opzichte van voorgaande jaren een stijging van het totaal aantal jaarlijkse aardbevingen in dit gebied zien en tevens een toename van het aantal zwaardere schadeveroorzakende aardbevingen. Deze bevingen worden veroorzaakt door de gaswinning in dit gebied.

Daarnaast blijkt uit productiecijfers van NAM een ongewijzigd aanhoudend hoge gasproductie; in 2012 was dit 48 miljard Nm<sup>3</sup> en in 2013 ca. 54 miljard Nm<sup>3</sup>. Ook ziet NAM jaarlijks een toename van de hoeveelheid energie die vrijkomt bij aardbevingen in Groningen. Uit het winningsplan blijkt dat NAM bij voortzetting van geplande gasproductie in de komende jaren een verdere stijging van deze vrijkomende energie verwacht. NAM gaat ervan uit dat dit tot uiting zal komen in een toename van het aantal aardbevingen, inclusief een toename van het aantal zwaardere bevingen.

Deze ontwikkelingen rechtvaardigen een snelle en adequate aanpak van de verlaging van het veiligheidsrisico in het Groningen gasveld.

Eén van uw specifieke vragen aan NAM ging over de hoogte van de (nieuwe) maximale sterkte van bevingen voor het Groningen gasveld. Deze vraag wordt in het winningsplan Groningen 2013 niet beantwoord. De reden daarvoor is dat de maximale seismische dreiging<sup>2</sup> voor de bewoners in het gebied van groter belang is, dan de vraag wat nu precies de maximale sterkte van een aardbeving kan worden. De Technische Begeleidingscommissie Ondergrond deelt deze mening van NAM. SodM staat hier eveneens achter.

### **Veiligheidsrisico door aardbevingen**

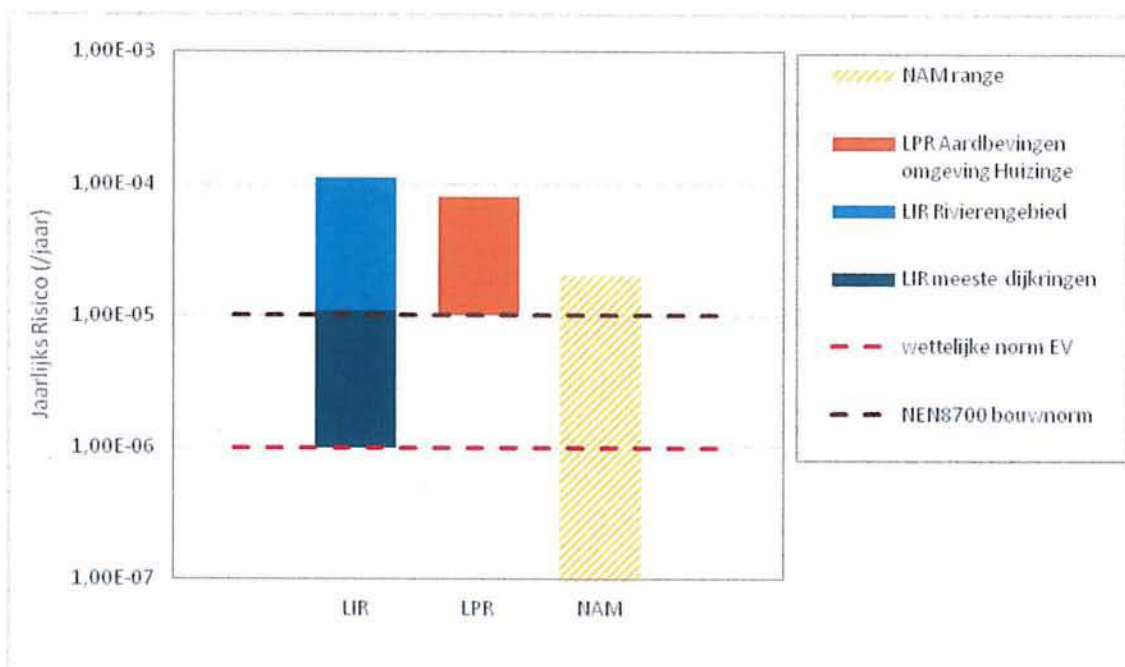
Omdat het winningsplan Groningen 2013 geen adequaat inzicht geeft in de grootte van de veiligheidsrisico's door aardbevingen, heeft SodM hiervoor eigen berekeningen gemaakt. Deze berekeningen zijn oa. gebaseerd op de resultaten uit onderzoeken 1, 4, 5 en 6. SodM heeft deze berekeningen oa. door het RIVM laten beoordelen.

Uit de berekeningen blijkt dat het veiligheidsrisico voor personen (het Lokaal Persoonlijk Risico) bij aardbevingen door gaswinning met een epicentrum in het gebied tussen Huizinge, Zandeweer en Hoeksmeer, **vergelijkbaar is met de hoogste overstromingsrisico's**. In vergelijking met andere industriële risico's in

---

<sup>2</sup> De versnelling en snelheid van de beweging van de bodem aan het maaiveld door aardbevingen.

de maatschappij zoals nationale en -internationale bouwcodenormen voor risico's door belastingen op huizen bij natuurlijke aardbevingen, is dit aardbevingsrisico **hoog**. In figuur 1 is dit grafisch weergegeven.



Figuur 1: Het Lokaal Persoonlijk Risico (LPR) voor aardbevingen in de omgeving van Huizinge in relatie tot het Lokaal Individueel Risico (LIR) voor overstromingen, de wettelijke norm voor Externe Veiligheidsinrichtingen (EV) en de NEN 8700 bouwnorm voor belastingen op huizen.

### Beoordeling winningsplan Groningen 2013

De beoordeling van het winningsplan Groningen 2013 is door SodM toegespitst op drie onderwerpen: de volledigheid van het winningsplan, de wijze van winning ('planmatig beheer') en de risico's die aan de gaswinning verbonden zijn vanwege bodemdaling en aardbevingen. De keuze van deze onderwerpen vloeit voort uit de Mijnbouwwet.

De conclusie van SodM is dat de pijlers waarop het winningsplan Groningen 2013 rust, niet solide zijn. Deze pijlers zijn:

1. Het veiligheidsrisico van de activiteiten in het winningsplan beoordeelt NAM als acceptabel;
2. NAM neemt geen maatregelen om de seismische activiteit terug te brengen, bijvoorbeeld door productievermindering, omdat men niet verwacht dat dit op korte termijn zal leiden tot vermindering van de dreiging van aardbevingen en de risico's die daar het gevolg van zijn.

SodM vindt dit geen solide uitgangspunten, omdat:

Ad. 1: NAM een verkeerd type risicoanalyse heeft toegepast, namelijk een analyse die een industrieel risico als uitgangspunt neemt. Deze aanpak is niet geschikt voor het in kaart brengen van aardbevingsrisico's. Daarnaast berekent NAM het Plaatsgebonden Risico op verkeerde wijze, waardoor dit niet als zodanig geïnterpreteerd mag worden;

Ad. 2: NAM een selectieve keuze van modellen en parameters heeft gemaakt om het effect van productiesnelheid en productieverdeling te berekenen. Controleberekeningen van TNO laten zien dat een andere verdeling van de productie over het gasveld, al dan niet in combinatie met een vermindering van de totale productie al op korte termijn (1 à 2 jaar) zou kunnen leiden tot een aanzienlijke (tijdelijke) verlaging van de seismische activiteit.

Eén van de door TNO doorgerekende productiescenario's met een productiestop in de vijf clusters binnen een straal van 10 km van Loppersum, geeft de komende jaren een significante afname van de drukdaling onder het meest aardbevingsgevoelige gebied. Met een vertraging van naar verwachting ongeveer één jaar, zal daardoor ook de toename van de samendrukking (compactie) onder dit gebied sterk gereduceerd worden en de jaarlijkse dreiging van aardbevingen en daarmee ook het veiligheidsrisico door aardbevingen, afnemen.

Uit de totale beoordeling door SodM van het winningsplan Groningen 2013 blijkt dat naast bovengenoemde aspecten, het winningsplan Groningen ook op andere onderdelen tekortkomingen vertoont. Een gedetailleerde uitwerking daarvan vindt u in het bijgevoegde advies. In deze brief worden de productiefilosofie, het Borgingsprotocol en het 'Meet- en Monitoringsplan' kort besproken.

#### *De productiefilosofie / het Borgingsprotocol*

NAM's productiefilosofie is gebaseerd op drie zaken: de marktvraag, de opgelegde beperkingen op basis van de Gaswet en de productiecapaciteit. De inschatting van het veiligheidsrisico door aardbevingen is daarin nauwelijks meegenomen. In de productiefilosofie ontbreekt de norm op basis waarvan NAM maatregelen kan nemen om op enig moment het veiligheidsrisico door aardbevingen terug te brengen.

In het Borgingsprotocol worden geen duidelijke maatregelen beschreven die zullen worden genomen, als resultaten uit het 'Meet- en Monitoringsplan' aangeven dat van tevoren vastgestelde grenzen overschreden dreigen te worden. Er worden geen waarden aangegeven voor de te hanteren grenzen.

#### *Het 'Meet- en Monitoringsplan'*

SodM vindt het 'Meet- en Monitoringsplan', wat betreft de seismische instrumentatie, een goede beschrijving geven van een relevante uitbreiding van het meetnet, die aansluit op het bestaande netwerk van seismometers. Door deze uitbreiding zal het netwerk in alle deelgebieden een aanzienlijke toename van de precisie van de aardbevingslocaties geven. Om de bodembeweging continu en met een grotere precisie te kunnen volgen, adviseert SodM om het aantal permanente GPS-meetstations met nog eens vijf stuks uit te breiden.

### **Advies**

SodM pleit ervoor om zodanige maatregelen te nemen dat het seismisch veiligheidsrisico wordt verlaagd en tegelijk een voortvarend preventieprogramma en een goed meet- en studieprogramma wordt uitgevoerd. Dit kan bereikt worden door, uit oogpunt van veiligheid, het volgende advies te volgen:

1. SodM adviseert de minister van EZ niet in te stemmen met de wijziging van het Winningsplan Groningen 2013 van NAM.
2. SodM adviseert de minister van EZ, met gebruikmaking van artikel 50 van de Mijnbouwwet, aan NAM een zestal maatregelen voor te schrijven, waaronder:
  - NAM sluit op zo kort mogelijke termijn van de negenentwintig beschikbare productieclusters, de vijf clusters in het meest risicovolle gebied rond Loppersum ('t Zandt, Overschild, De Paauwen, Ten Post en Leermens) voor een periode van ten minste drie jaar.
  - NAM voert preventieve maatregelen uit zoals aangegeven in sectie C6.2.1 van het winningsplan Groningen 2013.
3. SodM adviseert de minister van EZ, onder voorwaarden, in te stemmen met het ingediende Meet- en Monitoringsplan van NAM.

### **Tot slot**

De diverse onderzoeken laten zien dat het onduidelijk is hoe groot de verdere toename van het risico in Groningen op langere termijn zal zijn. In dit advies heeft SodM zich daarom geconcentreerd op de risico's in de komende drie jaar, die wèl in redelijke mate voorspelbaar zijn.

Het veiligheidsrisico door aardbevingen als gevolg van gaswinning voor de bewoners van het gebied boven het Groningen gasveld is de komende drie jaar onverminderd hoog, in vergelijking met andere grote veiligheidsrisico's in Nederland. Dit veiligheidsrisico zal nog hoger worden als de huidige gasproductieplanning zoals beschreven in het winningsplan Groningen 2013 wordt uitgevoerd. De hierin aangegeven productiefilosofie houdt onvoldoende rekening met het seismisch risico en de beheersing daarvan.

Daarom adviseer ik u niet in te stemmen met het winningsplan Groningen 2013 en de NAM op te dragen de vijf clusters in het meest risicovolle gebied rond Loppersum tijdelijk te sluiten. Met deze maatregel neemt de toenemende dreiging op zwaardere aardbevingen in dit gebied af en zijn de bewoners direct het meest gebaat.

Tenslotte zou ik u willen aanbevelen een landelijk risicobeleid te ontwikkelen voor dit soort grotere veiligheidsrisico's en daarvoor bepaalde acceptatiecriteria vast te stellen. Vanuit mijn verantwoordelijkheid als toezichthouder op het terrein van olie- en gaswinning, verleen ik daar graag mijn medewerking aan.

Met vriendelijke groet,

J.W. de Jong, M.Eng  
*Inspecteur-generaal der Mijnen*

Bijlage:

Advies wijziging Winningsplan Groningen 2013 en het Meet- en Monitoringsplan,  
SodM, Jan. 2014



Staatstoezicht op de Mijnen  
*Ministerie van Economische Zaken*

# Staatstoezicht op de Mijnen

## Advies

Winningsplan 2013/ Meet- en Monitoringsplan NAM  
Groningen gasveld

januari 2014





# Inhoud

1. Inleiding .....	3
2. Ontwikkelingen januari – december 2013 .....	4
2.1 Uitgevoerde onderzoeken.....	4
2.2 Toename aantal aardbevingen .....	5
3. Beoordeling Winningsplan.....	6
3.1 Werkwijze.....	6
3.2 Volledigheid .....	6
3.2.1 <i>Conclusie Volledigheid</i> .....	6
3.3 Planmatig beheer.....	6
3.3.1 <i>Wat is planmatig beheer?</i> .....	6
3.3.2 <i>Opmerkingen SodM</i> .....	7
3.3.3 <i>Conclusies Planmatig Beheer</i> .....	8
3.4 Bodembeweging .....	9
3.4.1 <i>Leeswijzer bodembeweging</i> .....	9
3.4.2 <i>Bodemdaling</i> .....	9
3.4.3 <i>Seismisch Risico</i> .....	12
3.4.4 <i>Invloed van gasproductie op de seismische activiteit</i> .....	17
3.4.5 <i>Borgingsprotocol aardbevingsrisico 's</i> .....	22
3.4.6 <i>Conclusies Bodembeweging</i> .....	26
4. Beoordeling Integraal Meet- en Monitoringsplan.....	28
4.1 Werkwijze.....	28
4.2 Volledigheid .....	28
4.3 Inhoudelijk .....	28
4.3.1 <i>Hoogtemetingen</i> .....	28
4.3.2 <i>Detectie seismiciteit</i> .....	29
4.4 Conclusie.....	30
5. Advies .....	31
5.1 Fundatie van het winningsplan.....	31
5.2 Maatregelen.....	31
5.3 Advies.....	32
Referenties .....	34
Lijst van afkortingen.....	35
Bijlage 1: Consequenties beoordeling Bommer et al. op ARUP seismisch risico rapport .....	36
Bijlage 2: Commentaar op NAM hazard analyse.....	38
Bijlage 3: NAM analyse naar invloed van productiesnelheid op seismiciteit Groningen .....	40

# 1. Inleiding

De Minister van Economische Zaken (EZ) heeft aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) gevraagd<sup>1</sup> een advies te geven over de wijziging van het winningsplan Groningen 2013 van de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM). Dit rapport bevat het gevraagde advies.

Dit advies gaat over twee documenten die NAM per brief van 29 november 2013, kenmerk EP201311216133, aan de Minister van EZ heeft aangeboden, namelijk "Wijziging winningsplan Groningen 2013" (inclusief het Borgingsprotocol Seismisch Risico Groningen) en het "Meet- en Monitoringsplan". Dit laatste plan maakt geen deel uit van het winningsplan, maar hangt wel met het winningsplan samen. Daarom heeft NAM aan de Minister verzocht om beide plannen gecoördineerd te behandelen.

In dit advies zijn tevens de onderliggende studies van NAM betrokken. Deze studies heeft NAM per brief van 29 november 2013, kenmerk EP201311216689, aan de Minister aangeboden. Daarnaast is gebruik gemaakt van een toelichting op het winningsplan Groningen 2013, die NAM per brief van 23 december 2013, kenmerk EP201312212241, aan de Minister heeft gestuurd. Bovendien zijn de rapportages van het KNMI, de Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO) en de Technische Begeleidingscommissie Bovengrond (TBB) bij dit advies betrokken, voor zover zij van toepassing zijn op het winningsplan Groningen 2013.

In dit advies wordt de wijziging winningsplan Groningen 2013 steeds aangeduid als "winningsplan Groningen 2013". Het advies is als volgt opgebouwd. Eerst worden de ontwikkelingen in het afgelopen jaar besproken (hoofdstuk 2). Daarna volgt een beoordeling van het winningsplan Groningen 2013 (hoofdstuk 3). Vervolgens wordt het Meet- en Monitoringsplan behandeld (hoofdstuk 4). Ten slotte volgt het advies (hoofdstuk 5).

---

<sup>1</sup> Zie kamerstukken: KST, 2012-2013, 33529, nr.1 en KST, 2012 -2013, 33529, nr. 25.

## 2. Ontwikkelingen januari – december 2013

### 2.1 Uitgevoerde onderzoeken

Na het advies van SodM van 22 januari 2013 over de toegenomen seismiciteit in de provincie Groningen<sup>2</sup> heeft de Minister van EZ elf onderzoeken in gang gezet, begeleid door de Stuurgroep "Onderzoek Aardbevingen Groningen"<sup>3</sup>. Daarnaast heeft de minister van EZ de NAM gevraagd vóór 1 december 2013 een wijziging Winningsplan Groningen in te dienen, waarin de daarvoor relevante onderzoeksresultaten worden betrokken<sup>4</sup>. De minister van EZ heeft SodM gevraagd hem over dit Winningsplan te adviseren.

De planning van de onderzoeken is opgenomen in een brief van 28 maart 2013<sup>5</sup>. Zie onderstaand overzicht:

Onderzoek	Gereed
1. Inventarisatie preventieve maatregelen	Juni 2013
2. Quick scan naar mogelijke effecten op vitale infrastructuur	Juni 2013
3. Schadepatroon bij hoger maximum beving	December 2013
4. Beïnvloedingscirkel bij hoger maximum beving	December 2013
5. Bepaling maximum beving	December 2013
6. Alternatieve winningstechnieken	December 2013
7. Mogelijkheden kwaliteitsconversie	December 2013
8. Mogelijke financiële effecten op inkomsten Staat	December 2013
9. Leveringscontracten	December 2013
10. Waardedaling	Juni 2013
11. Verankeren onafhankelijkheid schadeprocedures	Maart 2013

Figuur 1: Overzicht van de 11 onderzoeken

Bij haar werkzaamheden werd de stuurgroep inhoudelijk ondersteund door twee technische begeleidingscommissies: de Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO) en de Technische Begeleidingscommissie Bovengrond (TBB). De TBO heeft de onderzoeken 5 en 6 begeleid en de resultaten beoordeeld. De TBB heeft de onderzoeken 1, 2, 10 en 11 begeleid en de resultaten beoordeeld. Op verzoek van de Minister van EZ hebben deskundigen van SodM, TNO en KNMI zitting genomen in de TBO. Tevens heeft een bouwkundige van SodM zitting gehad in de TBB.

Voor de onderbouwing van het ingediende winningsplan Groningen 2013 zijn de resultaten van de onderzoeken 1, 4, 5 en 6 van belang. Het winningsplan Groningen 2013 omvat echter meer dan de resultaten van deze onderzoeken. Naast alternatieve winningstechnieken (onderzoek 6) en de maximum beving (onderzoek 5) komen in het winningsplan Groningen 2013 ook aan de orde: het seismisch risico, bodemdaling en maatregelen om

<sup>2</sup> [http://www.sodm.nl/sites/default/files/redactie/brief\\_sodm\\_13010015.pdf](http://www.sodm.nl/sites/default/files/redactie/brief_sodm_13010015.pdf)

<sup>3</sup> KST, 2012-2013, 33529, nr.2

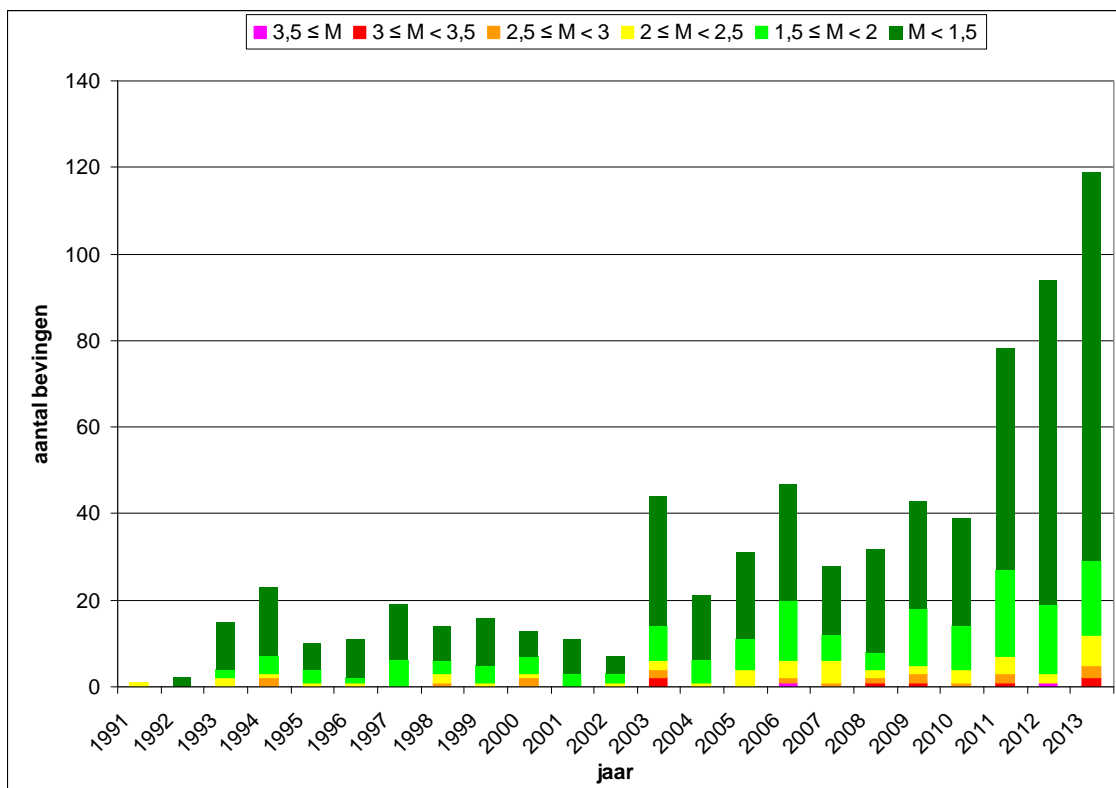
<sup>4</sup> KST, 2012-2013, 33529, nr.1

<sup>5</sup> KST, 2012-2013, 33529, nr.20

bodembewegingen te voorkomen of te beperken. In hoofdstuk 3 komt de beoordeling van al deze thema's aan de orde.

## 2.2 Toename aantal aardbevingen

Naast het werk aan de onderzoeken, heeft in het afgelopen jaar ook de bodem in Groningen niet stil gestaan. Het aantal (geregistreerde) aardbevingen in het Groningen veld is het afgelopen jaar, net zoals in de laatste jaren, verder toegenomen. Dit blijkt uit onderstaande grafiek, die gebaseerd is op registraties van het KNMI. Het aantal geregistreerde aardbevingen in 2013 bedroeg 119, waarvan 29 met een sterkte groter dan 1,5 op de schaal van Richter. In de grafiek is ook een toename van het aantal zwaardere, schadeveroorzakende aardbevingen zichtbaar.



Figuur 2: Overzicht van het aantal bevingen in Groningen per sterkteklasse (bron: KNMI)

Uit de onderzoeken die in 2013 zijn uitgevoerd blijkt dat deze toename van de seismische activiteit te maken heeft met de toename van de samendrukking (compactie) van het reservoirgesteente in het Groningen gasveld. Op zijn beurt hangt compactie samen met de hoeveelheid gas die aan het reservoirgesteente wordt onttrokken. Hoe meer gasproductie, hoe meer aardbevingen en hoe meer zwaardere, schadeveroorzakende aardbevingen [ref.1]. In hoofdstuk 3 wordt dit thema verder uitgewerkt.

## 3. Beoordeling Winningsplan

### 3.1 Werkwijze

Het winningsplan Groningen 2013 borduurt voort op het winningsplan Groningen 2007. NAM heeft ervoor gekozen om het plan totaal te vernieuwen. Om die reden heeft SodM besloten om het plan op dezelfde wijze te beoordelen als een "nieuw" winningsplan. Dat houdt in dat het plan op drie aspecten is getoetst: de volledigheid van het plan, de wijze van winning ("planmatig beheer") en de risico's die aan de winning verbonden zijn vanwege bodemdaling en aardbevingen. De keuze voor deze drie aspecten vloeit voort uit de Mijnbouwwet. Deze wet stelt dat de minister van EZ op basis van deze onderwerpen zijn instemming met het winningsplan kan onthouden of aan zijn instemming voorwaarden en/of beperkingen kan verbinden.

Het ingediende Meet- en Monitoringsplan maakt geen deel uit van het winningsplan Groningen 2013, maar hangt er wel mee samen. Het winningsplan is gebaseerd op artikel 34 van de Mijnbouwwet. Het Meetplan is gebaseerd op artikel 30 van het Mijnbouwbesluit. In het Meetplan wordt vastgelegd hoe bodembeweging door gasproductie (bodemdaling, seismiciteit) wordt gemeten. Het Meetplan moet jaarlijks worden geactualiseerd en voor instemming worden voorgelegd aan SodM. In het geval van Groningen heeft NAM ervoor gekozen om het meetplan samen te voegen met een monitoringsplan en voor instemming voor te leggen aan de minister van EZ.

Bij de beoordeling van het Meet- en Monitoringsplan heeft SodM geverifieerd of NAM het meten van de bodembeweging adequaat en doeltreffend zal uitvoeren.

### 3.2 Volledigheid

De Mijnbouwwet (Mbw) en het Mijnbouwbesluit (Mbb) bevatten regels over de inhoud van een winningsplan. Deze regels zijn opgenomen in artikel 35 van de Mijnbouwwet en in artikel 24 van het Mijnbouwbesluit. Om een goed advies te kunnen geven over het winningsplan, moet het plan compleet zijn. Daarom is dit het eerste beoordelingspunt.

#### 3.2.1 Conclusie Volledigheid

Alle vereiste onderwerpen komen in het winningsplan Groningen 2013 aan de orde. Bij de kwaliteit van de verschillende onderdelen van het winningsplan Groningen 2013 plaatst SodM opmerkingen. Deze worden in de volgende paragrafen besproken.

### 3.3 Planmatig beheer

#### 3.3.1 Wat is planmatig beheer?

Het begrip "planmatig beheer" komt op verschillende plaatsen voor in de Mijnbouwwet. Planmatig beheer betekent dat de winning van het gas op een doelmatige en verantwoorde manier moet plaatsvinden<sup>6</sup>. Het doel hiervan is het zo goed mogelijk benutten van het

---

<sup>6</sup> KST, 1998-1999, nr.7, p.38

aardgas als onze nationale bodemschat en het voorkomen dat onnodig gas in de grond achterblijft. De Mijnbouwwet gaat ervan uit dat de vergunninghouder zich inspant om het gas volgens de beginselen van planmatig beheer te exploiteren. Als uit het winningsplan blijkt dat de exploitatie onvoldoende in lijn is met het principe van planmatig beheer, dan kan de Minister van EZ zijn instemming met het winningsplan weigeren.

### **3.3.2 Opmerkingen SodM**

#### **a. gas in het Carboon**

Op p.1, sectie A2, van het winningsplan Groningen 2013 staat dat het plan alleen betrekking heeft op de winning van aardgas uit een zandsteenlaag die wordt aangeduid met "Rotliegend" (de Duitse aanduiding "Rot" betekent "rood" en verwijst naar de rode kleur van de zandsteen). Onder deze zandsteenlaag bevindt zich echter een gesteentepakket, dat aangeduid wordt met "Carboon". Dit gesteentepakket bevat steenkoollagen (Engels: carbon = koolstof), maar ook poreuze zandsteenlagen. Het is bekend dat deze zandsteenlagen in het Carboon voor een deel gasvoerend zijn. Alleen, die zandsteenlagen zijn niet erg goed doorlatend en bovendien staan de verschillende gesteentelagen niet goed met elkaar in verbinding. Dat bemoeilijkt het winnen van gas uit deze gesteentelagen.

In het Besluit wijziging winningsplan Groningen van 21 december 2007, kenmerk ET/EM/7159161<sup>7</sup>, heeft de Minister van EZ bepaald dat het moeilijk te winnen gas uit het Carboon niet uit het oog mag worden verloren. In het winningsplan Groningen 2013 schrijft NAM op p.14 over het Carboon:

"(..) dat de ontwikkeling van het Carboon met grote technische en financiële risico's gepaard gaat, en daarom tot nader order is uitgesteld."

Het argument om de ontwikkeling van het Carboon uit te stellen vindt SodM valide. Al vindt SodM het -uit oogpunt van planmatig beheer- van belang dat dit gas niet buiten beeld raakt. Bij toekomstige herzieningen van het winningsplan Groningen zou NAM telkens moeten nagaan of er mogelijkheden zijn om het gas uit het Carboon op een verantwoorde manier te winnen.

#### **b. Groningenplafond**

De omvang van de productie van het Groningen gasveld wordt vooral bepaald door de afnamevraag van GasTerra op basis van de fluctuerende marktvrage binnen de grenzen van het vastgestelde Groningen plafond. Het Groningen plafond is de totale hoeveelheid gas uit het Groningen veld, die op grond van artikel 55 van de Gaswet over een bepaalde periode door GasTerra mag worden afgenomen. Deze hoeveelheid wordt tenminste eenmaal per vijf jaar vastgelegd in een ministerieel besluit. Dit besluit is gericht aan GasTerra, niet aan NAM.

SodM merkt op, dat de vaststelling van het plafond onderdeel behoort uit te maken van de voorschriften (op grond van de Mijnbouwwet art.36, 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> lid) die aan de ministeriële

---

<sup>7</sup> Zie de website van het Nederlandse Olie en Gasportaal:  
[http://www.dinodata.nl/deliverables/sync/NLOG\\_FieldAsset\\_2353\\_20071224-1-01\\_NAMwiplaGRON\\_Matig-20080107-171237.PDF](http://www.dinodata.nl/deliverables/sync/NLOG_FieldAsset_2353_20071224-1-01_NAMwiplaGRON_Matig-20080107-171237.PDF)

instemming met het winningsplan verbonden worden. Het winningsplan moet hierin leidend zijn.

#### ***c. productiefilosofie***

In sectie B5.1 (productiefilosofie) van het winningsplan Groningen 2013 merkt NAM op dat 'planmatig beheer' en 'verantwoord opereren' twee aspecten zijn van het winningsplan.

In de paragraaf over 'verantwoorde gasproductie' merkt NAM op dat er een Borgingsprotocol Seismisch Risico is gemaakt met een bijbehorend Meet- en Monitoringsplan. Dit protocol moet "de beheersing van de seismische activiteit waarborgen om te voorkomen dat het risico de acceptabele grenzen gaat overschrijden", aldus NAM. Of dit daadwerkelijk het geval is, toetst SodM in paragraaf 3.4.5, waar het "Borgingsprotocol" aan de orde komt. De conclusie in die paragraaf is dat er onvoldoende sprake is van een systematische beheersing van het seismisch risico.

#### ***d. verlenging productieperiode***

Het winningsplan Groningen 2013 voorziet in een verlenging van de levensduur van het Groningen veld van het jaar 2068 (winningsplan 2007) tot 2080 (winningsplan Groningen 2013).

Gelet op het langjarige karakter van gascontracten en de lange termijn energievoorziening van Nederland is het goed dat NAM het productieplaatje schetst voor de hele levensduur van het Groningen veld. Vanwege het seismische risico dat aan de gaswinning is verbonden, is het noodzakelijk dat NAM het plan jaarlijks ijkt en aan de hand daarvan het winningsplan Groningen ten minste iedere vijf jaar actualiseert, of zoveel eerder als noodzakelijk. Zie ook de opmerkingen van SodM over het Borgingsprotocol in paragraaf 3.4.5.

### ***3.3.3 Conclusies Planmatig Beheer***

- NAM zou de mogelijkheden van de winning van gas uit het Carboon in de toekomst opnieuw moeten bezien.
- De vaststelling van het Groningenplafond behoort onderdeel uit te maken van de voorschriften bij het winningsplan. Het winningsplan moet hierin leidend zijn.
- NAM's productiefilosofie houdt onvoldoende rekening met een systematische beheersing van het seismisch risico.
- De levensduur van het Groningen veld is in het winningsplan Groningen 2013 verlengd tot 2080. Vanwege het seismische risico dat aan de gaswinning is verbonden, vindt SodM het noodzakelijk dat NAM het plan jaarlijks ijkt en aan de hand daarvan het winningsplan Groningen ten minste iedere vijf jaar actualiseert, of zoveel eerder als noodzakelijk.

### **3.4 Bodembeweging**

#### **3.4.1 Leeswijzer bodembeweging**

Het onderdeel 'bodembeweging' van het winningsplan Groningen 2013 gaat over twee aspecten, namelijk 'bodemdaling' en 'aardbevingen'. Vanwege het belang van dit onderdeel zijn beide aspecten uit het winningsplan Groningen 2013 grondig beoordeeld.

Allereerst komen de mate van bodemdaling door de gaswinning en de onzekerheden daarin aan de orde. Vervolgens is het seismisch risico beoordeeld. Het gaat dan over de vraag: hoe groot is het risico dat de bevolking loopt in termen van schade en letsel als gevolg van aardbevingen door de gaswinning. Daarna is beoordeeld of het winningsplan Groningen 2013 voorziet in mogelijkheden om de seismische activiteit te beperken, bijvoorbeeld door beperking van de gasproductie. Ten slotte is het borgingsprotocol voor aardbevingsrisico's behandeld.

De onderwerpen 'bodemdaling' en 'seismisch risico' worden hierna volgens een vast stramien besproken. Eerst komt de positie van NAM aan de orde. Het gaat dan om de uitgangspunten die NAM hanteert bij de verschillende aspecten van bodembeweging. Deze uitgangspunten zijn afgeleid uit het winningsplan Groningen 2013. Daarna worden de belangrijkste opmerkingen van de TBO en TBB vermeld over de onderzoeksrapporten 1, 5 en 6. Dat zijn de rapporten die belangrijke bouwstenen zijn geweest voor het winningsplan Groningen 2013. De opmerkingen van de TBO en de TBB zijn van belang voor het advies van SodM, omdat ze breed worden gedragen door deskundigen van verschillende partijen. Tenslotte volgt de beoordeling van SodM. Aan het einde van hoofdstuk 3 wordt een overzicht gegeven van de conclusies van SodM.

#### **3.4.2 Bodemdaling**

##### **a. Positie NAM in winningsplan Groningen**

In het winningsplan Groningen 2013 heeft NAM een prognose gegeven voor de verwachte mate van bodemdaling met een inschatting van de onzekerheden daarin. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van het winningsplan Groningen 2007 zijn 1) de actualisering van de geologische en dynamische reservoirmodellen, en 2) het toepassen van enkele alternatieve compactiemodellen, met als voorkeurmodel een op diffusie gebaseerd compactiemodel (time decay model) voor het reservoirgesteente.

De gaswinning is gestart in 1963. Uit sectie C2.1 van het winningsplan Groningen 2013 blijkt, dat de maximale bodemdaling door gaswinning in de periode 1972 – 2008 minder dan 30 cm bedroeg<sup>8</sup>. Uit het winningsplan Groningen 2013 blijkt niet goed hoeveel bodemdaling in de periode 2008 – 2013 is opgetreden. Op pagina 21 wordt uitgelegd dat de bodemdaling over de periode 2013 – 2080 volgens het marktvaag productie-scenario naar verwachting 18 cm zal bedragen (time decay model).

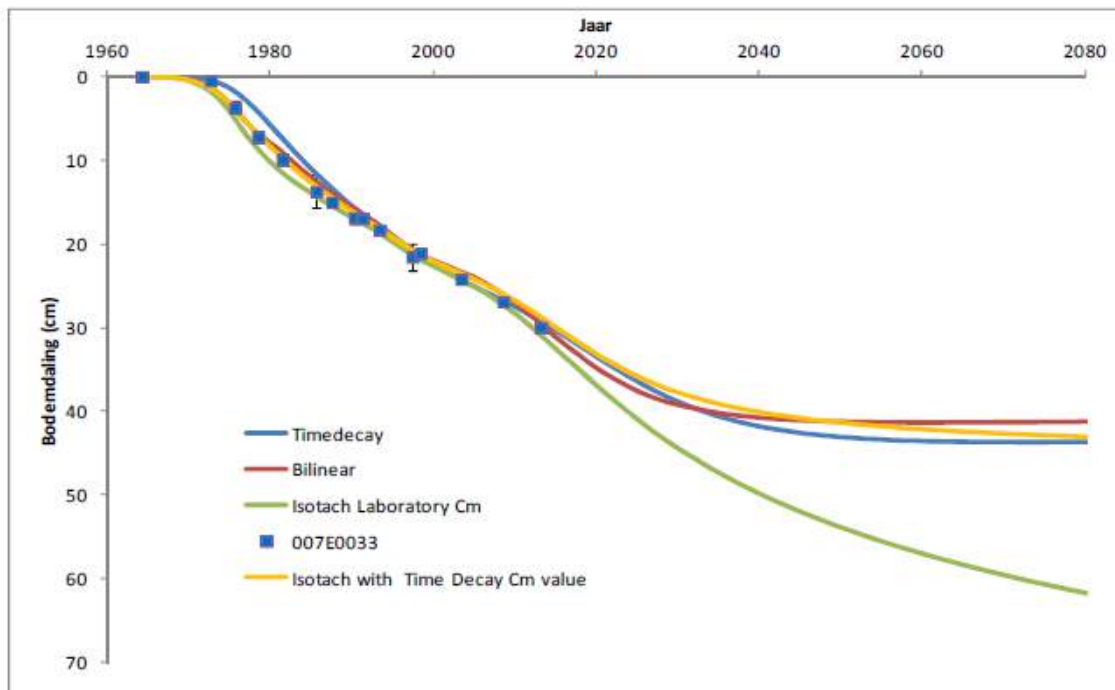
---

<sup>8</sup> Uit het winningsplan Groningen blijkt dat de bodemdaling over de periode 1964 – 1972 minder dan 2 cm bedroeg in het diepste punt..



NAM geeft aan dat alternatieve modellen (het bi-lineaire compactiemodel, het isotachen compactiemodel met geoptimaliseerde parameters en het isotachen compactiemodel met in het laboratorium bepaalde compressibiliteiten) laten zien dat de nog op te treden bodemdaling uiteen kan lopen van 16 cm tot 34 cm.

Uit onderstaand Figuur 3 blijkt dat de totale bodemdaling over de periode 1972 – 2080 uiteen kan lopen van 41 tot 62 cm ter plaatse van een bepaald peilmerk (007E0033) gelegen in het centrale deel van het gasveld.



Figuur 3: Verloop in de tijd van de bodemdaling volgens verschillende compactiemodellen (Figuur C6 uit het winningsplan Groningen 2013 NAM).

## b. Review TBO

In het review op onderzoek 6 [ref. 2] geeft de TBO aan dat zij graag zou zien dat de in de modellen gehanteerde parameters die ten grondslag liggen aan NAM's bodemdaling-berekeningen, zoals compressibiliteit, poisson ratio en rigid-basement diepte, worden geëxpliciteerd. NAM trekt in het rapport van onderzoek 6 de conclusie dat het effect van de verschillende productiescenario's op de compactievolumes klein is, vergeleken bij het effect van de verschillende compactiemodellen. De TBO is van mening dat nader bekeken moet worden of - bij gelijke parameters in de modellen - deze conclusie van NAM blijft staan. De TBO merkt tevens op dat NAM in de grafieken de gemiddelde te verwachten waarde (de expectation) laat zien, maar de onzekerheden niet aangeeft. Voor eventuele conclusies is het relevant te weten hoe de verschillen tussen de compactiemodellen zich verhouden tot die marge.

Met betrekking tot de parameterkeuze merkt de TBO op dat onduidelijk is welke relaxatietijd is gebruikt bij het berekenen van de cumulatieve compactie. NAM noemt dat een relaxatietijd van vijf jaar (met een onzekerheid van plus of min vijf jaar) de beste overeenkomst met de geobserveerde bodemdaling geeft.

Onder deskundigen bestaat nog geen consensus over het fysisch compactiemodel dat de afhankelijkheid van de compactie van de drukdaling in de tijd het beste beschrijft. Hiervoor bestaan verschillende hypothesen die op basis van de huidige bodemdalingsmetingen alle valide zouden kunnen zijn. De TBO vindt het belangrijk om naar een scala van compactiemodellen en parameters te kijken die de bodemdaling, binnen de foutenmarge in de bodemdalingsmetingen, even goed representeren. Op basis daarvan kan vervolgens een betere inschatting gemaakt worden van de onzekerheid in de toekomstige bodemdaling.

### **c. Oordeel SodM**

Op verzoek van SodM heeft TNO controleberekeningen op de verwachte mate van bodemdaling uitgevoerd [ref.3]. TNO rapporteert dat de door NAM bepaalde orde van grootte van de maximaal te verwachten bodemdaling in overeenstemming is met de berekeningen van TNO. Met daarbij de opmerking dat het rate-type compactiemodel, in vergelijking met het time-decay model van NAM, een betere overeenkomst vertoont met de gemeten daling – rekening houdend met de onzekerheden in de metingen - met name aan de rand van de kom. Voor het centrum van de kom zijn de verschillen het grootst in de periode vóór 1990, waarbij opnieuw het rate-type model beter met de metingen overeenkomt.

Daarnaast plaatst TNO de kanttekening dat een deel van de locale systematische afwijkingen die worden vastgesteld tussen de gemodelleerde en gemeten bodemdaling, zeer waarschijnlijk een direct gevolg zijn van de manier waarop NAM de gesteente-eigenschappen (de porositeit) heeft gemodelleerd. Bij de interpolatie van de porositeitsmetingen tussen de putten heeft NAM geen gebruik gemaakt van geologische of akoestische impedantie informatie (uit de seismiek). Ook informatie over de porositeitsverdeling die kan worden afgeleid uit de vergelijking van lokaal berekende en gemeten bodemdaling is niet meegenomen.

De door TNO geconstateerde onnauwkeurigheid van het porositeitsmodel van NAM zijn mogelijk ook de verklaring voor de verkeerde ligging van het centrum van de berekende kom ten opzichte van de gemeten positie. In werkelijkheid ligt het centrum van de kom ongeveer 5 kilometer ten zuidwesten van de berekende positie.

Met het NAM porositeitsmodel kan de veel lager dan berekende bodemdaling aan de noordwest rand van het Groningenveld niet volledig verklaard worden. NAM gebruikt daarom een dynamisch reservoirmodel met een grote waterinstroming vanuit een watervoerende laag (aquifer) ten noordwesten van het veld waardoor de drukdaling en daarmee de bodemdaling ter plaatse beperkt blijft. Een dergelijke grote waterinstroming wordt door TNO als onwaarschijnlijk gezien op basis van gemeten putdrukken en de waargenomen beweging

van het gas-water contact. Een dynamisch reservoirmodel met een veel geringere waterinstroming geeft een betere overeenkomst met de gemeten putdrukken en de beperkte beweging van het gas-water contact. Een alternatieve verklaring voor de tot nu toe geringe daling aan de noordwest rand van het veld is het vertraagd depletieren van de waterhoudende delen van het reservoirgesteente onder het gas-water contact. Soortgelijke verschijnselen worden bij Ameland en andere gasvelden in het Rotliegend waargenomen.

### **3.4.3 Seismisch Risico**

#### **a. Positie NAM in winningsplan Groningen 2013**

In sectie C3 van het winningsplan Groningen 2013 benoemt NAM het onderwerp: Risicoanalyse bodemtrilling. In dit onderdeel merkt NAM op (p.30):

Om het seismische risico te bepalen voor de toekomst is uitgegaan van een zogenaamde "Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)" waarbij een Monte-Carlo analyse methode wordt gebruikt.

Het gaat hier over een "hazard analyse", dat wil zeggen een analyse die niet verder gaat dan de berekening van grondversnellingen die als gevolg van een aardbevingen kunnen optreden. Daarmee wordt het potentiële gevaar in kaart gebracht. Een risico-analyse gaat een stap verder en brengt ook in kaart wat de gevolgen kunnen zijn voor infrastructuur, gebouwen en mensen die zich in en rond die gebouwen bevinden. Bij de onderliggende rapporten die NAM bij het winningsplan Groningen 2013 heeft gevoegd bevindt zich onderzoeksrapport 1 van ARUP dat wél ingaat op het seismische risico voor gebouwen en mensen. NAM vat in de oplegnotitie bij de onderliggende rapporten de bevindingen van ARUP als volgt samen:

Op basis van de berekeningen valt het op dit moment niet uit te sluiten, dat op termijn bevingen mogelijk zijn met een magnitude, waarbij gebouwen zwaar beschadigd kunnen raken of zelfs zouden kunnen instorten, indien deze gebouwen niet verstevigd zouden zijn. Zonder versteviging kunnen slachtoffers derhalve niet volledig uitgesloten worden.

In de aanbestedingsbrief bij het winningsplan Groningen 2013 (p.2) stelt NAM:

De voorgestelde activiteiten in dit Winningsplan zijn gebaseerd op NAM's beoordeling van deze risico's en de bijbehorende beheersing daarvan tot ALARP (As Low As Reasonable Practical) niveaus.

En:

Op dit moment wordt het veiligheidsrisico beoordeeld als acceptabel.

Echter, uit het winningsplan Groningen 2013 en de onderliggende rapporten blijkt niet duidelijk waarop NAM dit oordeel baseert.

#### **b. Positie NAM in toelichting op Winningsplan Groningen 2013**

Op 23 december 2013 heeft NAM op verzoek van de Minister van EZ een toelichting op het winningsplan Groningen 2013 ingediend. In bijlage 2 van deze toelichting wordt nader ingegaan op de seismisch risico analyse. NAM gebruikt voor deze analyse voornamelijk "interne standaarden". Hierbij hanteert NAM het beslismodel van de Britse olie- en gaswinningsbrancheorganisatie 'Oil & Gas UK' om inzicht te geven in de wijze waarop

invulling moet worden gegeven aan de zorgplicht. NAM concludeert:

In dit geval valt het risico echter in categorie C: het is een nieuw soort risico, met significante onzekerheden, een grote sociale en economische impact en sterke (afwijkende) zienswijzen en belangen. De tussenliggende QRA en kosten-baten-analyse (CBA) is maar ten dele een valide instrument om een solide brug te vormen.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor het maken van beslissingen bij deze categorie "company values" en "societal values" leidend zijn. NAM stelt:

De "company values" vormen de kern van deze notitie (en gekozen insteek) omdat deze ingaat op het NAM interne beleid en standaarden. Het element "societal values" is in deze notitie niet in detail geduid ....

Binnen NAM wordt de Risk Assessment Matrix (RAM) gebruikt om bedrijfsrisico's te duiden. Op basis hiervan concludeert NAM dat de effecten voor aardbevingsrisico's op dit moment voor 'reputatie' en 'bedrijfsmiddelen' in de gele en/of rode categorieën terecht komen. In de toekomst voorspelt NAM dat ook het effect voor 'mensen' en 'milieu' de potentie hebben om in de gele en/of rode categorieën terecht te komen. Voor risico's in deze categorieën dient volgens de gangbare procedures een Bow-tie te worden opgesteld met als doel de risico's, middels barrières tussen het gevaar en de consequenties, te verlagen tot "ALARP"<sup>9</sup> niveau. NAM stelt:

Een risiconiveau van  $10^{-6}$  (een kans van één op de miljoen per jaar dat een persoon sterft ten gevolge van een risico) of lager is algemeen geaccepteerd.

En:

... het ALARP-gebied heeft (in de Nederlandse situatie) de  $10^{-5}$  als basis veiligheidsniveau ... risico's boven de  $10^{-4}$  worden in het algemeen niet geaccepteerd.

Voor de bepaling van het risiconiveau is het noodzakelijk het Plaatsgebonden Risico<sup>10</sup> te bepalen. NAM stelt dat het niet mogelijk is om de standaard methode die hiervoor binnen de olie- en gasindustrie gangbaar is, te gebruiken voor aardbevingsrisico's, omdat:

... deze niet stationair zijn en de (vele) parameters die het risico bepalen een hoge mate van onzekerheid kennen en moeilijk a priori te modelleren zijn.

Desondanks heeft NAM op basis van een combinatie van technieken (NAM: "de gangbare en andere kwantitatieve analysetechnieken") een eerste aanzet gegeven tot het berekenen van een Plaatsgebonden Risico. NAM komt hiermee voor de komende 3 jaar tot een range van 0 tot  $2 \times 10^{-5}$  met een verwachtingswaarde van  $3 \times 10^{-7}$ . NAM heeft geen inzicht in de achterliggende berekening van deze getallen gegeven, noch over de periode waarop deze getallen betrekking hebben.

### c. Review TBB

De TBB merkt in zijn eindrapport [ref. 4] op, dat NAM met de seismisch risico rapportage van ARUP geen inzicht heeft gegeven in de grootte van de aardbevingsrisico's, bijvoorbeeld in vergelijking met andersoortige risico's zoals overstromingsrisico's.

---

<sup>9</sup> ALARP = As Low As Reasonably Practical.

<sup>10</sup> Plaatsgebonden Risico is een maat voor het risico dat op een bepaalde locatie heerst.

Eén van de eindconclusies van de TBB luidt:

Gezien de grote onzekerheden die er zowel ten aanzien van de seismische hazard (de input voor onderzoeken 1 en 2) als voor de bovengrondse effecten van bevingen voorlopig zullen blijven bestaan, is het voor het afwegen van alle risico's en belangen essentieel te weten hoe groot de risico's zijn – ook in vergelijking met bijv. overstromingsrisico's – en of er gelet op de risico's voldoende tijd is om die onzekerheden te reduceren.

SodM merkt op, dat de TBB niet de beschikking heeft gehad over de nagekomen toelichting van NAM op het winningsplan (23 december 2013). Voor de eindconclusie van de TBB maakt dat echter niet uit, omdat NAM in de nagekomen toelichting evenmin een vergelijking geeft met overstromingsrisico's.

#### **d. Oordeel SodM**

De belangrijkste kritiek op NAM's analyse van de aardbevingsrisico's is, dat zij dit benadert alsof dit industriële risico's voor gevaarlijke inrichtingen zijn. Hierbij maakt zij gebruik van de hazard (de grondversnelling en/of sterkte van een beving) die met een overschrijdingskans van respectievelijk 50% en 10% kan optreden. Overschrijdingskansen van 50% en 10% geven voor gevaarlijke inrichtingen een redelijke indicatie van de te verwachten schade bij lekkages of ontploffingen. Bij aardbevingen is het karakter van het risico geheel anders. Wiskundigen gebruiken voor de beschrijving daarvan een Paretoverdeling [zie ook onderzoek 5]. Daarbij ontstaat het grootste risico niet door bevingen met een 50% overschrijdingskans, maar juist door de veel zeldzamere bevingen met hoge magnitudes die gepaard kunnen gaan met hoge grondversnellingen. In Groningen geldt dat volgens de risicoanalyse van ARUP al voor aardbevingen met een sterkte boven de 4,5. Bepaling van risico's op basis van magnitudes of grondversnellingen met een jaarlijkse overschrijdingskans van 50% of 10%, zoals door NAM wordt gedaan, leidt dan tot een aanzienlijke onderschatting van de werkelijke risico's. Om aardbevingsrisico's goed in kaart te brengen wordt wereldwijd een jaarlijkse overschrijdingskans voor de grondversnelling van 0,2% gehanteerd. Bestaande internationale normen zoals de "Uniform building code" uit de Verenigde Staten, de "Building standard law" uit Japan en de "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance" in Europa zijn op deze overschrijdingskansen gebaseerd.

In de appendix van Bijlage 2 van de toelichting op het winningsplan Groningen 2013 geeft NAM de methodiek om te komen tot een berekening van het risico, waarbij de, in de olie- en gasindustrie gangbare en andere kwantitatieve analysetechnieken zijn gebruikt. Daarbij wordt door NAM gesproken over een berekening van een "Plaatsgebonden Risico". De beschrijving van de manier waarop dit risico door NAM is berekend, is onduidelijk. Deze onduidelijkheid betreft ondermeer de manier waarop overschrijdingskansen gecumuleerd zijn en de manier waarop het gemiddelde is berekend over het aantal personen dat blootgesteld kan worden. Volgens de definitie is het Plaatsgebonden Risico echter locatie specifiek en onafhankelijk van de aanwezigheid van mensen. NAM heeft derhalve geen Plaatsgebonden Risico bepaald. De NAM berekening is ook geen bepaling van het individuele risico of voor de kans op overlijden van één persoon [ref. 5]. De vergelijking hiervan met de "ALARP" normen, zoals NAM vervolgens doet, is dan ook niet mogelijk. Overigens heeft NAM de

achterliggende gegevens voor het door NAM berekende risico niet aangeleverd, waardoor deze door SodM niet beoordeeld konden worden.

Tenslotte heeft NAM de Risico matrix methode (RAM) gebruikt om het bedrijfsrisico als gevolg van de aardbevingen in Huizinge en Zandweer in te schalen. NAM schat in dat alle 4 de onderdelen ("mensen", "bedrijfsmiddelen", "milieu" en "reputatie") in ieder geval het potentieel hebben om in de gele en/of rode categorieën terecht te komen. Om het risico voor toekomstige aardbevingen in te schatten, is deze aanpak echter niet geschikt. Mogelijk is hier verwarring opgetreden met een ander gebruik van de RAM: het prioriteren van onderzoek na een incident [ref. 5].

#### SodM seismisch risico analyse

Omdat NAM geen adequaat inzicht geeft in de aardbevingsrisico's, heeft SodM eigen berekeningen van het seismisch risico gemaakt [ref. 6]. Deze berekeningen zijn gemaakt op basis van de PSHA, zoals beschreven in de technische bijlage bij het winningsplan Groningen 2013, de rapportages van onderzoeken 5 en 6 en de resultaten uit onderzoeksrapport 1 van ARUP. De analyse van SodM is beoordeeld door twee onafhankelijke partijen: het RIVM [ref. 7] en ir.Chr.Pietersen [ref. 8], een gerenommeerd deskundige op het gebied van veiligheidsanalyses.

Uit de analyse volgt dat het risico ten gevolge van door gaswinning veroorzaakte aardbevingen met een epicentrum in het gebied tussen Huizinge, Zandweer en Hoeksmeer, in vergelijking met andere industriële risico's in de maatschappij, hoog is.

#### *Groepsrisico*

NAM bepaalt geen risico op grotere aantallen slachtoffers, het groepsrisico [ref. 5]. In Nederland kennen we geen wettelijke norm voor het groepsrisico. Een zo goed mogelijke inschatting van het groepsrisico is echter van belang omdat deze gebruikt kan worden om te bepalen hoe het risico van aardbevingen zich verhoudt tot de risico's van andere risicovolle activiteiten.

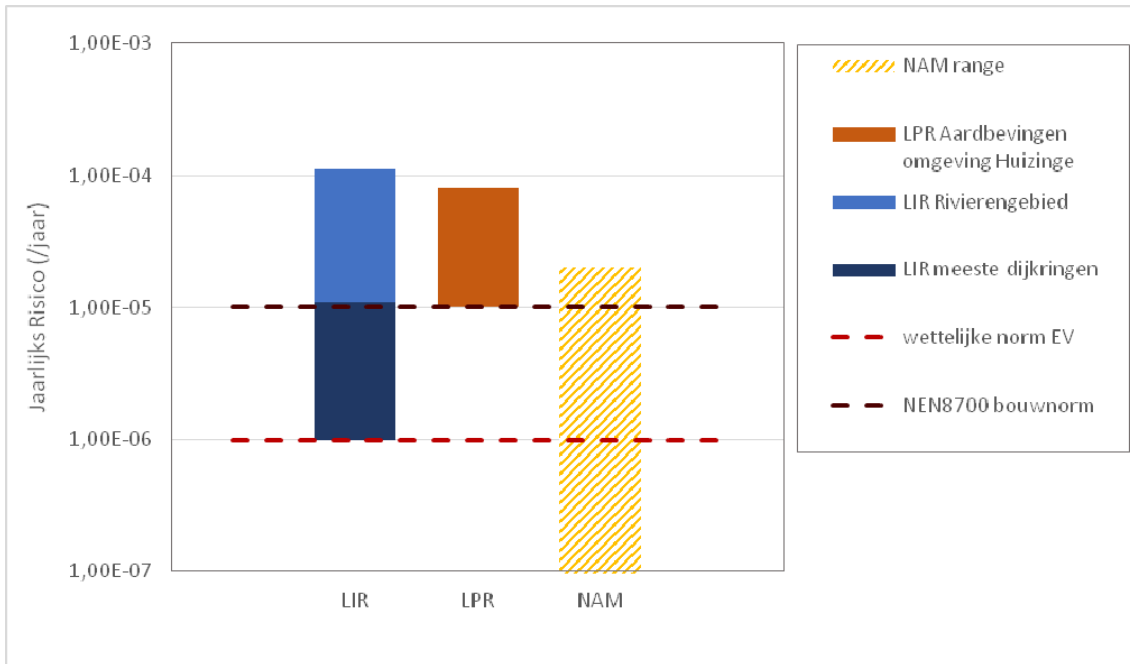
N.B. Het is belangrijk vooraf te vermelden dat -omdat de onderlinge verschillen tussen de beschouwde activiteiten groot zullen zijn - de vergelijking van deze risicovolle activiteiten **indicatief** van aard is.

Uit de analyse van SodM blijkt dat het groepsrisico door aardbevingen in het gebied tussen Hoeksmeer, Zandweer en Huizinge **vergelijkbaar** is met het landelijk groepsrisico bij overstromingen. In vergelijking met het groepsrisico in andere externe veiligheidssectoren en in vergelijking met het groepsrisico voor Schiphol is het groepsrisico door aardbevingen **hoog**.

#### *Plaatsgebonden Risico*

Voor 90% van de huizen binnen een straal van 15 km van de Huizinge beving geldt dat het Lokaal Persoonlijk Risico (LPR; te vergelijken met het Plaatsgebonden Risico [zie ref. 6]) ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen tussen de  $10^{-5}$  en  $10^{-4}$  per jaar ligt

[Figuur 4]. De risico's die bewoners in deze huizen ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen lopen zijn **vergelijkbaar** met het Lokaal Individueel Risico (LIR)<sup>11</sup> bij overstromingen voor bewoners in het rivierengebied. De risico's voor deze huizen zijn **hog**er dan de bouwcodenormen die internationaal voor natuurlijke aardbevingen en nationaal voor andere (vergelijkbare) risico's ten gevolge van belastingen op huizen worden aangehouden. Het hoogste LPR in dit gebied, van ca.  $7 \times 10^{-5}$  per jaar, geldt voor een persoon in een huis uit de klasse "niet versterkte bakstenen huizen van vóór 1920".



Figuur 4: Het Lokaal Persoonlijk Risico (LPR) voor aardbevingen in de omgeving van Huizinge in relatie tot het Lokaal Individueel Risico (LIR) voor overstromingen, de wettelijke norm voor Externe Veiligheidsinrichtingen (EV) en de NEN 8700 bouwnorm voor belastingen op huizen.

In vergelijking met de "ALARP" normen is het LPR voor 90% van de huizen binnen een straal van 15 km van de Huizinge beving hoger dan het basis veiligheidsniveau van  $10^{-5}$ /jaar. Risico's tussen de  $10^{-5}$ /jaar en  $10^{-4}$ /jaar worden alleen geaccepteerd voor onvrijwillige risico's afkomstig van activiteiten van nationaal belang, maar worden mede begrensd door het maatschappelijke draagvlak<sup>12</sup>. Hierbij moet opgemerkt dat het bovengenoemde LPR een gemiddelde is voor de komende 3 jaar. Door de toenemende compactie zal de kans op (zwaardere) bevingen en daarmee het seismisch risico de komende jaren in het gebied verder toenemen.

<sup>11</sup> Het Lokaal Individueel Risico is het Plaatsgebonden Risico waarbij rekening is gehouden met de mogelijkheid tot evacuatie.

<sup>12</sup> Een voorbeeld hiervan zijn de burgerluchthavens waar het gebied met een plaatsgebonden risico tussen  $10^{-5}$  en  $10^{-4}$  per jaar als "sloopzone" wordt aangemerkt [het Luchthavenindielingsbesluit Schiphol 2002]. Op vrijwillige basis worden huizen in dit gebied aangekocht en vervolgens gesloopt. Bewoners die niet wensen te vertrekken kunnen vrijwillig blijven. Bij overlijden of latere verhuizing wordt het huis alsnog aangekocht en gesloopt.

#### Invloed review rapport ARUP door Bommer, Pinho en Crowley

Op 19 december 2013 heeft NAM een review van het ARUP rapport aan de TBB gestuurd [ref. 9]. De review is opvallend kritisch over het werk van Arup maar heeft geen wezenlijke gevolgen voor conclusies van SodM ten aanzien van de seismische risico's in Groningen die mede op de resultaten van Arup zijn gebaseerd (zie bijlage 1).

Wel onderschrijft SodM de aanbeveling dat NAM op zo kort mogelijke termijn een volledig probabilistische seismisch risicoanalyse uitvoert.

#### Invloed NAM hazard analyse

De basis voor de SodM risico analyse vormt de NAM hazard analyse uit de onderzoeken 5 en 6, samengevat in de Technische bijlage bij het winningsplan Groningen 2013<sup>13</sup>. Op verzoek van SodM heeft TNO op de NAM hazard analyse een aantal controleberekeningen uitgevoerd [ref. 3]. Op basis hiervan plaatst TNO kanttekeningen bij de door NAM gebruikte methodiek om de grondversnellingen te berekenen (zie Bijlage 2 bij dit advies). SodM heeft onderzocht in hoeverre haar berekeningen van het risico beïnvloed worden door deze kanttekeningen.

In essentie stelt TNO de resultaten van de hazard berekening van NAM ter discussie. Het KNMI heeft in onderzoek 4, op basis van de geregistreerde seismiciteit tussen 1991 en 1-10-2013, een onafhankelijke Probabilistische Seismische Hazard Analyse uitgevoerd [ref.10]. De resultaten van deze analyse zijn (voor de grondversnellingen) voor de komende jaren vergelijkbaar met de resultaten van hazardanalyse van NAM.

Aangezien de door het KNMI onafhankelijk bepaalde hazards vergelijkbaar zijn met de resultaten van de NAM, kan geconcludeerd worden dat de conclusies van de risicoanalyse van SodM [ref.6], voor de komende drie jaar en bij de geplande productie van NAM, niet wezenlijk worden beïnvloed door de, door NAM in onderzoeken 5 en 6 gebruikte, methodiek om de hazards te berekenen (zie bijlage 2). De invloed op het berekende hazard van alternatieve productiescenario's wordt besproken in paragraaf 3.4.4.

### ***3.4.4 Invloed van gasproductie op de seismische activiteit***

#### **a. Positie NAM**

In Sectie B5 van het winningsplan Groningen 2013 gaat NAM in op de productiestrategie van het Groningen veld. Uit de tekst blijkt dat enkele alternatieve productiescenario's zijn doorgerekend om een beeld te krijgen van het effect daarvan op de seismische hazard. In Bijlage 1 van de toelichting op het winningsplan Groningen 2013 (dd. 23-12-2013) zijn op verzoek van de Minister van EZ nog een aantal aanvullende scenario's doorgerekend. De conclusie van NAM is, dat er drie scenario's zijn die –ten opzichte van het voorkeursscenario – tot een wat grotere reductie van de seismiciteit leiden. Behalve voor het scenario van het stopzetten van de productie en voor het scenario van stikstofinjectie, geldt dit voor het

---

<sup>13</sup> NAM, *Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field*, november 2013



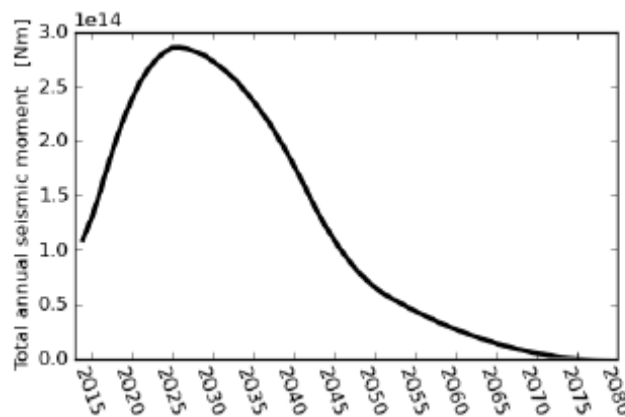
uitvoeren van een alternatieve productiefilosofie (preferent winnen in het zuiden) in combinatie met het verminderen van de productie.

Uiteindelijk kiest NAM ervoor om **niets** aan de huidige productiestrategie te veranderen. In de begeleidende brief bij het winningsplan verwoordt NAM het zo:

NAM stelt verder geen productiereductiemaatregel voor die verder gaat dan de al aangegeven productie-afname, welke, zoals vermeld, gerelateerd is aan het Groningen plafond en de afnemende capaciteit. Een gedeeltelijke productiereductie zal naar verwachting alleen het aantal bevingen in de tijd spreiden, maar niet de maximale magnitude beïnvloeden.

In de bijlage bij het winningsplan Groningen 2013<sup>14</sup> laat NAM in een grafiek op p.124 zien dat de seismische energie die jaarlijks vrijkomt, de komende jaren sterk zal toenemen door de (geplande) gasproductie en daaruit resulterende samendrukking (compactie) van het reservoirgesteente. Na langere tijd (orde van grootte 15 jaar) zal de jaarlijkse vrijkomende hoeveelheid seismische energie (moment) weer afnemen door de teruglopende productie.

Tegelijkertijd geeft NAM in het winningsplan Groningen 2013 aan dat er een grote mate van onzekerheid is in het verloop van de curve uit Figuur 5. Deze onzekerheid neemt in de tijd sterk toe.



Figuur 5: Verwachte jaarlijkse hoeveelheid seismische energie (seismic moment) die vrijkomt, uitgaande van het huidige winningsplan en het huidige compactiemodel, het mediane 'seismic strain partitioning' model en aangenomen dat er geen vertraging optreedt tussen teweeg gebrachte compactie en teweeg gebrachte aardbevingen (Figuur 8.5 uit bijlage A, p.124, winningsplan Groningen 2013 NAM)

## b. Review TBO

De TBO tekent in zijn reviews van onderzoeken 5 en 6 [ref. 2 en 11] het volgende aan:

- Verdere depletie van het reservoir (verdere drukdaling) zal leiden tot meer aardbevingen en daarmee tot een grotere kans op sterkere bevingen; het niveau van de jaarlijkse gasproductie in eerste orde bepaalt hoe frequent de aardbevingen zich zullen voordoen.
- De centrale vraag van de minister voor onderzoek 5 betrof de (nieuwe) maximale sterkte van bevingen voor het Groningen gasveld. Deze vraag wordt in de rapportage van NAM niet

---

<sup>14</sup> NAM, *Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field*, november 2013

beantwoord. Daarbij moet aangetekend worden dat in de door NAM gepresenteerde hazard analyse Mmax geen rol speelt en vervangen wordt door het totaal beschikbare seismische moment.

- De TBO is van oordeel dat het serieus in overweging nemen van de alternatieve productiefilosofie (preferent winnen in het zuiden) de moeite waard is. Daarbij zou ook gekeken moeten worden naar de mogelijkheid de productie gedurende de komende jaren in het noorden geheel te stoppen.
- NAM heeft een compactiemodel gebruikt –het time-decay model- waarmee verschillen pas met een vertraging van tenminste zeven<sup>15</sup> jaar zichtbaar worden.
- De TBO is van mening dat er, gezien de grote onzekerheden voor de verdere toekomst, op dit moment alleen voldoende zekerheid bestaat over de seismische hazard in de komende drie tot vijf jaar.

### **c. Oordeel SodM**

SodM onderschrijft de conclusies van de TBO. Ook de conclusie dat de seismische hazard (dreiging) voor de bewoners in het gebied van groter belang is dan de maximale sterkte (Mmax) van een aardbeving.

Op verzoek van SodM heeft TNO controleberekeningen uitgevoerd op de productiescenario's van NAM en de gevolgen berekend voor de 'bodemdaling' en de 'seismische hazard'. Bovendien heeft TNO nog enkele aanvullende scenario's doorgerekend. Omdat de onzekerheid in de berekeningen voor periodes langer dan drie tot vijf jaar sterk toeneemt ligt de nadruk bij de controleberekeningen op de komende drie tot vijf jaar.

De conclusies van TNO zijn onder meer:

- Het door NAM gekozen porositeitsmodel is van grote invloed op de bodemdaling en daarmee op de seismiteit. Volgens TNO geeft het gebruikte model echter geen correct beeld van de porositeitsverdeling in het reservoirgesteente.
- NAM heeft bij de modellering van de effecten van de productie op de compactie van het gesteente aangenomen dat er zich aan de Noord-West kant van het veld een actieve aquifer bevindt. Volgens TNO is er echter geen aanleiding om dat aan te nemen. De drukken in het noordwesten en de beweging van het Gas-Water-Contact zijn beter te modelleren met het G2 model (zwakke aquifer) dan met het G1 model (sterke aquifer). Ook dit heeft gevolgen voor de ontwikkeling van de seismiteit in het gasveld.
- Het compactiemodel dat NAM gebruikt (het time-decay model) brengt met zich mee dat de uitwerking van onderscheiden productiescenario's pas met een vertraging van zeven jaar zichtbaar wordt. Hetzelfde geldt voor de door NAM gebruikte versie van het lineair isotachenmodel, zij het in iets mindere mate.
- TNO heeft een alternatief productiescenario doorgerekend, waarbij de productie uit een vijftal clusters in een straal van 10 kilometer rond het aardbevingsgebied van Loppersum/Middelstum

---

<sup>15</sup> In het TBO rapport staat "vijf jaar", uit de technische bijlage bij de wijziging winningsplan Groningen blijkt dat dit "zeven jaar" moet zijn (bijlage A bij het winningsplan, p. 73)

enkele jaren wordt stopgezet. Uit de berekeningen blijkt dat de compactie in het centrum van het veld dan aanzienlijk afneemt en daarmee ook de kans op grotere aardbevingen terugloopt.

#### Parameterkeuzes en gevolgen voor het berekende seismische hazard

In het NAM Time-Decay model wordt een tijdsconstante van 5 tot 7 jaar gebruikt. TNO controleberekeningen [ref. 3] laten zien dat de beste fit voor het Time-Decay model bereikt wordt met een tijdsconstante van ongeveer 5 jaar. Dat is consistent met de oplossingsruimte voor de tijdsconstante die door NAM wordt aangegeven: 5 +/- 5 jaar. Dat heeft tot gevolg dat veranderingen in de productiesnelheid pas op langere termijn (orde 5 tot 7 jaar) effect hebben op de compactie en op de daaraan gekoppelde bodemdaling en seismiciteit.

Ook bij gebruik van een alternatief compactiemodel (het gelineariseerd isotachenmodel) vindt NAM kleine verschillen tussen de verschillende productiescenario's.

De gesteentecompressibiliteit in het NAM Time-Decay en het TNO RTCM model is geoptimaliseerd tegen de historische bodemdaling in Groningen. Voor het lineair isotachenmodel dat door NAM is gebruikt voor de hazardberekeningen is dat niet gedaan<sup>16</sup> [ref.3]. In het NAM isotachenmodel wordt gebruik gemaakt van de in het laboratorium gemeten gesteentecompressibiliteiten zonder dat daarop een correctie wordt toegepast. Calibratie tegen de historische bodemdaling leidt er vervolgens toe dat ook dit model met een grote vertraging reageert op veranderingen in productiesnelheid. Een lineair isotachenmodel met veldgeoptimaliseerde compressibiliteit zal naar verwachting veel sneller reageren. Responsetijden voor het RTCM model worden bepaald door de mate van productiesnelheidsverandering. Voor het TNO RTCM model met veldgeoptimaliseerde compressibiliteit zal de typische reactietijd op dit moment in de orde van een jaar zijn. De in het verleden door NAM gebruikte compactiemodellen (lineair en bi-lineair model) hebben een instantane reactietijd. Deze zijn door NAM niet betrokken in de huidige hazard analyse en analyse van de invloed van alternatieve productiescenario's.

#### Effect verschillende productiescenario's op compactie

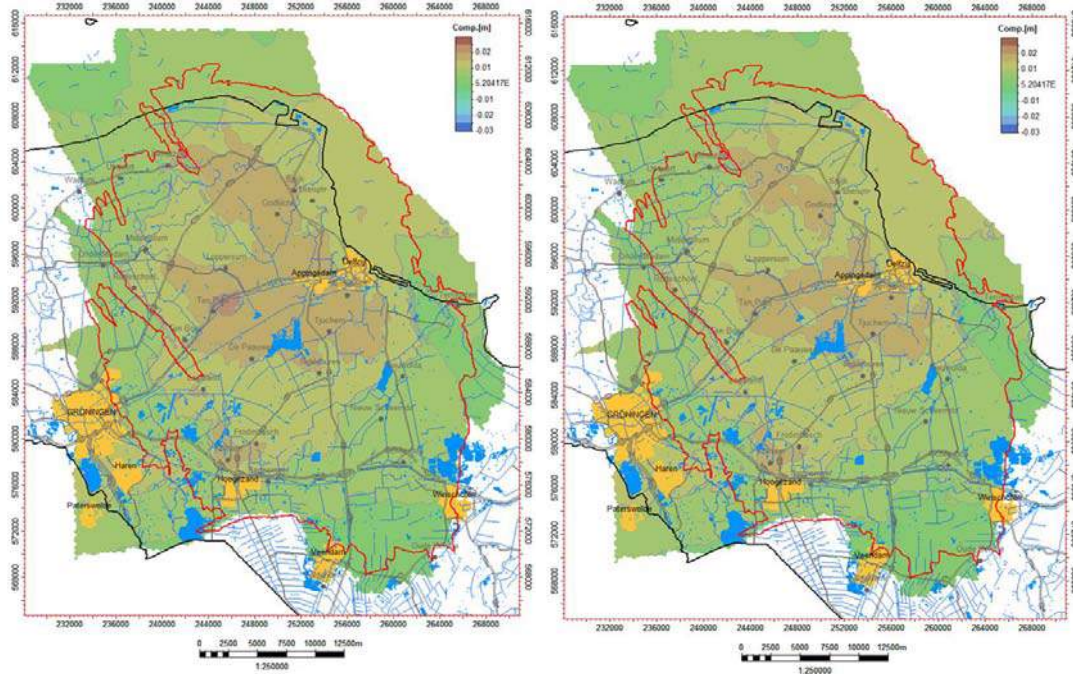
NAM heeft voor een aantal productiescenario's een vergelijking gemaakt tussen de reservoircompactie en de seismische hazard op basis van het NAM Time-Decay en het NAM lineair isotachenmodel. De met deze modellen berekende effecten van verschillende productiescenario's op compactie en seismische hazard gedurende de komende jaren zijn erg beperkt.

TNO heeft op verzoek van SodM voor een aantal productiescenario's een vergelijking gemaakt tussen de compactie volgens het NAM Time-Decay en het RTCM compactiemodel. Daarbij zijn ook een aantal aanvullende scenario's doorgerekend die (nog) niet door NAM zijn onderzocht. Bij gebruik van het RTCM model leiden de verschillende productiescenario's, zoals verwacht, voor de komende 3 tot 5 jaar tot veel grotere verschillen in de compactie en de ruimtelijke verdeling daarvan. Een voorbeeld daarvan wordt gegeven in de figuren 6 en 7

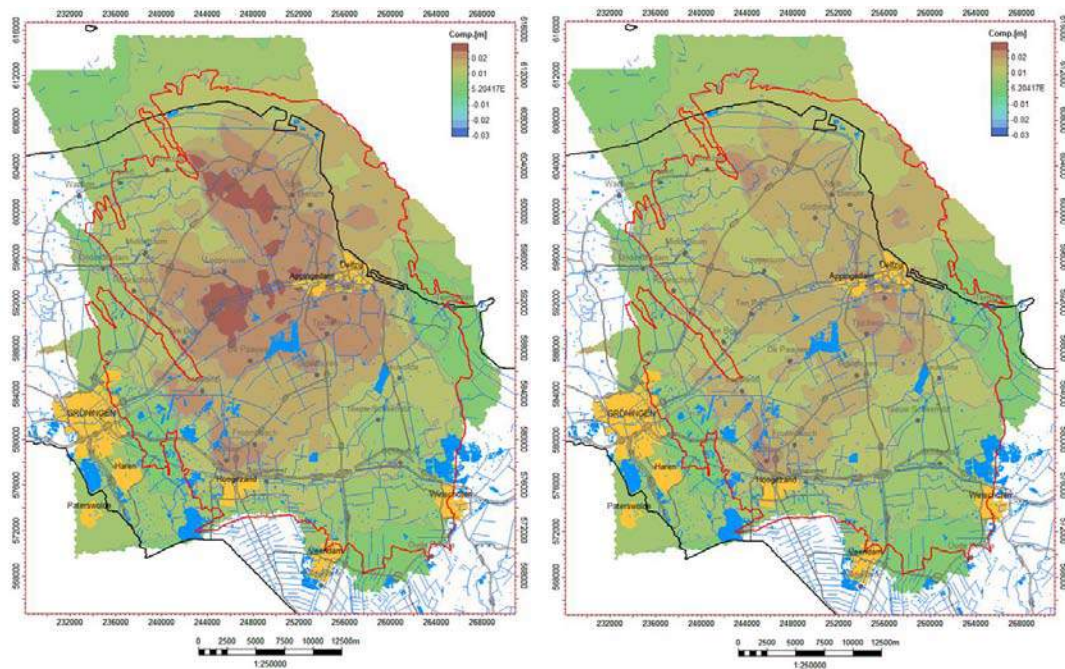
---

<sup>16</sup> Voor de berekening van de toekomstige bodemdaling heeft NAM wel een voorspelling op basis van een lineair isotachen model met aangepaste compressibiliteiten toegevoegd. De daarmee berekende toekomstige bodemdaling is ongeveer gelijk aan die van de andere modellen.

[ref. 3]. Vergelijkbare verschillen zullen naar verwachting optreden voor het seismisch hazard.



Figuur 6: Vergelijking van de compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het NAM marktvaag scenario (links) en het 30 BCM/jaar scenario met insluiting van de vijf clusters rondom Loppersum berekend met het NAM Time-Decay compactiemodel. Berekende verschillen zijn beperkt.



Figuur 7: Vergelijking van de compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het NAM marktvaag scenario (links) en het 30 BCM/jaar scenario met insluiting van de vijf clusters rondom Loppersum berekend met het TNO RTCM compactiemodel. Berekende verschillen zijn aanzienlijk.

### Effect verschillende productiescenario's op het berekende seismische hazard

Zoals bij paragraaf 3.4.3d (onder het kopje Hazardberekeningen) aangegeven, is uit de controleberekeningen van TNO gebleken dat er kanttekeningen te plaatsen zijn bij de berekening van NAM van het toekomstige hazard (zie ook bijlage 2). Voor de effecten van de verschillende productiescenario's is met name het effect van de loskoppeling van de magnitude en locatie van de bevingen een probleem. TNO concludeert:

Een direct gevolg hiervan is dat de seismische hazard analyse niet voldoende kan differentiëren tussen verschillende productiefilosofieën. De hazard wordt bepaald door de hogere magnitude's, die immers in het gehele veld kunnen voorkomen. Hierdoor wordt het cumulatieve hazard voor een groot aantal aardbevingscatalogi (zoals berekend in NAM, 2013b) geldig voor vrijwel het gehele Groningen veld zonder voldoende differentiatie naar compactie.

Dit betekent dat een alternatieve productiefilosofie op basis van een andere verdeling van de productie over de verschillende productieclusters (bijv. het bij voorkeur produceren uit het zuiden van het veld bij gelijkblijvende totale productie) in de NAM berekeningen, weinig tot geen invloed zal hebben op de hazard.

### Invloed productiesnelheid op het totale aantal aardbevingen

SodM is nog steeds van mening dat de snelheid van de gasproductie een aanzienlijk effect kan hebben op het totale aantal aardbevingen. SodM heeft bij NAM bij voortdurende aangedrongen op literatuurstudie en nader onderzoek. In sectie 6.3.2 van de technische bijlage van het winningsplan gaat NAM daarop in, maar worden geen resultaten gepresenteerd. De door de NAM uitgevoerde analyse van de invloed van productiesnelheid op seismiciteit op basis van het Groningen veldgedrag is niet valide (zie bijlage 3).

## **3.4.5 Borgingsprotocol aardbevingsrisico's**

### **a. Positie NAM**

In de begeleidende brief bij het winningsplan Groningen 2013 stelt NAM dat de aardbevingsrisico's op een goede manier kunnen worden beheerst. NAM schrijft:

Om de risico's te beheersen en de onzekerheden verder te verkleinen is een intensief monitorings- en studieprogramma vastgesteld. Dit wordt verder beschreven in het bijgaande Meet- en Monitoringsplan.

In sectie B5.1 van het winningsplan Groningen 2013 wordt eveneens het woord "beheersing" gebruikt. Ook daar stelt NAM dat de seismische activiteit kan worden beheerst:

Het Borgingsprotocol "Seismisch Risico Groningen" en bijbehorende Meet- en Monitoringsplan zullen de monitoring en de beheersing van de seismische activiteit waarborgen om te voorkomen dat het risico de acceptabele grenzen gaat overschrijden.

NAM spreekt in het winningsplan Groningen 2013 over "acceptabele grenzen", waarvan voorkomen moet worden dat ze overschreden worden.

Het "Borgingsprotocol Seismisch Risico Groningen" (bijlage C bij het winningsplan Groningen 2013) bevat een overzicht van "mogelijke" beheersacties, die uitgevoerd kunnen worden als de grenzen overschreden dreigen te worden. NAM zal in die situatie in overleg treden met de Minister van EZ. Bovendien zal NAM de Minister van EZ en SodM informeren als er tijdens

het uitvoeren van het Meet- en Monitoringsplan observaties worden gedaan die significant afwijken van de verwachte waarden of die aangeven dat de (niet vastgelegde) acceptabele grenzen zullen worden overschreden. Er zal dan tevens een “versnelde actualisatie van de risico-analyse” worden uitgevoerd.

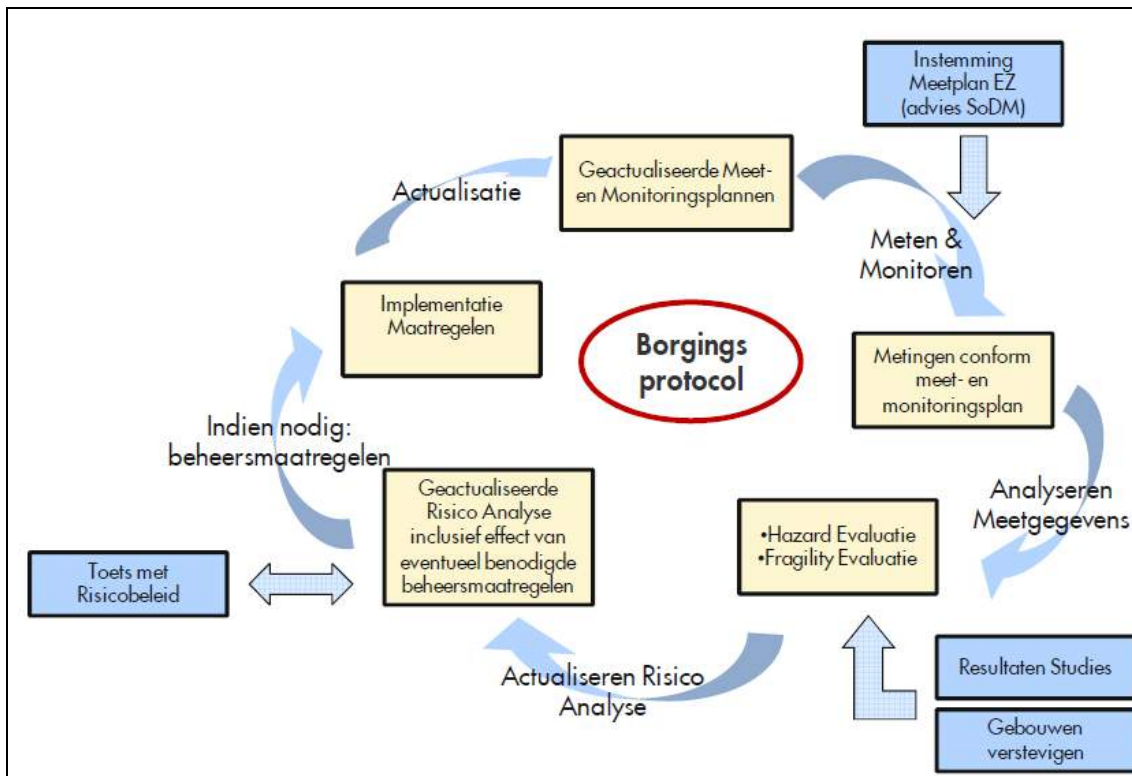
NAM stelt voor dat de Minister van EZ een onafhankelijke technische commissie instelt, die de kwaliteit van de jaarlijks geactualiseerde risicoanalyse en de ondersteunende rapportages beoordeelt. Daarnaast voorziet NAM een rol voor de regio in de jaarlijks te doorlopen cyclus. NAM onderzoekt het instellen van een begeleidingscommissie “monitoring seismisch risico Groningen”.

#### **b. Oordeel SodM**

De “beheersing van seismische activiteit” maakt geen onderdeel uit van de “elf onderzoeken” (zie paragraaf 2.1). Daarom is daarover geen review beschikbaar van de TBB, de TBO en de Stuurgroep. Het borgingsprotocol is een nadere invulling van artikel 24.1r van het Mijnbouwbesluit, onderdeel van het winningsplan. Dit artikel vraagt een beschrijving van de maatregelen die worden genomen om *bodembeweging* te voorkomen of te beperken. De claim van NAM dat het borgingsprotocol voorziet in een beheersing van de seismische activiteit overtuigt niet. Al in de productiefilosofie wordt geen rekening gehouden met de mogelijkheden tot het beperken van het ‘seismisch risico’ door preventieve maatregelen aan de productiekant. Er lijkt te weinig rekening gehouden met de differentiatie van het seismisch risico in de verschillende deelgebieden. Uit de controleberekeningen van TNO blijkt immers dat de omvang en ook het patroon van de winning vanuit dat oogpunt zou kunnen worden geoptimaliseerd.

SodM ziet veel overeenkomsten tussen het borgingsprotocol en het meet- en regelprotocol dat voor de beheersing van de bodemdaling in de Waddenzee wordt gebruikt. Dat protocol functioneert naar tevredenheid. De basis hiervoor wordt gevonden in de milieuzorg volgens ISO 14001, die binnen NAM geïntegreerd is in het bedrijfsvoeringssysteem. De milieuzorg en de veiligheidszorg zijn gericht op de aantoonbare beheersing van bedrijfsprocessen.

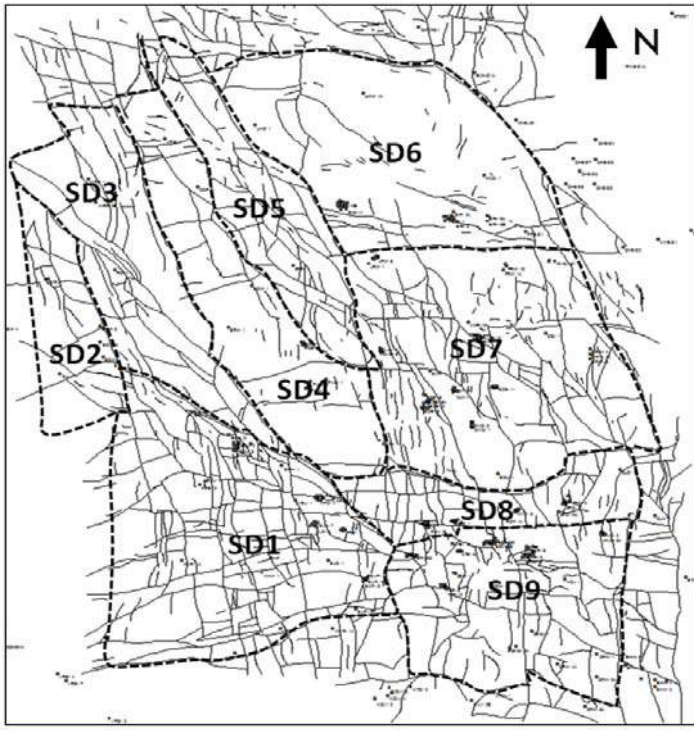
Bij het winningsplan Groningen 2013 is volgens SodM nog onvoldoende sprake van systematische beheersing van het seismisch risico. SodM staat weliswaar achter de methodiek van het borgingsprotocol met de cyclische actualisatie van de risicoanalyse op basis van intensieve monitoring, maar op essentiële punten lijkt het risico-beheerssysteem nog onvolledig. In het borgingsprotocol voor het Groningen veld wordt bijvoorbeeld niet duidelijk aangegeven wat de “acceptabele grenzen” zijn die NAM voor het seismisch risico hanteert (de toetsingsnorm). Daarnaast ontbreekt een goede beschrijving hoe het seismisch risico bepaald wordt.



Figuur 8: Schematische weergave van de jaarlijks te doorlopen monitorings- en borgingscyclus (bron NAM)

Kernpunt van het door NAM voorgestelde borgingsprotocol is de jaarlijkse “actualisatie van de Seismisch risicoanalyse” (zie Figuur 8). SodM constateert echter dat een goede initiële analyse ontbreekt in het winningsplan Groningen 2013 en slechts beperkt is beschreven in een aanvullende ‘toelichting’. Daardoor is door NAM niet aangetoond wat precies “geborgd” wordt en komt het “borgingsprotocol” in de lucht te hangen. Dit geldt ook voor de mededeling die NAM doet, dat het huidige veiligheidsrisico als “acceptabel” wordt beoordeeld.

In de bijlage bij het Meet- en Monitoringsplan worden door NAM een aantal monitoringsparameters beschreven die de afwijking van de huidige globale trend voor het hele veld kunnen aangeven. Door NAM wordt het veld daarbij als één geheel benaderd terwijl SodM een duidelijk verschil ziet tussen seismisch ‘kritische’ en ‘minder actieve’ gebieden. De verwachting van SodM is dat de (ontwikkeling van de) seismische activiteit over verschillende delen van het veld, een belangrijke rol zal moeten spelen bij de beheersing ervan. Mede op basis van de TNO controleberekeningen wordt verwacht dat met intensieve seismische monitoring en aangepaste continue GPS hoogtemetingen het patroon van de winning (in ieder geval tijdelijk) beter kan worden geoptimaliseerd.



Figuur 9: De indeling in negen regio's (bron NAM)

De indeling in negen structurele regio's (zie Figuur 9) kan worden gebruikt in combinatie met de indeling (van het KNMI) op basis van monitoringsresultaten. Bij de evaluatie van de monitoring en de vergelijking van escalatie-parameters met trends moet rekening gehouden worden met een verdeling in regio's.

SodM vindt de instelling van een – door de Minister van EZ in te stellen – Technische Commissie onnodig. De wettelijke toezichthoudende taak ligt bij SodM. Om een goede beoordeling te kunnen geven van de kwaliteit van rapportages e.d. kan SodM een beroep doen op instituten als TNO en KNMI, die in staat zijn om controlemetingen en -berekeningen uit te voeren. Bovendien kan bij de beoordeling van rapportages over beheersmaatregelen aan de bovengrond (versterking huizen e.d.) de Technische commissie bodembeweging (Tcbb) worden ingeschakeld.

Het voorstel van NAM om stakeholders uit de regio bij het monitoren en meten te betrekken –via een Begeleidingscommissie- is naar de mening van SodM een verstandige zaak.



### **3.4.6 Conclusies Bodembeweging**

De conclusies van SodM ten aanzien van het onderwerp bodembeweging in het winningsplan Groningen 2013 luiden als volgt.

#### **Conclusies bodemdaling**

- Over de periode 1972 – 2080 zal –volgens NAM- een bodemdaling optreden van 41 à 62 cm boven het centrum van het gasveld. Controleberekeningen van TNO wijzen uit, dat deze bandbreedte realistisch is;
- NAM kan de (ruimtelijke) verdeling van de bodemdaling niet goed verklaren. Controle berekeningen van TNO wijzen uit dat dit naar alle waarschijnlijkheid te maken heeft met een ontoereikend porositeitsmodel van NAM;
- Het is onwaarschijnlijk dat de minder dan voorspelde bodemdaling aan de noordwest rand van het veld het gevolg is van een sterke waterinstroming, zoals door NAM in het winningsplan Groningen 2013 wordt aangenomen. Een alternatieve verklaring is het vertraagd depletieren van het reservoirgesteente onder het gas-water contact.

#### **Conclusies Seismisch Risico**

- Het seismisch risico in Groningen wordt door NAM aanzienlijk onderschat;
- NAM hanteert een verkeerde aanpak voor de bepaling van het seismisch risico;
- Het huidige seismisch risico in het gebied tussen Hoeksmeer, Zandweer en Huizinge is hoog in vergelijking met risico's door industriële activiteiten in Nederland;
- Het huidig groepsrisico door de bevingen in het gebied tussen Hoeksmeer, Zandweer en Huizinge is vergelijkbaar met het landelijk groepsrisico voor overstromingen;
- De verwachting is dat de risico's door de bevingen in Groningen op termijn verder zullen toenemen;
- De zeer kritische review van Bommer, Pinho en Crowley op onderzoeksrapport 1 van Arup heeft geen wezenlijke invloed op de bovenstaande conclusies;
- De kanttekeningen van TNO bij de berekeningsmethodiek die door NAM gebruikt wordt voor de berekening van het seismisch hazard, heeft eveneens geen wezenlijke invloed op bovenstaande conclusies.
- NAM dient op zo kort mogelijke termijn een volledig probabilistische seismisch risicoanalyse uit te voeren.

#### **Conclusies invloed gasproductie op de seismische activiteit**

- SodM onderschrijft de analyse van NAM dat de hoeveelheid seismische energie de komende jaren nog aanzienlijk zal toenemen, op langere termijn gevolgd door een daling (zie figuur 5);

- De stelling van NAM dat wijzigingen in de gasproductie gedurende de komende jaren nauwelijks invloed zullen hebben op de seismiciteit en de seismische hazard, is een logisch gevolg van selectieve model- en parameterkeuzes van NAM.
- De door de NAM uitgevoerde analyse van de invloed van productiesnelheid op seismiciteit op basis van het Groningen veldgedrag is niet valide;
- De controleberekeningen van TNO laten zien dat de effecten van veranderingen in productiesnelheid en met name van veranderingen in de verdeling van de productie over het veld in de praktijk, veel groter kunnen zijn dan door NAM wordt verondersteld;
- Eén van de door TNO doorgerekende scenario's [ref. 3] met een productiestop in de 5 clusters binnen een straal van 10 km van Loppersum, geeft de komende jaren een significante reductie van de drukkaling onder het meest aardbevingsgevoelige gebied. Met een vertraging van naar verwachting ongeveer een jaar<sup>17</sup> [ref. 3] zal ook de toename van de compactie onder dit gebied sterk gereduceerd worden en zal het jaarlijkse seismische hazard (en daarmee ook het seismisch risico) afnemen. Dit scenario leidt tot een jaarlijkse productiereductie van ongeveer 15 mld Nm<sup>3</sup>;
- De onzekerheden in de berekeningen worden groot voor periodes verder dan drie tot vijf jaar in de toekomst.

#### **Conclusies Borgingsprotocol**

- SodM staat achter de methodiek van het borgingsprotocol met de cyclische actualisatie van de risicoanalyse op basis van intensieve monitoring;
- Bij het winningsplan Groningen 2013 is volgens SodM nog onvoldoende sprake van systematische beheersing van het seismisch risico;
- In het borgingsprotocol voor het Groningen veld wordt niet duidelijk aangegeven wat de "acceptabele grenzen" zijn die NAM voor het seismisch risico hanteert;
- NAM maakt geen differentiatie van het seismisch risico naar regio's;
- Een goede beschrijving van de vaststelling en een daarop gebaseerde berekening van het huidige seismisch risico ontbreekt;
- SodM vindt de instelling van een – door de Minister van EZ in te stellen – Technische Commissie onnodig. De wettelijke toezichthoudende taak ligt bij SodM;
- SodM vindt het voorstel om stakeholders uit de regio via een Begeleidingscommissie bij het monitoren en meten te betrekken, een verstandige zaak.

---

<sup>17</sup> 0-5 jaar afhankelijk van het gekozen compactiemodel. Het TNO-RTCM model, hetgeen de beste fit aan de gemeten bodemdaling geeft heeft een reactietijd van ongeveer 1 jaar.

## **4. Beoordeling Integraal Meet- en Monitoringsplan**

### **4.1 Werkwijze**

NAM heeft tegelijk met het winningsplan Groningen 2013 een "Meet- en Monitoringsplan" ingediend. Dit Meet- en Monitoringsplan maakt geen deel uit van het winningsplan Groningen 2013, maar hangt er wel mee samen. Daarom heeft NAM aan de Minister van EZ verzocht om beide plannen gecoördineerd te behandelen.

SodM heeft zich, bij de beoordeling van het Meet- en Monitoringsplan, geconcentreerd op het gedeelte dat betrekking heeft op het "meten" van alles wat met bodembeweging (bodemdaling, aardbevingen) te maken heeft. De reden daarvan is, dat voor dit type metingen een duidelijke structuur is vastgelegd in het Mijnbouwbesluit (artikel 30). Voor de overige metingen en monitoring is in de Mijnbouwregelgeving geen vastomlijnde structuur aangegeven. Over de monitoring van vervorming van gebouwen geeft SodM geen advies. De Technische commissie bodembeweging (Tcbb) brengt hierover advies uit.

### **4.2 Volledigheid**

In het gedeelte van het Meet- en Monitoringsplan dat gaat over het meten van bodembewegingen komen alle onderwerpen aan de orde, die in artikel 30 van het Mijnbouwbesluit worden vermeld.

### **4.3 Inhoudelijk**

#### **4.3.1 Hoogtemetingen**

In het Meet- en Monitoringsplan wordt beschreven hoe de beweging van de bodem zal worden gemeten. Hiervoor worden drie technieken ingezet: waterpasmetingen, radarmetingen van de Radarsat-2 satelliet (InSAR) en GPS metingen. Uit het plan blijkt dat één keer per vijf jaar een waterpasmeting zal worden uitgevoerd. De laatste meting is uitgevoerd in 2013 over een gedeelte van het gebied. In het totale gebied zijn ook metingen met behulp van PS-InSAR-techniek uitgevoerd. De eerstvolgende gedeeltelijke waterpasmeting zal plaatsvinden in 2018. De tijdsinterval van vijf jaar is gebruikelijk. Tussendoor worden van tijd tot tijd de radarbeelden van de Radarsat-2 satelliet geanalyseerd, zodat een tamelijk continu beeld gevormd wordt van het verloop van de bodemdaling in ruimte en tijd. Het Meet-en Monitoringsplan gaat niet in detail in op de wijze van verwerking en rapportage van de hoogtemetingen. Evenmin op de validatie van InSAR-analyses met waterpasmetingen. SodM gaat ervan uit dat NAM zich hierbij houdt aan de Industriëleidraad [ref. 12], die door de leden van NOGEPA (waaronder NAM) is opgesteld en binnenkort beschikbaar komt.

NAM heeft twee GPS stations boven het Groningen veld geïnstalleerd (Ten Post en Veendam). Door NAM wordt het plan uitgewerkt om 5 extra stations te plaatsen zodat een vergelijking met InSAR metingen gemaakt kan worden. Om de bodembeweging in de verschillende delen van het veld continu en met grote precisie te kunnen volgen, adviseert SodM om dit aantal

permanente GPS-stations met nog eens vijf stuks te laten uitbreiden, bij voorkeur op de volgende plaatsen.

- Eén GPS station bij de cluster Slochteren i.v.m. de bodemdaling in het oosten van de structurele regio 1 (bij Froombosch/Lageland).
- Eén GPS-station aan de noordkant van structurele regio 9 (bij "de Eeken"), met het oog op mogelijke extra winning in het Zuid-Oosten van het veld.
- Eén GPS-station centraal in structurele regio 7 (bij "Schaapbulten").
- Twee extra continue GPS stations bij de locaties Zeerijp en Stedum. Daar zijn de verticale array's geplaatst en is reservecapaciteit (tegen apparatuuruitval) in het 'Loppersum gebied' gewenst.

Naast verticale bewegingen dienen ook horizontale bewegingen te worden gemeten. SodM stelt voor om over drie jaar een evaluatie uit te voeren van de mogelijkheid tot meten van de horizontale verplaatsingen.

De gevolgen van aanpassingen in het productiepatroon kunnen met de extra meetstations veel beter gemonitord worden. Daarnaast is het mogelijk met gerichte analyses van INSAR data ook lokale hoogteveranderingen te monitoren (z.g. pseudo GPS hoogtemeting). Op het Groningerwad worden overigens met tijdelijke verplaatsbare GPS-stations ook hoogtemetingen uitgevoerd.

#### **4.3.2 Detectie seismiciteit**

Het Meet- en Monitoringsplan geeft, wat betreft de seismische instrumentatie, een goede beschrijving van een relevante uitbreiding van het meetnet (boorgat seismometers en versnellingsmeters). Deze uitbreiding sluit aan op het bestaande netwerk van boorgatseismometers en versnellingsopnemers.

Het seismisch netwerk, met de uitbreiding in 2014 met 60 additionele boorgaten en 60 versnellingsmeters, zal in alle deelgebieden een aanzienlijke toename van de precisie van de aardbevingslocaties geven. Op pagina 185 van het Technical Addendum Groningen winningsplan 2013 wordt beschreven dat daarmee de detectiegrens van de huidige  $M= 1,5$  naar verwachting teruggebracht wordt tot  $M=0,5$ . De (geplaatste) ondergrondse seismische arrays geven de mogelijkheid belangrijke aanvullende informatie over de diepte van de hypocentra en het patroon van met name kleinere bevingen te verkrijgen.

Naast de bovenstaande uitbreidingen komen er vier breed-band boorgat sensoren, zo blijkt uit de Technical Addendum Winningsplan Groningen 2013, p. 186. Deze sensoren, verspreid over het veld opgenomen, zijn van belang voor de lokalisering en karakterisering van grotere bevingen. De data van deze sensoren kunnen worden gebruikt voor de bepaling van het haardmechanisme van de bevingen.

#### 4.4 Conclusie

- Het Meet- en Monitoringsplan is volledig.
- SodM adviseert de minister van EZ in te stemmen met het ingediende Meet- en Monitoringsplan, onder de volgende voorwaarden:
  - NAM dient binnen één maand na het ministeriële besluit een aanpassing van het Meet- en Monitoringsplan in, met betrekking tot de uitbreiding met vijf permanente GPS- stations. De totaal twaalf GPS-meetstations dienen vóór 1 juli 2014 operationeel te zijn.
  - In de aanpassing van het meetplan moet NAM ook een fasering van de installatie van de boorgatseismometers en accelerometers opnemen, waarbij rekening gehouden wordt met het verwachte patroon van winning en seismiciteit.
  - NAM verstrekt de Inspecteur-generaal der Mijnen maandelijks de resultaten van de GPS- en microseismische monitoringsmetingen.

## 5. Advies

### 5.1 Fundatie van het winningsplan

SodM heeft het winningsplan Groningen 2013 en de documenten die daaraan ten grondslag liggen beoordeeld op de aspecten 'volledigheid', 'planmatig beheer' en 'bodembeweging'. De conclusie is, dat de belangrijkste pijlers waarop het winningsplan rust, niet solide zijn.

In het winningsplan Groningen 2013 geeft NAM het volgende aan:

1. NAM beoordeelt het veiligheidsrisico van de activiteiten in het winningsplan als *acceptabel*;
2. NAM neemt *geen maatregelen* om de seismische activiteit terug te brengen, bijvoorbeeld door productievermindering, omdat men niet verwacht dat dit op korte termijn zal leiden tot vermindering van de dreiging van aardbevingen en de risico's die daarvan het gevolg zijn.

SodM vindt dit geen solide uitgangspunten, omdat:

- ad. 1 NAM een verkeerd type risico-analyse toegepast heeft. NAM benadert het risico als een industrieel risico, maar die aanpak geldt voor aardbevingsrisico's niet. Daarnaast berekent NAM het Plaatsgebonden Risico op een verkeerde wijze, waardoor dit niet als zodanig gebruikt mag worden. Het door SodM berekende lokaal persoonlijk risico ligt tussen de  $10^{-5}$  en  $10^{-4}$  per jaar. Het groepsrisico van door gaswinning veroorzaakte aardbevingen is vergelijkbaar met het landelijk groepsrisico bij overstromingen. SodM kwalificeert deze risico's als **hoog**. Daarnaast focust NAM bij risicobeperking alleen op de versterking van huizen en doet daarbij niets aan het voorkómen van het risico.
- ad.2 De controleberekeningen van TNO laten zien dat de stelling van NAM dat wijzigingen in de gasproductie gedurende de komende jaren **nauwelijks invloed** zullen hebben op de seismiciteit en de seismische hazard (dreiging), volgt uit de selectieve model- en parameterkeuzes van NAM. De controleberekeningen van TNO laten zien dat de effecten van veranderingen in productiesnelheid en productieverdeling op de compactie en seismische hazard in de praktijk **veel groter** kunnen zijn dan door NAM wordt verondersteld. Zo blijkt bijvoorbeeld dat een andere verdeling van de productie over het gasveld, al dan niet in combinatie met een vermindering van de totale productie al op korte termijn (1 à 2 jaar) zou kunnen leiden tot een aanzienlijke (tijdelijke) verlaging van de seismische activiteit.

### 5.2 Maatregelen

SodM pleit ervoor om zodanige maatregelen te nemen dat het seismisch veiligheidsrisico wordt verlaagd, en tegelijk een voortvarend preventieprogramma en een goed meet- en studieprogramma wordt uitgevoerd. Om dit doel te bereiken reikt de Mijnbouwwet twee instrumenten aan: artikel 36 en artikel 50. Op basis van artikel 36 kan de instemming met het winningsplan worden geweigerd of kunnen er aan de in stemming beperkingen en voorschriften worden verbonden. Artikel 50 biedt de mogelijkheid om van overheidswege

maatregelen voor te schrijven in het geval er sprake is van een ernstige aantasting van belangen van burgers vanwege schade of dreigende schade door aardbevingen.

Op dit moment is de enige manier om het seismische veiligheidsrisico te verlagen de compactie van het reservoirgesteente te beperken in het meest risicovolle gebied, namelijk het gebied rond Loppersum. Dat blijkt uit onderzoek van TNO. Om compactie te beperken moet de gasproductie in dat gebied drastisch omlaag. Dit kan worden gerealiseerd door enkele (vijf) clusters in dit gebied tijdelijk buiten bedrijf te stellen. Uit onderzoek van TNO blijkt, dat dat effect sorteert. Niet onmiddellijk, maar wel na 1 à 2 jaar. Uiteindelijk zullen de clusters tenminste drie jaar gesloten moeten blijven om de snelheid van de (gas)drukdaling en de toename van de compactie in dat gebied significant af te remmen. Die periode kan worden benut om gedetailleerde metingen en vervolgonderzoek te verrichten. Daarnaast kan in die periode het uitvoeren van preventieve (versterkings)maatregelen voortvarend ter hand worden genomen.

In het winningsplan Groningen 2013 wordt niet voorzien in het verlagen van het seismische veiligheidsrisico door clusters te sluiten, omdat NAM het huidige risico acceptabel vindt. Zoals in de vorige paragraaf uiteen is gezet vindt SodM dat dit uitgangspunt van NAM niet deugt en dat daarmee het fundament onder het winningsplan wegvalt. Aan de andere kant voorziet het winningsplan wel in goede maatregelen in de preventieve sfeer (versterking van woningen e.d.) en is er een stevig meet- en monitoringsprogramma.

### **5.3 Advies**

Met het gestelde doel voor ogen en gebruikmakend van de instrumenten die de Mijnbouwregelgeving aanreikt, komt SodM –uit oogpunt van veiligheid- tot het volgende advies.

- 1. SodM adviseert de minister van EZ niet in te stemmen met de wijziging van het Winningsplan Groningen 2013 van NAM.**
- 2. SodM adviseert de minister van EZ met gebruikmaking van artikel 50 van de Mijnbouwwet aan NAM de volgende maatregelen voor te schrijven:**
  - a. NAM sluit op zo kort mogelijke termijn van de negenentwintig beschikbare productieclusters, de vijf clusters in het meest risicovolle gebied rond Loppersum ('t Zandt, Overschild, De Paauwen, Ten Post en Leermens), voor een periode van ten minste drie jaar.
  - b. NAM dient, ten genoegen van de Inspecteur Generaal der Mijnen, vóór 1 april 2014 een werkplan in, waarin een tijdplanning is opgenomen om te komen tot een herziening van het winningsplan Groningen 2013.
  - c. NAM dient vóór 1 september 2015 een herziening van het winningsplan Groningen 2013 in, waarin de 'state-of-the-art' inzichten op het gebied van de statische- en

dynamische ondergrondmodellen, de geomechanica (inclusief de resultaten van de "doorgaande bodemdalingstudie") en seismisch risicoanalyse zijn verwerkt.

- d. NAM dient, ten genoegen van de Inspecteur Generaal der Mijnen, vóór 1 juli 2014 een meet- en regelprotocol in, waarin de beheersing van het seismisch risico in Groningen is uitgewerkt.
- e. NAM dient, ten genoegen van de Inspecteur Generaal der Mijnen, vóór 1 april 2014 een actualisatie in van het 'Study and Data Acquisition Program on induced earthquakes in the Groningen field', met bijbehorende planning.
- f. NAM voert preventieve maatregelen uit zoals aangegeven in sectie C6.2.1 van het winningsplan Groningen 2013.

**3. SodM adviseert de minister van EZ in te stemmen met het ingediende Meet- en Monitoringsplan, onder de volgende voorwaarden:**

- NAM dient binnen één maand na het ministeriële besluit een aanpassing van het Meet- en Monitoringsplan in, waarin wordt voorzien in een uitbreiding van aantal permanente GPS-stations met vijf, waarmee het totaal aantal GPS-metstations op twaalf komt. Het plan moet zodanig worden ingericht, dat alle GPS-stations vóór 1 juli 2014 operationeel zijn.
- In de aanpassing van het meetplan wordt een fasering van de installatie van de boorgatseismometers en accelerometers opgenomen, waarbij rekening wordt gehouden met het verwachte patroon van winning en seismiciteit.
- NAM verstrekt de Inspecteur-generaal der Mijnen maandelijks de resultaten van de GPS-metingen en de microseismische monitoring metingen.



## Referenties

1. Staatstoezicht op de Mijnen, *Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field*, 16 januari 2013.
2. Technische Begeleidingscommissie Ondergrond, *Review TBO rapportage onderzoek 5*, Den Haag, Utrecht, de Bilt, 24 november 2013.
3. TNO, *Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld*, TNO 2013 R11953 Eindrapport, 23 december 2013.
4. Technische Begeleidingscommissie Bovengrond, *Eindrapport TBB*, Den Haag, 8 december 2013.
5. Pietersen, C., *Beschouwing NAM risico benadering aardbevingen Groningen*, 6 januari 2014.
6. Staatstoezicht op de Mijnen, *Risico Analyse Aardgasbevingen Groningen*, Den Haag, december 2013.
7. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, *Memo Beoordeling Risicoanalyse aardgasbevingen*, 16 december 2013.
8. Pietersen, C., *Review notitie SodM 'Risicoanalyse aardgasbevingen Groningen'*, 6 januari 2014.
9. Bommer, J., Crowley, H. and Pinho, R., *Review of Arup Report "Seismic Risk Study: Earthquake Scenario-Based Risk Assessment"*, 6 december 2013.
10. Dost, B., Caccavale, M., Eck, T. van, Kraaijpoel, D., *Report on the expected PGV and PGA values for induced earthquakes in the Groningen area*, KNMI report, november 2013.
11. Technische Begeleidingscommissie Ondergrond, *Review TBO rapportage onderzoek 6*, Den Haag, Utrecht, de Bilt, 9 december 2013.
12. *Geodetische basis voor Mijnbouw, Industrieleidraad ter Geodetische bepaling van bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten*, in press.

## Lijst van afkortingen

ALARP	As Low As Reasonably Practical
ARUP	Ingenieursbureau, genoemd naar de oprichter: Ove Arup
bcm	billion cubic metre (miljard kubieke meter)
EZ	Ministerie van Economische Zaken
GMPE	Ground Motion Prediction Equations
GPS	Global Positioning System
GR	Groepsrisico
InSAR	Satellietmetingen van bodemdaling (Interferometric Synthetic Aperture Radar)
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
KST	Kamerstukken
LPR	Lokaal Persoonlijk Risico
M	Magnitude (sterkte van een aardbeving)
Mbb	Mijnbouwbesluit
Mbw	Mijnbouwwet
mld	miljard
NAM	Nederlandse Aardolie Maatschappij BV
NLOG	Nederlandse Olie- en Gasportaal
Nm3	Normaal kubieke meter (condities: 0° Celsius en 101,325 kiloPascal)
NOGEPA	Nederlandse Olie en Gas Exploratie en Productie Associatie
P&C	Pinho en Crowley
PGA	Peak Ground Acceleration
PGV	Peak Ground Velocity
PR	Plaatsgebonden Risico
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis
PS-InSAR	Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar
RAM	Risico Assessment Matrix
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
RTCM	Rate Type Compaction Model
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen
TBB	Technische Begeleidingscommissie Bovengrond
TBO	Technische Begeleidingscommissie Ondergrond
Tcbb	Technische commissie bodembeweging
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek

## **Bijlage 1: Consequenties beoordeling Bommer et al. op ARUP seismisch risico rapport**

De review van Bommer, Pinho en Crowley is opmerkelijk kritisch ten aanzien van het onderzoekswerk door Arup (onderzoeksrapport 1). Naast veel detailkritiek zijn de drie belangrijke hoofdbezwaren:

1. Het door Arup berekende risico is niet in overeenstemming met het risico zoals dat wordt waargenomen bij natuurlijke bevingen met vergelijkbare magnitudes;
2. De gebruikte kwetsbaarheidsfunctie is bepaald voor andere type gebouwen en voor natuurlijke bevingen van grotere magnitude, waarbij de functie niet gecorrigeerd is voor de langere duur van deze grotere bevingen;
3. In de analyse is uitgegaan van uniformiteit in de reactie van de bovengrond op een beving.

Deze drie punten van kritiek zijn door SodM nader geanalyseerd ten aanzien van de mogelijke gevolgen ervan voor de berekening van het seismisch risico in Groningen.

Ad 1. Dat het gevonden schade- en letselbeeld niet in overeenstemming is met het waargenomen beeld voor natuurlijke bevingen met vergelijkbare magnitudes, is vanzelfsprekend gezien de veel geringere diepte waarop de bevingen in Groningen plaatsvinden. Beter is het dan ook om te kijken naar bevingen met vergelijkbare grondversnellingen en het aantal dodelijke slachtoffers te corrigeren voor de diepte waarop de beving plaatsvindt. Hiermee vergeleken is het aantal dodelijke slachtoffers niet uitzonderlijk hoog. Ook in vergelijking met de Modified Mercalli Intensity schaal, waar de impact van een beving gekoppeld is aan de grondversnelling, komen de grondversnellingen zoals voor Groningen bepaald overeen met bevingen die een gemiddelde ("moderate") tot zware schade ("moderate/heavy") kunnen geven.

Ad 2. In het ARUP rapport worden eveneens voor een tweetal scenario's de resultaten gegeven van het gebruik van een kwetsbaarheidsfunctie, waarbij gecorrigeerd is voor de kortere duur van aardbevingen met een lagere magnitude. Het bijbehorende risico is in de SodM analyse bepaald en in Figuur 3 weergegeven. De bepaalde curve bestaat maar uit 4 punten en de interpolatie ervan, gegeven door de stippellijn, is daardoor onzeker. De correctie voor het andere type huizen (correctie op de kwetsbaarheidsfunctie) geeft een lichte reductie van het risico (ongeveer een factor 2 voor 10 of meer dodelijke slachtoffers). Dit resulteert niet in significant andere conclusies. Het risico blijft hoog in vergelijking met andere risico's door industriële activiteiten en vergelijkbaar met het landelijk risico bij overstromingen.

Ad 3. In de ARUP analyse wordt ervan uitgegaan dat op alle locaties de grondversnellingen worden bepaald door dezelfde GMPE vergelijking (P50 of P84). Dit betekent dat op alle locaties de grondversnellingen gemiddeld of verhoogd zullen zijn, bij een beving met een bepaalde magnitude. Deze benadering is inherent aan de gevolgde deterministische aanpak

en kan alleen worden opgelost door het maken van een volledige probabilistische risico analyse, waarin al deze onzekerheden expliciet kunnen worden meegenomen. Ook SodM is van mening dat alleen een probabilistische analyse een volledig beeld kan geven van de risico's.

De conclusie van SodM is dat geen van de drie hoofdbezwaren een wezenlijke invloed heeft op de analyse van de seismische risico's in Groningen. Met name het derde punt van kritiek wordt door SodM onderschreven en leidt mede tot de aanbeveling dat NAM op zo kort mogelijke termijn een volledig probabilistische seismisch risicoanalyse uitvoert.

## Bijlage 2: Commentaar op NAM hazard analyse

De basis voor de SodM risico analyse vormt de NAM hazard analyse uit de onderzoeken 5 en 6, samengevat in de Technische bijlage bij het Winningsplan<sup>18</sup>. Op verzoek van SodM heeft TNO op de NAM hazard analyse een aantal controleberekeningen uitgevoerd. Op basis van deze controleberekeningen plaatst TNO een aantal kanttekeningen bij de hazard analyse van NAM<sup>19</sup>:

1. De manier waarop het totale seismische moment dat in een periode kan vrijkomen wordt bepaald<sup>20</sup>, geeft een onderschatting van het werkelijke seismische moment dat kan vrijkomen
2. Door het loskoppelen van magnitude en locatie in de NAM berekeningen is het mogelijk dat bevingen met hogere magnitudes kunnen voorkomen op locaties waar daarvoor onvoldoende seismisch moment beschikbaar is (locaties met lage compactie en lage aardbevingsdichtheid). Hierdoor wordt het seismische hazard uitgesmeerd over het gehele Groningen veld en kan de methode voor wat betreft het seismische hazard niet differentiëren tussen de verschillende productiefilosofieën.
3. De seismisch hazard is gevoelig voor onzekerheden in de partiticoëfficiënt, het deel van het reservoirmoment dat wordt omgezet in seismisch moment (bevingen) en de berekende compactie. Hierdoor is het lastig uitspraken te doen omtrent het absolute niveau van het seismische hazard.

SodM is van mening dat deze kanttekeningen van TNO bij de methodiek in onderzoeken 5 en 6 verder uitgezocht moeten worden in samenwerking met de NAM. Wel heeft SodM onderzocht in hoeverre haar berekeningen van het risico beïnvloed worden door deze kanttekeningen.

In essentie stelt TNO de resultaten van de hazard berekening van NAM ter discussie. Het KNMI heeft in onderzoek 4, op basis van de geregistreerde seismiciteit tussen 1991 en 1-10-2013, een onafhankelijke Probabilistische Seismische Hazard Analyse uitgevoerd. De KNMI analyse resulteert in voorspelde maximale grondversnellingen die vergelijkbaar zijn de resultaten uit de analyse van NAM. De locatie van het maximum van de door KNMI berekende grondversnellingen ligt echter meer westelijk dan door NAM bepaald. In de analyse van het KNMI komt het gebied met de hoogste grondversnellingen goed overeen met de huidige locatie van de grootste bevingen in de driehoek tussen Hoeksmeer, Zandweer en Huizinge.

---

<sup>18</sup> NAM, *Technical Addendum to the Winningsplan Groningen 2013, Subsidence, Induced Earthquakes and Seismic Hazard Analysis in the Groningen Field*, november 2013

<sup>19</sup> TNO, *Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld*, TNO 2013 R11953 Eindrapport, 23 december 2013.

<sup>20</sup> Het totale seismische moment wordt bepaald door het berekende cumulatieve seismische moment in een bepaald jaar in de toekomst te verminderen met het *uit het model berekende* cumulatieve seismische moment in 2013. SodM en TNO zijn van mening dat in plaats van het berekende seismische moment in 2013 het daadwerkelijke cumulatieve *vrijgekomen* seismische moment gebruikt zou moeten worden.

Aangezien de door het KNMI onafhankelijk bepaalde hazards voor de komende drie jaar vergelijkbaar zijn met de resultaten van de NAM, kan geconcludeerd worden dat de conclusies van de risicoanalyse van SodM [ref.6], voor het gebied met het hoogste aardbevingsrisico (tussen Hoeksmeer, Zandweer en Huizinge) en bij de geplande productie van NAM, niet wezenlijk worden beïnvloed door de, door NAM in onderzoeken 5 en 6 gebruikte, methodiek om de hazards te berekenen.

Wegens het ontbreken van gegevens in de onderzoeken 1, 5 en 6 voor locaties buiten bovengenoemde gebied, kan de invloed van de kanttekeningen van TNO op het risico in deze locaties niet worden bepaald.

### Bijlage 3: NAM analyse naar invloed van productiesnelheid op seismiciteit Groningen

NAM stelt dat een invloed van productiesnelheid op het totale aantal bevingen gedurende de gehele productieperiode wordt weerlegd door een analyse van het aardbevingsgedrag tijdens perioden met verschillende productiesnelheden. De NAM analyse (onderstaande figuur 6.7 uit de technische bijlage bij het winningsplan) toont de gasproductie tussen individuele bevingen gedurende perioden met verschillende productiesnelheden. **Deze analyse is echter niet valide.**

De getoonde variatie in de productiesnelheid is een gevolg van de zomer/winter productieswing in het Groningen veld. De tijdsduur tussen de hoogste en de laagste snelheden is in de orde van 6 maanden. De getoonde productiesnelheden (gas production rate) gelden voor de putlocaties. De getoonde bevingen vinden plaats op verschillende afstanden van die putlocaties. Door de verschillen in afstand tot verschillende putten en de aanzienlijke looptijden (jaren) van drukpulsen vanaf de verschillende putlocaties naar de bevingslocaties (sectie 6.3.1 van de technische bijlage bij het winningsplan) zijn de getoonde productiesnelheden niet geldig voor de bevingen die daarbij getoond worden. Daardoor en door het gecombineerde effect van drukpulsen vanaf verschillende putten is de variatie in de productiesnelheden door de zomer/winter swing op de locaties van de bevingen in werkelijkheid zeer gering.

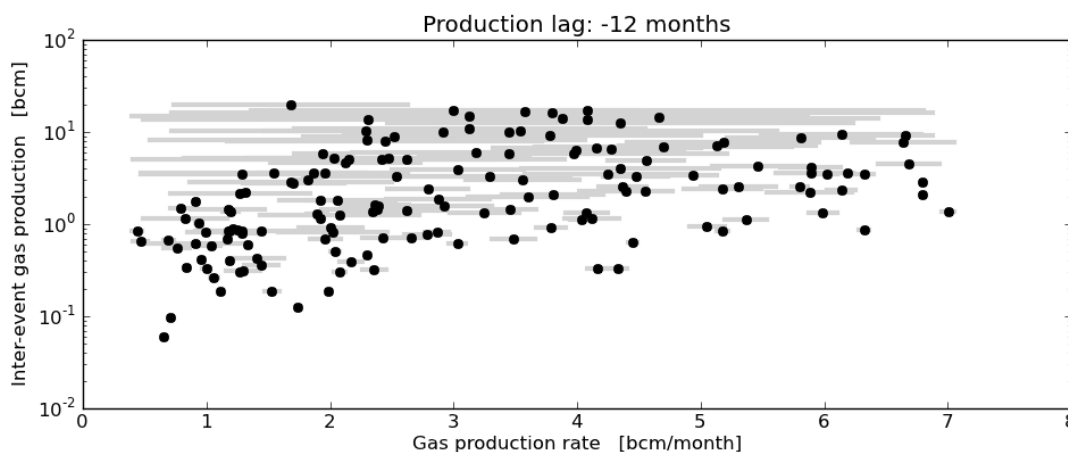


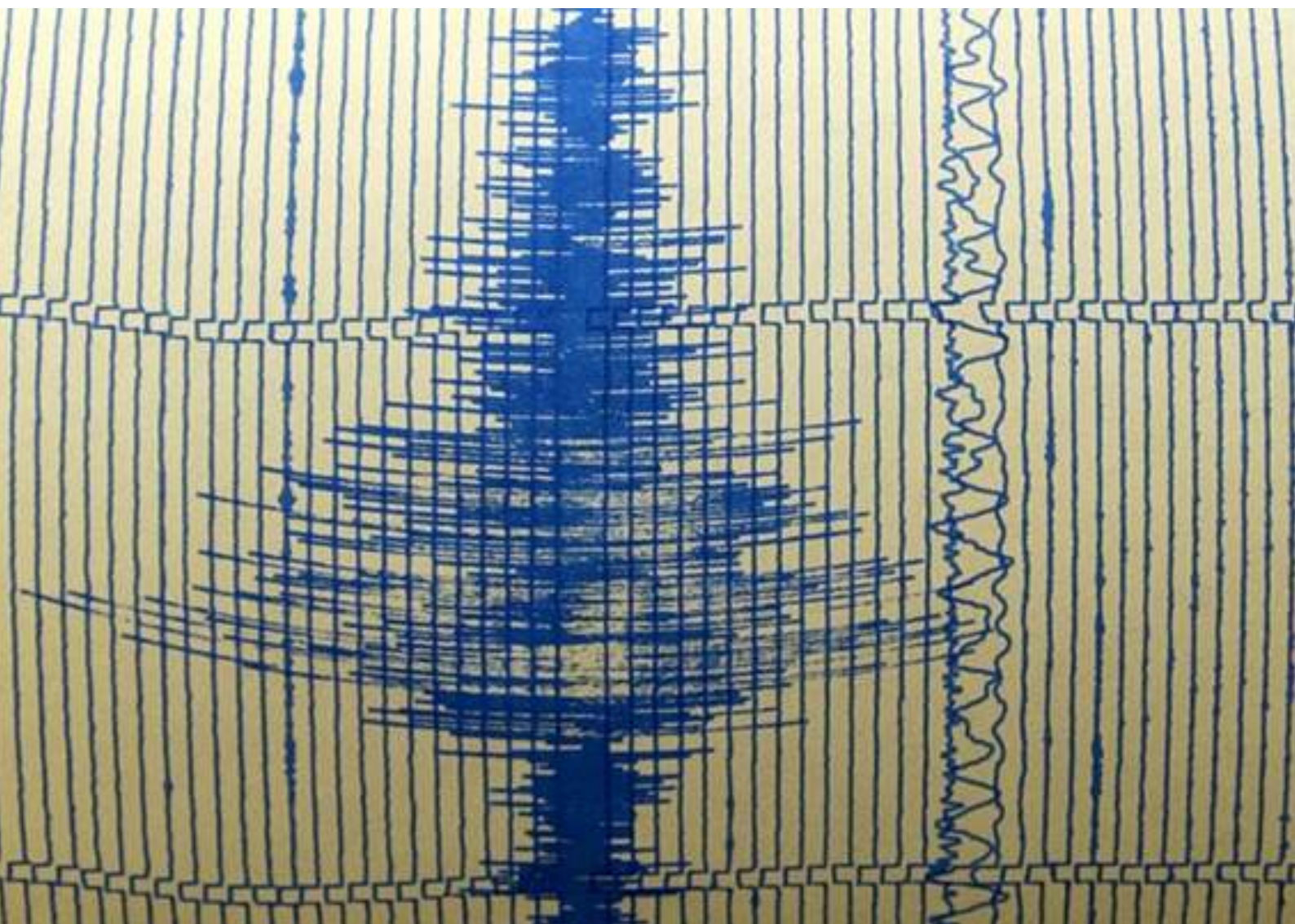
Figure 6.7b (Technische bijlage bij het winningsplan Groningen 2013 NAM) Inter-event gas production exhibits little sensitivity to the rate of gas production. To avoid any bias of event clustering, all events within 3 days of the previous event were excluded. Dots and grey bars denote the average and the range of inter-event production rates respectively; in some instances the grey bar is so small as to be covered by the black dot;



State Supervision of Mines  
*Ministry of Economic Affairs*

# State Supervision of Mines

Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field, 16 January 2013







## Contents

<b>Contents</b>	<b>1</b>
<b>Conclusies op basis van de analyse</b>	<b>2</b>
<b>Executive summary</b>	<b>3</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2 Induced Seismicity (variation) in Groningen</b>	<b>7</b>
2.1 <i>General observations</i>	7
2.2 <i>Energy release</i>	8
2.3 <i>Statistical analysis</i>	8
2.3.1 <i>Spatial separation of seismicity</i>	9
<b>4 Seismicity and magnitudes for Groningen</b>	<b>11</b>
4.1 <i>The Gutenberg-Richter law</i>	11
4.2 <i>Implications for Groningen</i>	12
4.3 <i>Monte Carlo derivation of BGR parameters</i>	12
4.4 <i>Discussion</i>	14
4.5 <i>Relation between production and seismicity</i>	15
<b>5 Consequences for future earthquakes in Groningen</b>	<b>20</b>
5.1 <i>Expectation probability for larger magnitude earthquakes due to already realised production</i>	20
5.2 <i>Predicted earthquakes in Groningen under different production scenarios</i>	21
<b>Conclusions</b>	<b>25</b>
<b>References</b>	<b>26</b>
<b>Appendix A: October 8th SSM technical assement</b>	<b>27</b>
<b>Appendix B: Summary of peer review workshop outcomes</b>	<b>31</b>
<b>Position Statement of KNMI</b>	<b>34</b>

## Conclusies op basis van de analyse

Dit rapport beschrijft een analyse van aardbevingsdata uit het Groningen veld door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) waarin het te verwachten jaarlijkse aantal aardbevingen (de seismiciteit) wordt gekoppeld aan de gasproductie en gasproductiesnelheid. Dat geeft een betere beschrijving van het seismische gedrag van Groningen tot nu toe en andere voorspellingen voor de toekomst.

Naar aanleiding van deze analyse in dit rapport kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Het jaarlijkse aantal aardbevingen en de energie die daarbij vrijkomt nemen toe en daarmee voor Groningen ook de kans op het optreden van aardbevingen met hogere magnitude.
2. Een Monte Carlo analyse toont aan dat het niet mogelijk is om op basis van de seismische data van het Groningen veld een waarde voor  $M_{\max}$  te bepalen, anders dan dat de waarde daarvan boven de 3,6 ligt. Dat betekent niet dat er geen bovengrens is.
3. Hogere waarden voor  $M_{\max}$  kunnen op voorhand niet worden uitgesloten zonder aanvullende schattingen op basis van niet-seismische methodes zoals geomechanische berekeningen. Zulke data is momenteel niet beschikbaar voor Groningen.
4. Omdat op dit moment geen uitspraak kan worden gedaan over  $M_{\max}$  is de verwachtingswaarde voor de kans op een aardbeving met een magnitude van 3,9 of hoger in Groningen niet nauwkeurig te bepalen. Gedurende de komende 12 maanden is de verwachtingswaarde voor die kans in het ongunstigste geval (uitgaande van een  $M_{\max}$  van 6,0) ongeveer 7,6%. Bij een  $M_{\max}$  van 5,0 is dat ongeveer 7 %, bij een  $M_{\max}$  van 4,5 ongeveer 5,8 %. Bij een  $M_{\max}$  van 3,9 wordt de verwachtingswaarde 0%. De verwachtingswaarde voor de kans op een aardbeving met magnitude van 4.5 of hoger gedurende de komende 12 maanden ligt tussen 0 en 2%.
5. Er is een voorlopige versie van een vergelijking gevonden die, binnen de te verwachten intrinsieke statistische fluctuaties, het jaarlijkse aantal aardbevingen met magnitude  $M \geq 1,5$  - en de variaties daarin – voorspelt op basis van de cumulatieve productie en de productiesnelheid. Die vergelijking is gerelateerd aan een (rate type) compactie model waarmee het waargenomen niet-lineaire compactiegedrag van het Groningen veld goed wordt beschreven. De gevonden vergelijking suggereert dat de mate van vertraging in de bodemdaling de seismiciteit bepaalt.
6. SodM heeft op basis daarvan een aanpak ontwikkeld voor de beschrijving van het waargenomen seismische gedrag van het Groningen veld. De b-waarde uit de Gutenberg-Richter relatie voor Groningen wordt daarin gecombineerd met de bovengenoemde vergelijking en een aanname voor de maximaal mogelijke magnitude  $M_{\max}$ . De op basis van deze aanpak berekende (veranderingen in) de seismiciteit in Groningen zijn in overeenstemming met de waarnemingen. Dezelfde aanpak kan worden gebruikt om de waarschijnlijkheid te berekenen voor het optreden van een aardbeving boven een gegeven magnitude voor een tijdsperiode in de toekomst.
7. De verwachtingswaarde voor de kans op een aardbeving met een grotere magnitude ( $M \geq 3,9$ ) kan op termijn van enkele jaren met ongeveer een factor twee worden verlaagd door de jaarlijkse productie uit het Groningen veld in een keer te verlagen met een factor twee ten opzichte van de huidige productiesnelheid van ca. 50 miljard normal kubieke meter gas per jaar, gevolgd door een geleidelijke verdere afname. Een significante verwachtingswaarde voor de kans op een aardbeving met een grotere magnitude blijft ook dan bestaan.
8. Op basis van de gevonden relatie tussen het jaarlijks aantal aardbevingen, de productie en de productiesnelheid zou de productiesnelheid tot ca. 12 normal BCM/jaar verlaagd moeten worden om het risico op aardbevingen te minimaliseren. Het is daarom mogelijk dat bij die productiesnelheid na enkele jaren vrijwel geen aardbevingen met een magnitude  $\geq 1.5$  meer zouden optreden in het Groningen veld.

## Executive summary

A higher than predicted annual frequency of earthquakes with a magnitude equal or above 3.0 has led to an independent assessment by State Supervision of Mines (SSM) of the available Groningen earthquake data and the applied analysis methods. The occurrence of the highest magnitude earthquake thus far, near Huizinge in August 2012, with a moment magnitude of 3.6 gave further impetus. In the re-assessment SSM has limited the analysis to the earthquake data from the Groningen field only.

The Groningen field shows an increasing number of earthquakes over time, as reported in [1]. As a result, the expectation value for the probability for higher magnitude earthquakes has increased significantly for Groningen. Firm conclusions on this could only be drawn recently given the inherent statistical uncertainty resulting from the initially much more limited number of earthquakes and the fact that a clear increase only started around 2003. Annual gas production increased from 20 Billion normal cubic meter (normal BCM) in 2000 to a level around 50 billion normal BCM in 2011. In the same period the annual number of registered earthquakes with a magnitude of 1.5 or higher increased from on average 4 per year during the period 1991-2002 to 28 earthquakes in 2011. Superimposed on this longer term trend, increases and decreases in the annual gas production are followed by increases and decreases in the annual number of earthquakes with a delay of approximately a year.

The effect of the increasing cumulative production can be separated from the effect of the changing annual production using a preliminary version of an equation related to a (rate type) compaction model that can be used to describe the observed non-linear compaction behaviour of the Groningen field [2,3,4]. The thus calculated annual number of earthquakes agrees, within the intrinsic statistical uncertainty, with the historically observed variation in the Groningen seismicity between 1964 and 2012. This suggests that the seismicity level is linked to the amount of subsidence delay. Note that this is still work in progress.

The SSM analysis confirms previous preliminary analysis on Groningen data [1] on the fact that earthquakes with a magnitude equal to or above 2.5 are approximately ten times less probable than earthquakes with a magnitude equal to or above 1.5, independent of the total number of earthquakes in a given period (e.g. in a given year)<sup>1</sup>. Earthquakes with a magnitude equal to or above 3.5 are again approximately ten times less probable. This behaviour is expected to continue for higher magnitude earthquakes that have not yet taken place in Groningen, although bounded by the maximum magnitude that can occur. Based on the data from all fields in the Netherlands for the full period since 1996, a maximum probable magnitude of 3.9 was calculated during an earlier study [1]. An SSM Monte Carlo analysis on the seismicity data from Groningen only now shows that little can be said about the maximum possible magnitude in Groningen other than that it can have any value above 3.6. Perhaps that non-seismic methods can be applied to obtain estimates for the maximum possible magnitude. This could include estimates based on the maximum percentage of the stored elastic energy that can be released in a single earthquake. Or an upper limit based on an analysis of the distribution and size of faults present in the field. At the moment such results are not available for Groningen.

Using the total number of seismic events in a given period and making an assumption on the maximum possible magnitude, the probability for earthquakes equal to or above a given other magnitude can be calculated for that given period. Doing so, the historic seismic behaviour of the Groningen field is reproduced within the intrinsic statistical uncertainty. For the coming 20 earthquakes (approximately the number of earthquakes with  $M \geq 1.5$  expected during the next 12 months) this approach results in a worst case expectation value for the probability for an earthquake with a magnitude equal or above 3.9 of around 7.6 %. In this calculation a value of 6.0 is imposed for  $M_{\max}$ . If  $M_{\max}$  would be 5.0 the expectation value for the probability becomes 7 % and 5.8 % for an  $M_{\max}$  of 4,5. For an  $M_{\max}$  of 3.9 the expectation value for the probability becomes 0%. The expectation

---

<sup>1</sup> Hence, for every 10 tremors with a magnitude equal to or above 1.5 there is on average one tremor with a magnitude equal to or above 2.5.

value for the probability of a magnitude 4.5 or larger earthquake to occur within the next twelve months is between 0 and 2%.

Combining the derived (preliminary) relation to compute the annual number of earthquakes on the basis of both cumulative and annual production with the above approach, the seismicity to be expected under various Groningen production scenario's can be calculated. Results suggest that the expectation value for the annual number of earthquakes of magnitude  $M \geq 1.5$  might be decreased by approximately a factor of two, by decreasing the annual production rate by a factor two compared to the current production rate of some 50 billion normal cubic meter/year (normal BCM) followed by further reductions. The expectation value for the number of larger magnitude earthquakes then will also halve. However, under this scenario a significant expectation probability for larger magnitude earthquakes will remain (typically 2-5 % for an  $M \geq 4.5$  during the next 4 years).

Based on the derived (preliminary) relation between annual number of earthquakes and production, production rates would have to be lowered to values around 12 normal BCM/year in order to achieve minimal risk. It is therefore possible that at this production rate almost no earthquakes with magnitudes  $\geq 1.5$  would occur after a number of years.

## 1 Introduction

The Groningen field, the largest gas field of Europe, has been in production since 1964. In 1991, the first production-induced earthquake with a local magnitude  $M_l$  of 2.4 was recorded at Middelstum. To date, over 585 induced earthquakes have been related to gas production from this field. Most earthquakes have been of a small magnitude ( $M_l < 1.5$ ), while some 200 earthquakes had magnitudes  $M_l \geq 1.5$ . Initially, the detection capabilities of the seismic network were limited. Since the installation of 8 borehole stations in 1995, a detection threshold of  $M_l \geq 1.5$  has been achieved for the whole of the Groningen field [1].

Until recently there were no indications for differences between the local magnitude  $M_l$  and the moment magnitude  $M_w$  (which better represents the released energy) for the induced earthquakes in Groningen.

In August 2012, the largest magnitude earthquake so far occurred near Huizinge with a local magnitude moment  $M_l$  of 3.4 and a moment magnitude  $M_w$  of 3.6. The damage caused by this earthquake was extensive compared to previous earthquakes of comparable magnitude, though not of a structural nature. This time over 2000 damage claims were submitted to the operator NAM. The event raised general concern on the level of acceptability of damage caused by induced earthquakes and led to questions whether earthquakes with even larger magnitudes, possibly causing structural damage to property, could occur in the future.

Preliminary analysis made by the KNMI on the Huizinge earthquake (personal communication, 2012) shows that the Huizinge 3.6 earthquake was recorded as a multiple pulse event of longer duration. A multiple earthquake source causing this phenomenon could be excluded, however more extensive investigation into the origin of the multiple is ongoing.

In order to address the questions raised and in order to investigate whether or not mitigating measures are feasible, State Supervision of Mines (SSM) commenced an independent analysis on the Groningen seismicity dataset. The analysis was made on public data only: <http://www.knmi.nl/seismologie/geinduceerde-bevingen-nl>. First results were shared with KNMI on the 11<sup>th</sup> of September 2012. Further developments were shared with KNMI, TNO-AGE and NAM during meetings on the 21<sup>st</sup> of September, the 8<sup>th</sup> of October and the 10<sup>th</sup> of October of 2012. During the meeting on the 8<sup>th</sup> of October a starting point conceptual model and a proposed way forward were presented by SSM (see Appendix A). Results as arrived at by early November were put forward for peer review during an expert workshop on the 8<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> of November 2012. A summary of the workshop outcomes is given in Appendix B. Subsequently early December 2012 an updated report taking into account the results from the peer review was submitted to KNMI for a second review.

This report summarizes the results of the analysis made by SSM, including the additional work carried out in response to the peer review and the later changes made in response to the KNMI review.

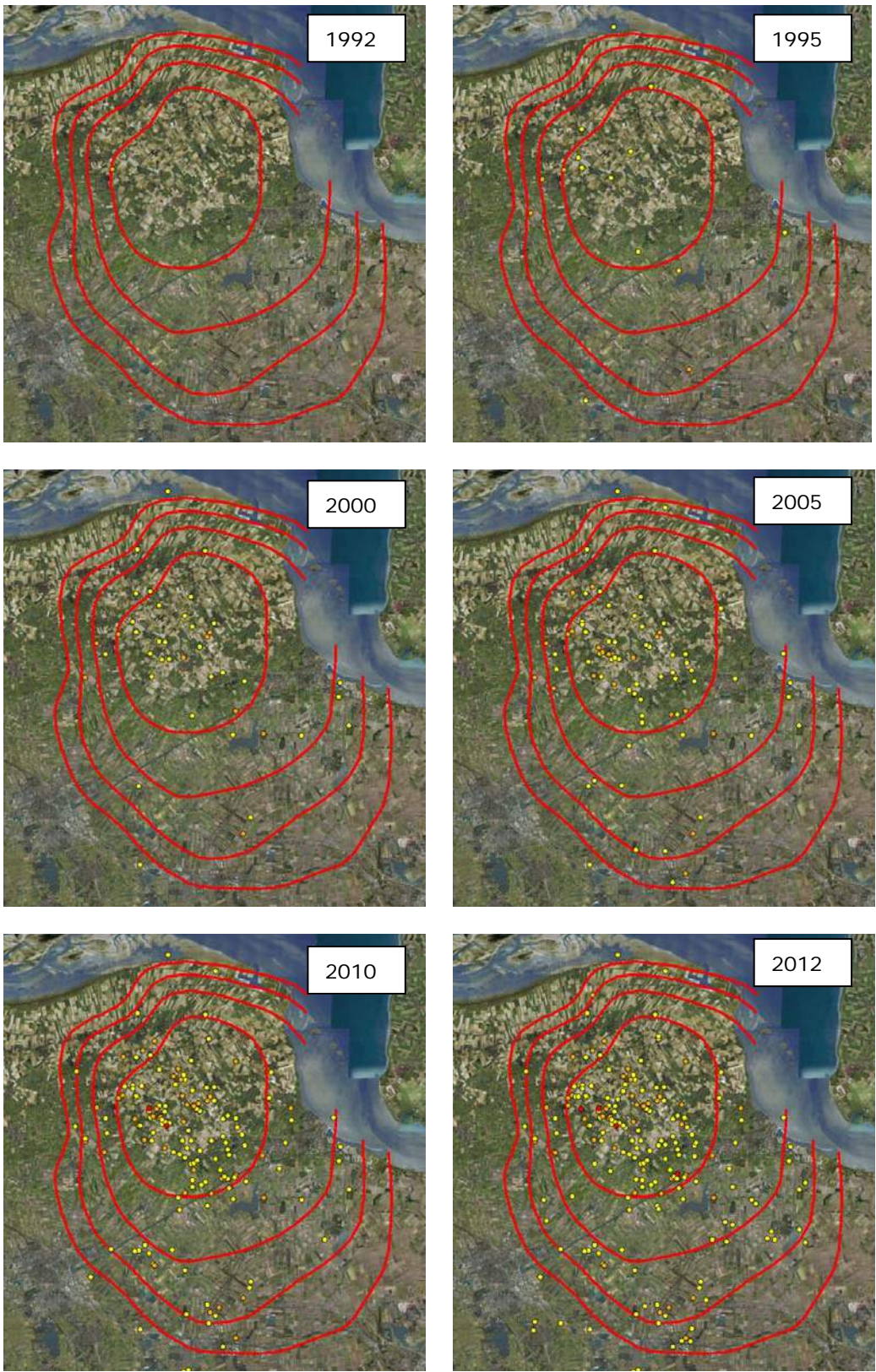


Figure 1: Spatial distribution of earthquakes over the Groningen gas field through time. The colour coding of the dots indicates the magnitude class: yellow  $1.5 \leq M \leq 2.0$ , orange  $2.0 < M \leq 3.0$ , red  $M > 3.0$ . The red lines indicate the contours of the subsidence bowl as observed in 2008.

## 2 Induced Seismicity (variation) in Groningen

### 2.1 General observations

Figure 1 shows the location of earthquakes of magnitudes 1.5 and larger through time in roughly 5-year intervals. The area where the seismicity is occurring has been increasing, with two distinct areas: the area around Middelstum and the area towards the south-west of the field. The area around Middelstum coincides with the deepest part of the subsidence bowl caused by the Groningen gas production. Both areas correspond with areas of higher average porosity while lower porosity zones around the southern production clusters show little seismicity. This suggests a link between seismicity and reservoir compaction (which is higher in higher porosity zones).

The number of earthquakes of a certain magnitude against time is shown in Figure 2. For all magnitude classes (e.g.  $M \geq 1.5$ ) the number of earthquakes is increasing almost linearly on a log-normal scale with time. The steep incline in the number of earthquakes prior to 1996 is due to the incompleteness of the dataset for earthquakes with magnitudes below 2.5. This means that earthquakes of lower magnitudes close to the network stations were recorded, but earthquakes at greater distances were not detected. Since 1996, the network threshold over the whole of the Groningen field is magnitude 1.5. Hence, as of that moment all earthquakes of magnitude larger or equal to 1.5 that occur within or close to the Groningen field will have been detected by the seismic stations.

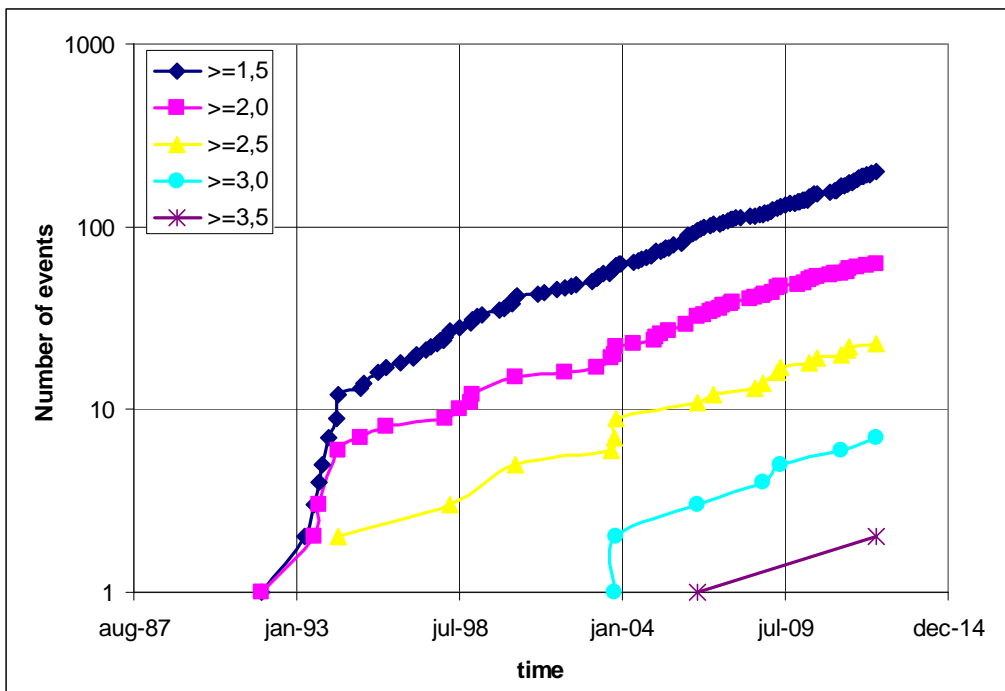


Figure 2: Number of earthquakes equal or larger than a particular threshold magnitude plotted against time of occurrence. The number of earthquakes is increasing almost linearly in this log-normal figure. Notice also the increasing density of earthquakes with time, especially for the classes up to  $M \geq 2.5$ .

Of particular importance is the observation that prior to 2003 earthquakes with magnitude  $\geq 3.0$  were absent, whereas since that time they have occurred approximately once every 1.3 years. Based on extrapolation (see Figure 2), the occurrence of an earthquake with a magnitude 3.0 or greater would have been likely at least since 1998. Extrapolation of the statistics also suggests that unnoticed earthquakes with magnitudes above 1.5 are likely to have taken place prior to 1990. For the magnitude classes up to  $M \geq 2.5$  a clear increase in the density of earthquakes through time can be observed. This implies that the frequency at which an earthquake of this class occurs is increasing. A similar increase is plausible for the higher magnitudes



## 2.2 Energy release

The cumulative seismic energy released is shown together with the cumulative production in Figure 3. In the cumulative production, the annual cycle of low production in summer and increased production in winter is clearly visible. Figure 3 also shows the increase in annual production since 2003. The cumulative seismic energy that was released by the earthquakes clearly shows the higher magnitude earthquakes occurring since 2003. With each magnitude point increase the energy release of an earthquake increases by a factor of 30. Thus higher magnitude earthquakes release the most energy. The increased energy release by the higher magnitude earthquakes ( $M \geq 3.0$ ) introduces a break in the trend of energy release prior to 2003. This result is consistent with the analysis presented in reference[1].

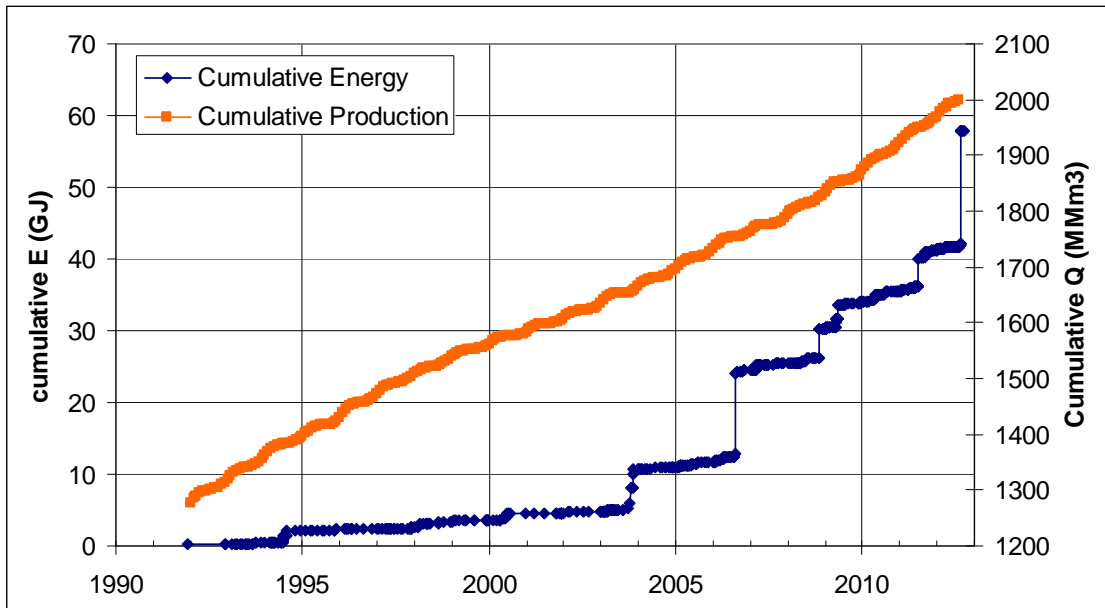


Figure 3: Cumulative seismic energy release and cumulative production through time. The higher magnitude earthquakes ( $M \geq 3.0$ ) release the most energy (10 times more than a magnitude 2.5 earthquake), which introduces the steps observed in the figure.

## 2.3 Statistical analysis

It is important to test the observations made in the previous sections on statistical significance: 1) the frequency of magnitude  $\geq 3.0$  earthquakes since 2003, and 2) the increase in the number of earthquakes with  $M \geq 1.5$ . Statistical significance is tested by deriving Poisson confidence intervals for particular equal time periods. In order for two Poisson distributions to be statistically significantly different, the number of observed earthquakes in one particular time period needs to be outside the confidence interval of the number of observed earthquakes in the other, equally long, time period. We adopt a 99% confidence level for the confidence intervals.

### 1) Frequency of magnitude $\geq 3.0$ earthquakes since 2003

In order to test whether the frequency of the magnitude  $\geq 3.0$  earthquakes is feasible within a Poisson distribution which shows no prior seismicity at that magnitude level, we adopt two 10 year time periods: 1993-2002 and 2003-2012. During the 1993-2002 10-year period no earthquakes of magnitude  $\geq 3.0$  were observed. The exact confidence interval corresponding to a 99% confidence level for this time period is 0 to 5.3 earthquakes. During the following 10-year period (2003-2012) 7 magnitude  $\geq 3.0$  earthquakes were observed. This is well outside the 99% confidence interval. The exact confidence interval corresponding to a 99% confidence level for the latter time period is 2.0 to 17.1 earthquakes. Hence, the frequency of the magnitude  $\geq 3.0$  earthquakes since 2003 is statistically significantly different from the previous period at a 99% confidence level.

2) Increase in number of earthquakes with  $M \geq 1.5$

Similarly, the increase in the number of earthquakes with  $M \geq 1.5$  can be statistically tested. In the 1996-2002 time period 32 earthquakes of magnitude  $\geq 1.5$ , 9 of magnitude  $\geq 2.0$ , and none of magnitude  $\geq 3.0$  occurred. In the 2006-2012 time period 121 earthquakes of magnitude  $\geq 1.5$ , 36 of magnitude  $\geq 2.0$ , and 5 of magnitude  $\geq 3.0$  were detected. The confidence intervals for the two periods for these magnitude classes are given in Table 1. For all magnitudes the number of earthquakes in the period 1996-2002 are outside the confidence interval for the period 2006-2012 (at a 99% confidence level and only just for magnitude 3.0).

Table 1: Confidence intervals derived for the number of earthquakes of magnitudes  $\geq M$  for the periods 1996-2002 and 2006-2012.

M	1996-2002		2006-2012	
	number of earthquakes	confidence interval	number of earthquakes	confidence interval
1.5	32	19.3-49.6	121	94.5-152.3
2.0	9	3.1-20.0	36	22.4-54.5
3.0	0	0-5.3	5	1.1-14.1

Based on the tests above, it can be concluded that the seismicity in the Groningen field is non-stationary in time. At the 99% confidence level the increase in the number of earthquakes is statistically significant.

**2.3.1 Spatial separation of seismicity**

At the peer review workshop NAM suggested that two distinct spatial areas of seismicity (around the town of Middelstum and in the south-west of the field) should be regarded separately. Figure 4 shows the number of earthquakes for both spatial areas separately. The conclusions drawn above on the total dataset remain valid for both areas. However, seismicity in the south-west seems to be increasing less rapidly compared to the central area. This might be related to lower average porosities and hence lower compaction in the south-west area. Average pressure drop for the two areas seems very similar.

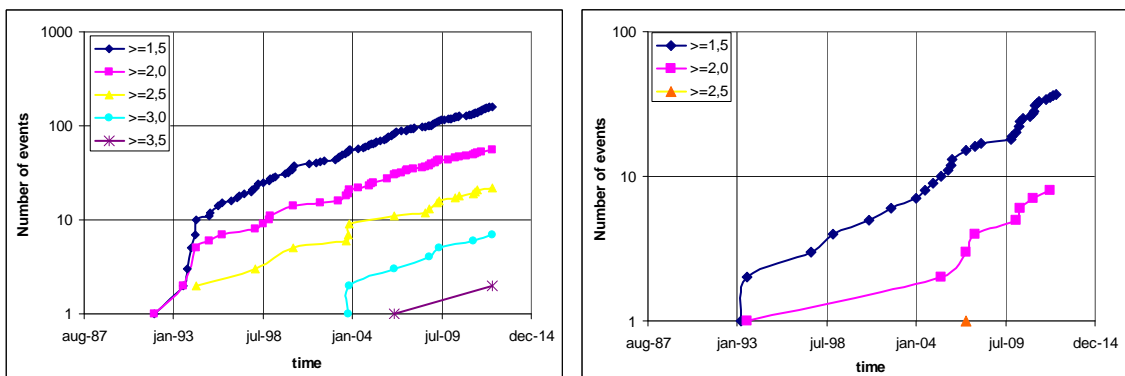


Figure 4: Number of earthquakes larger than a particular threshold magnitude plotted against time of occurrence. Left figure represents the seismicity at the area around the town of Middelstum, the right figure represents the seismicity in the south-west of the field. The number of earthquakes in both areas is increasing with time as is the frequency of occurrence.

Figure 5 provides the comparison of the annual production with the annual number of earthquakes for the two areas separately.

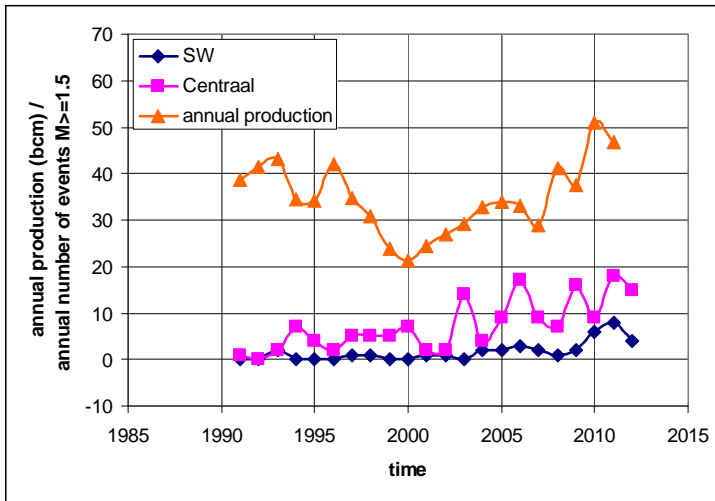


Figure 5: Both the annual production and the annual number of earthquakes with a magnitude of 1.5 or larger are shown against time.

For both spatial areas the statistical significance of the increase in number of earthquakes of magnitudes  $\geq 1.5$  was examined. The results are given in Table 2. For both spatial areas the conclusion holds that at the 99% confidence level the increase in the number of earthquakes is statistically significant.

Table 2: Confidence intervals derived for the number of earthquakes of magnitudes  $\geq 1.5$  in both spatial areas for the periods 1996-2002 and 2006-2012.

region	1996-2002		2006-2012	
	number of earthquakes	Confidence interval	number of earthquakes	Confidence interval
Central	28	16.2-44.7	91	68.3-118.6
SW	4	0.7-12.6	26	14.6-42.3

## 4 Seismicity and magnitudes for Groningen

### 4.1 The Gutenberg-Richter law

The *Gutenberg-Richter law* (GR) is an empirical relation between the magnitude  $M$  of some seismic event, and  $N(M)$ , the number of earthquakes with magnitudes higher than  $M$ . In 1944, Beno Gutenberg and Charles Francis Richter [10,11] proposed the following linear relationship:

$$\log_{10} N(M) = -b M + a \quad (1)$$

where  $N(M)$  is the number of earthquakes having a magnitude  $\geq M$ , and  $a$  and  $b$  are constants for a fixed data set. The constant,  $b$ , describes how the number of earthquakes in the zone varies for different magnitudes (it is the negative of the slope of the GR relationship). Instead of using the number of earthquakes it is common practice to use the frequency of occurrence, also named *Frequency-Magnitude Relation* (FMR). The relation (1) stills holds, however  $N(M)$  is now the number of earthquakes which occur in a given area and time period, with a magnitude  $\geq M$ . The constant  $a$  is subsequently a measure of the level of seismicity, while the constant  $b$  remains the same for both relations.

The GR and FMR relations are consistent with earthquake sources having a constant stress drop and thus being self-similar. There is a tendency for the slope of the FMR and GR to decrease for smaller magnitude earthquakes. This effect is described as "roll-off" of the FMR and GR. It was assumed that many low-magnitude earthquakes are missed because fewer stations detect and record them [12]. However, some modern models of earthquake dynamics have roll-off as a natural consequence of the model without the need for the feature to be inserted arbitrarily [14,15]. In addition, if a system is finite in size this may impose a maximum possible magnitude. If such a maximum possible magnitude exists, the self-similarity will also break-down for the larger magnitude earthquakes. In order to account for both these phenomena, a modification of the GR was derived, which accounts for both a minimum ( $M_{min}$ ) and maximum ( $M_{max}$ ) magnitude.

The modified GR is often called the *Bounded Gutenberg-Richter relationship* (BGR) [16]:

$$N(M) = e^{\alpha - \beta M_{min}} \frac{e^{-\beta(M - M_{min})} - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})}}{1 - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})}} \quad (2)$$

where  $\alpha = a \ln(10)$  and  $\beta = b \ln(10)$ . As for the GR, the BGR is valid for both the number of earthquakes with magnitudes equal to or higher than  $M$ , as for the frequency of earthquakes which occur in a given area and time period, with a magnitude  $\geq M$ .

The main assumption in the derivation of the above relations is a constant level of seismicity through time. If the level of seismicity would change over time, the  $a$ -value would no longer be a constant but a function of time. The FMR is sensitive to non-stationarity since frequencies computed over a long time period during which the level of seismicity changes will deviate significantly from frequencies during smaller time periods. For instance, if seismicity rates are decreasing during a 10 year-period, the frequency in the first few years will be significantly higher than for the last few years, whereas the FMR for the complete period will give the average frequency.

This will cause a deviation in the  $a$ -value. The GR and BGR can be normalised by the total number of earthquakes in the given area during any time period:

$$N(M) = N_{tot} 10^{-bM} \quad (3)$$

where  $N_{tot} = 10^a$ , the total number of earthquakes. The normalisation removes the time dependent information and different GR curves and their  $b$ -values can be more easily compared. For a given  $b$ -value the probability for the occurrence of an earthquake with a particular magnitude will depend only on the total number of earthquakes in a period.

## 4.2 Implications for Groningen

As shown in the previous chapter, the induced seismicity of Groningen is non-stationary with time: no detected seismicity ( $M \geq 2.5$ ) prior to 1991,  $M \geq 3.0$  occurring since 2003 with approximately annual frequency, increasing annual seismicity since 2003 ( $M \geq 1.5$ ) and an increasing energy release since 2003. KNMI [17] has independently investigated the influence of the non-stationarity on the parameters of the BFMR. The calculation of a- and b-values were carried out using a maximum likelihood method. For the Groningen data in the time period 1991-2003, the best result is  $b = 1.08 \pm 0.25$ ,  $a = 2.33 \pm 0.37$  and  $M_{\max} = 3.1$ . For the period 2003-2012 the curve is less well behaved, but contains 3 times more data, and gives a best fit, using the same method, of  $b = 1.09 \pm 0.17$ ,  $a = 2.82 \pm 0.25$  at  $M_{\max} = 3.9$ . The fit is best for the lower magnitude range and worse for the higher magnitudes (Figure 6). KNMI concludes that the b-value for both datasets is equal within the error bounds and that the a-value, the seismicity rate, increased from 2.33 to 2.82. In addition, the maximum magnitude has increased from 3.1 to 3.9.

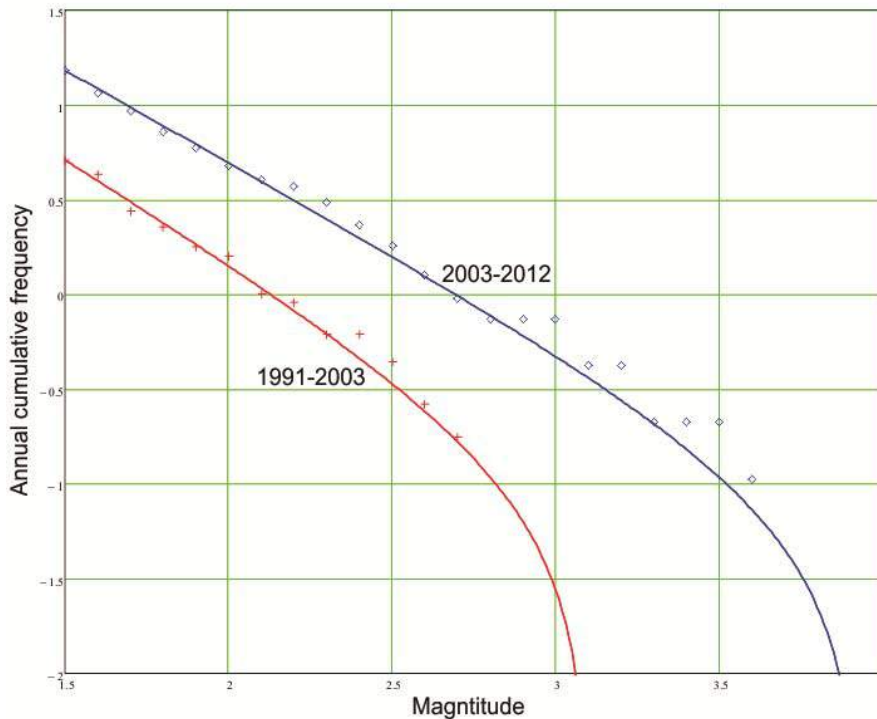


Figure 6: Annual cumulative frequency for two time periods (1991-2003 and 2003-2012). Seismicity rate (GR a- values) and Maximum possible magnitudes differ, but the b-values are equal within their error bounds.

## 4.3 Monte Carlo derivation of BGR parameters

In order to derive all possible combinations of the parameters a, b and  $M_{\max}$  honouring the seismicity data of Groningen within a 1-sigma uncertainty, a Monte Carlo simulation was performed. A total of 100.000 realisations were generated by randomly extracting values of a, b and  $M_{\max}$  from normal distributions for each. The experiment was done twice (both 100.000 realisations) initially for a large parameter range and subsequently for a smaller parameter range. The normal distribution of  $M_{\max}$  was limited on the low side by the maximum magnitude observed, since it is not physically feasible for an earthquake to occur within a given area which has a magnitude above the maximum possible magnitude feasible. For completeness, the analysis was done for 1) the BFMR for the full period 1996-2012, 2) the BFMR for the period 2003-2012, and 3) the normalized BGR for the full period 1996-2012.

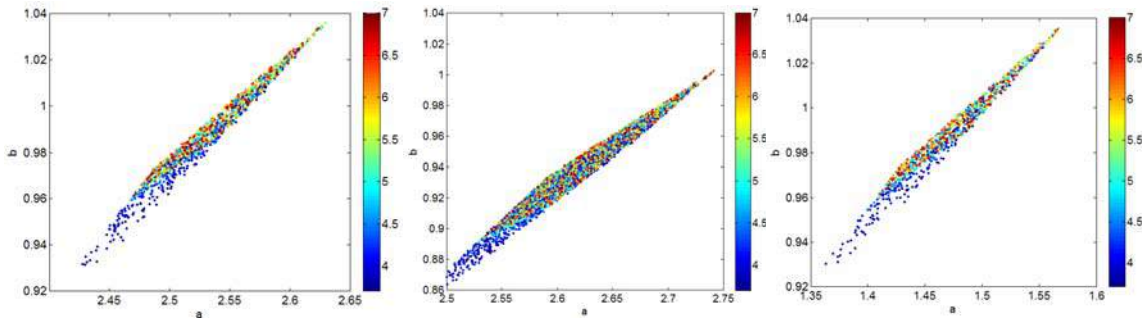


Figure 7: Scatterplots showing all realisations that comply with the data within a 1-sigma uncertainty. The color indicates the  $M_{\max}$  of the realisation. The left figure shows the results of analysis 1 (BFMR, full period), the middle for analysis 2 (BFMR, 2003-2012), and the right for analysis 3 (normalized BGR, full period). The mean values are: analysis 1)  $a=2.53\pm 0.04$ ,  $b=0.98\pm 0.02$ , and  $M_{\max}=5.28\pm 0.99$ ; analysis 2)  $a=2.61\pm 0.05$ ,  $b=0.93\pm 0.03$ , and  $M_{\max}=5.29\pm 0.98$ ; analysis 3)  $a=1.47\pm 0.04$ ,  $b=0.99\pm 0.02$ , and  $M_{\max}=5.29\pm 1.0$ .

All realizations that comply with the data within 1-sigma Poisson distribution uncertainty were accepted as a possible parameter combinations of the BFMR or BGR models. These realizations are shown in Figure 7. The subsequent probability distributions are shown in Figure 8. These show that the seismicity data of all three analysis are non-discriminative for the maximum possible magnitude.

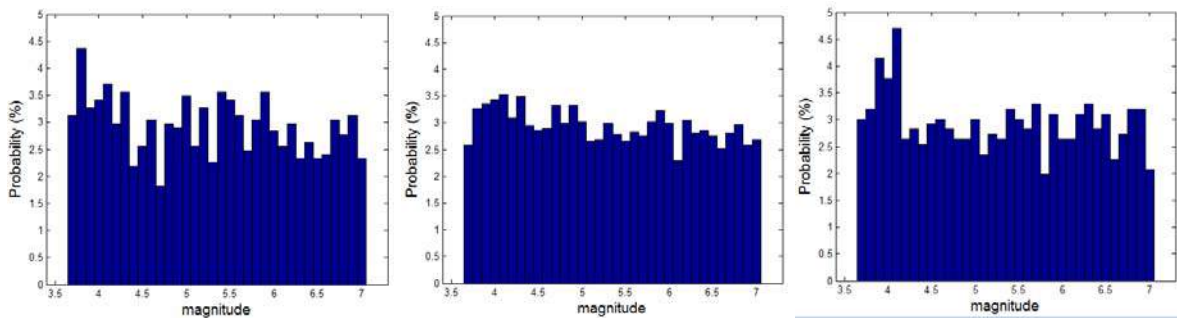


Figure 8: Comparison of the estimation of the maximum possible magnitude for analysis 1 (left), analysis 2 (middle), and analysis 3 (right). The slight irregularity of the probability distribution is caused by under-sampling of the full model space (despite the 100.000 realisations). The irregularity becomes less with increasing amount of realisations.

In order to show that the method applied produces very similar results as the maximum likelihood method followed by KNMI [1], the analysis has also been performed on a dataset comprising all induced seismicity in the Netherlands between 1986 and 2010. The results are shown in Figure 9. Though the probabilities for the maximum possible magnitude between 3.8 and 4.5 are somewhat larger than found by the KNMI, the result leads to a very similar interpretation. The larger probabilities are partly caused by the method used and particularly by the fact that no maximum possible magnitudes below 3.6 are accepted, since already several magnitude 3.5 earthquakes have been observed in the time period.

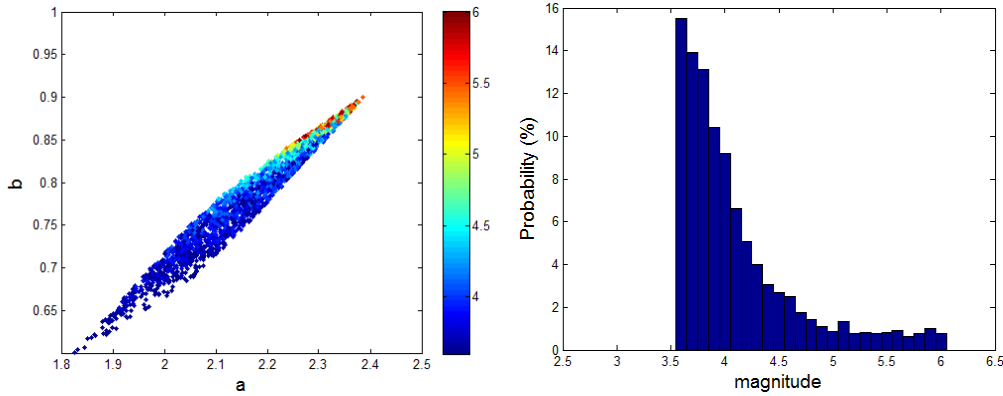


Figure 9: Scatterplot showing all a-, b- and  $M_{max}$  values feasible for all induced earthquakes in the Netherlands between 1986 and 2010 (left) and the estimation of the maximum possible magnitude (right).

The fact that from the dataset of all induced earthquakes an indication for a maximum possible magnitude can be drawn, while the Groningen induced seismicity does not indicate any maximum possible magnitude implies that deriving conclusions for individual fields on the basis of an analysis of induced seismicity from multiple fields is problematic. However, due to data scarcity the precision of the analysis of the Groningen data only was previously too low to draw a conclusion, though the accuracy improved. With the increased datasets for Groningen only, the precision is now such that the improved accuracy no longer goes at the expense of the precision. However, for other fields in the Netherlands, this intrinsic trade-off is still valid, hence conclusions drawn for these fields based on the general all induced seismicity analysis should be treated with care.

#### 4.4 Discussion

The Monte Carlo analysis shows that the b-value of the Gutenberg-Richter relation for all analysis is approximately -1 and confirms a stationary magnitude distribution. This means that earthquakes with a magnitude equal to or above 2.5 are approximately ten times less probable than earthquakes with a magnitude equal to or above 1.5, independent of the total number of earthquakes in a given period (e.g. in a given year)<sup>2</sup>. Earthquakes with a magnitude equal to or above 3.5 are again approximately ten times less probable. As the data is non-discriminative for the maximum possible magnitude, this behaviour may continue for higher magnitude earthquakes that have not yet taken place in Groningen. Hence, assuming no maximum possible magnitude and a probability for a magnitude 1.5 earthquake of 100%, the probability for a magnitude 2.5 earthquake would be 10%, the probability for a magnitude 3.5 1%, the probability for a magnitude 4.0 0.3%, and the probability for a magnitude 4.5 0.1% or 10 in 100, 1 in 100, 3 in 1000 and 1 in 1000, respectively. Imposing a maximum possible magnitude reduces the probability for the higher magnitude earthquakes slightly. E.g. imposing a  $M_{max}$  of 5.0, reduces the probabilities for a single earthquake of magnitudes 3.5, 4.0 and 4.5 to 0.96%, 0.28% and 0.07%, respectively.

Based on the data from all fields in the Netherlands for the full period since 1996, a maximum probable magnitude of 3.9 was calculated. The fact that from the dataset of all induced earthquakes an indication for a maximum possible magnitude can be drawn, while the Groningen induced seismicity is non-discriminative for a maximum possible magnitude implies that deriving conclusions for individual fields on the basis of an analysis of the combined seismicity from a number of fields can be problematic.

<sup>2</sup> Hence, for every 10 tremors with a magnitude equal to or above 1.5 there is on average one tremor with a magnitude equal to or above 2.5.

#### 4.5 Relation between production and seismicity

Figure 10 shows the production and seismicity since 1996. The production shows a clear annual cycle of low production in summer and increased production in winter. In addition, the increase in annual seismicity is clearly visible, with higher magnitude earthquakes occurring later in time (as of 2003). Of particular interest is the observation that higher magnitude earthquakes seem to occur 6-9 months after the peak winter production period.

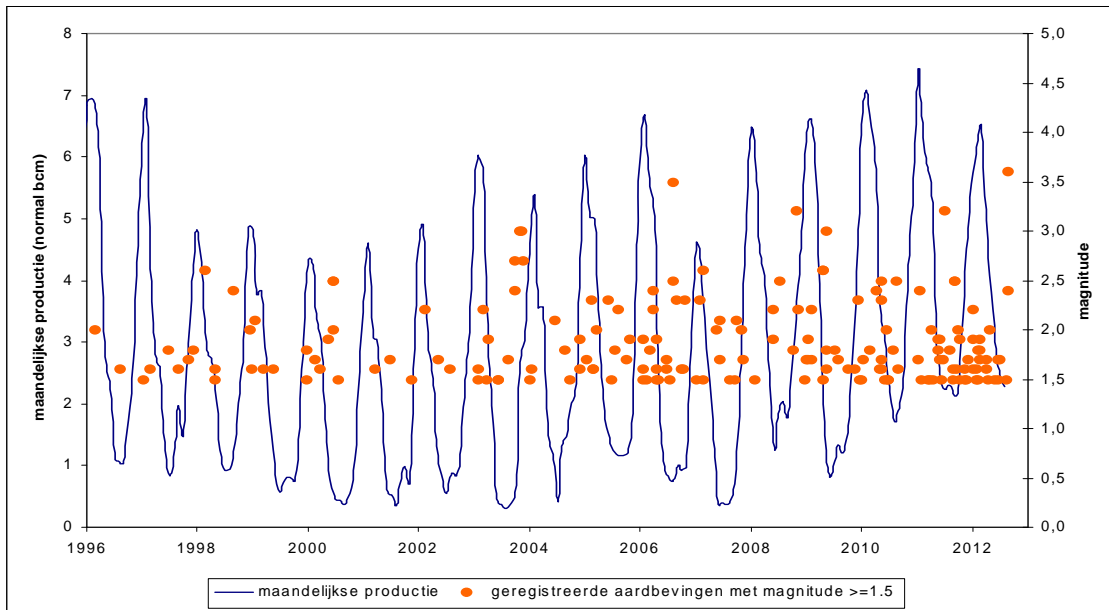


Figure 10: The monthly production since 1996 and the detected seismicity versus time. A clear summer/winter cycle can be seen in the production, as well as an increase in annual seismicity. Of particular interest is the observation that higher magnitude earthquakes seem to occur with a delay of 6-9 months following a winter peak production period.

In order to determine a possible relation between production and seismicity, Figure 11 shows both the annual production (in normal BCM) and the annual number of earthquakes of magnitudes 1.5 and higher. The annual production rates have been decreasing between 1996 and 2001. From 2001 the annual production shows an increasing trend, reaching 50 normal BCM in 2010, with only a relatively low production of 23 normal BCM over the winter of 2006/2007. The annual number of earthquakes with  $M \geq 1.5$  is reasonably steady up to 2002. From 2003 onwards the annual number of earthquakes with  $M \geq 1.5$  is also increasing. Note that the low production over 1-7-2006/1-7-2007 was followed by a low annual number of earthquakes in the year 1-7-2007/1-7-2008.

An attempt has been made to find a conceptual model and an equation relating the annual number of earthquakes with magnitude equal to or above 1.5 (the "seismicity") to production history. From a physics point of view it is hypothesised that the total amount of (differential) compaction due to cumulative production and production rate plays a key role. The model and equation should corroborate the historically observed seismicity within the intrinsic statistical uncertainty:

- no seismicity prior to 1986
- more or less constant seismicity at 3 – 5 earthquakes/year between 1993 and 2003
- increasing seismicity for the years thereafter



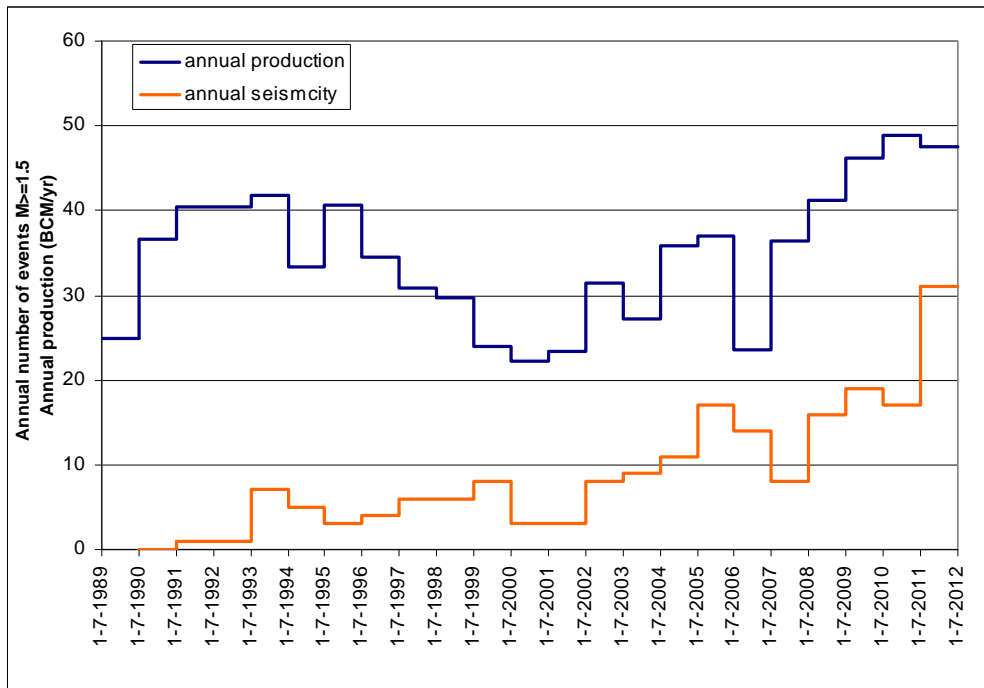


Figure 11: Both the annual production and the annual number of earthquakes (periods ranging July-July) with magnitude of 1.5 or higher are shown against time.

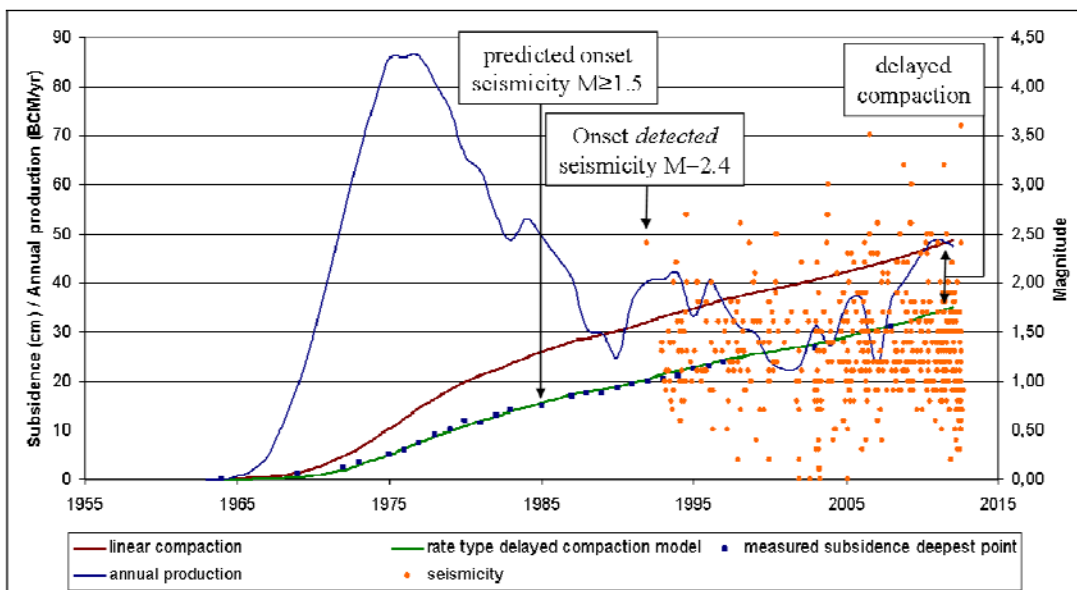


Figure 12: Illustration of the effect of the rate-type compaction model on the subsidence and its implications for the seismicity. The rate-type compaction model introduces an initial delay in the compaction in response to the pressure depletion. This leads to less subsidence than predicted on the basis of a linear compaction model, the so called delayed compaction. The subsidence thus predicted agrees well with the observed subsidence at the deepest point of the Groningen subsidence bowl. After a so called “transition zone” the amount of compaction in response to the additional pressure depletion equals the linear compaction response, hence the two subsidence lines become close to parallel. The onset of seismicity of magnitudes 1.5 and higher is estimated at the end of the transition zone, which equals the total production in 1984 with a 1 year delay, hence as off 1985.

This has led to a model and a preliminary version of an equation in which the annual number of seismic earthquakes is linked to the observed non-linear compaction behaviour of the Groningen reservoir rock [2,3]. To do so, use is made of a rate type compaction model formalism as described in references [4,5,6,7]. An alternative NAM model describing the non-linear Groningen

compaction/subsidence behaviour in terms of a characteristic response time [3] is likely to predict similar behaviour. Increasing depletion and changes in depletion rate (caused by changes in production rate) in both models lead to a delayed (strain) response of the reservoir rock (Figure 12). Next the assumption is made that the seismicity is proportional to the amount of delayed (inelastic) strain. On the basis of the rate type compaction model formalism this then yields the following equation:

$$N_j (M \geq 1.5) = C \times (Q_{cum_{j-1}} - Q_{cum_{ref}}) \times [ (Q_{dot_{j-1}}/Q_{dot_{ref}})^b - 1 ] \quad (4)$$

with

C	proportionality constant (normal BCM <sup>-1</sup> )
N <sub>j</sub> (M ≥ 1.5)	annual number of earthquakes with M ≥ 1.5 in year j
Q <sub>cum<sub>j-1</sub></sub>	cumulative production in year j-1 (July to July) (normal BCM)
Q <sub>cum<sub>ref</sub></sub>	cumulative production (normal BCM) at the start of seismiciteit
Q <sub>dot<sub>j-1</sub></sub>	production rate in year j-1 (July to July) (normal BCM/year)
Q <sub>dot<sub>ref</sub></sub>	production rate in (normal BCM/year) below which no earthquakes with M ≥ 1.5 occur
b	rate sensitivity constant (0.015 for Rotliegend sandstone [4])

Fitting equation (4) by adjusting Q<sub>dot<sub>ref</sub></sub> suggests that a production rate of 12 normal BCM/year will result in 0 -1 earthquakes/year with a magnitude equal to or above magnitude 1.5. The first earthquake observed within the Groningen field was in December 1991 at a reservoir depletion of 145 bar. The earthquake had a local magnitude of 2.4 (Figure 12). At the time of the event, the seismic network was very sparse and its detection limit was magnitude 2.5 and higher. At later stages during the Groningen seismicity history, earthquakes of local magnitude 1.5 have occurred at depletions as low as approximately 122 bar (Figure 13). This threshold corresponds to the end of the transition zone predicted by the rate-type compaction model. In addition, this depletion threshold also agrees reasonably with the findings of [8], where a depletion threshold of 112 bar was found for all gas depletion induced seismicity in the Netherlands. It is therefore reasonable to assume that earthquakes with magnitudes of 1.5-2.5 have been occurring prior to the first earthquake detected and that the depletion threshold equals this 122 bar. Hence, Q<sub>cum<sub>ref</sub></sub> for earthquakes of magnitude 1.5 or higher in the Groningen field corresponds to the cumulative production at 122 bar depletion (~1000 BCM; Figure 12). The 1-year delay between production and seismicity was derived from a statistical cross-correlation analysis on the data in Figure 11. The delay could be related to the time it takes a pressure drop to travel from the production clusters to the central area of the Groningen field where many of the earthquakes occur. The proportionality constant C plays a similar role as the seismogenic index in [9]. For the Groningen field C turns out to be approximately equal to one. The explanation for this is probably that Q<sub>dot<sub>ref</sub></sub> is used to calibrate equation (4) to the observed seismicity rates. Hence, equation (4) effectively contains only 1 free adjustable parameter for fitting to the data.

Applying equation (4) to the historical Groningen production gives calculated seismicity rates that correspond to the observed numbers within the intrinsic statistical uncertainty as shown in Figure 14.

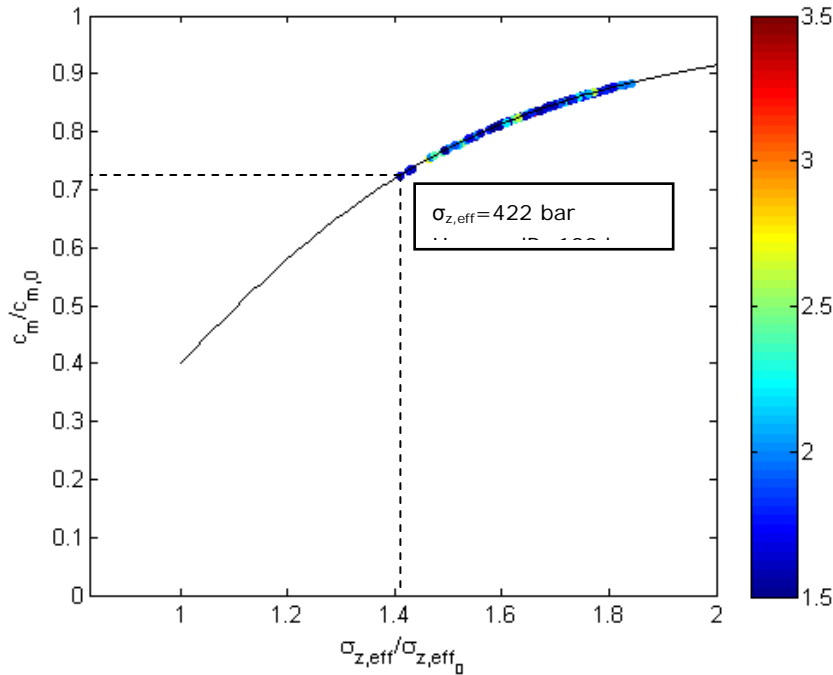


Figure 13: The earthquakes of local magnitude greater or equal to 1.5 commence to occur at effective stresses of 422 bar corresponding to a depletion of 122 bar. This corresponds to the end of the transition zone of the rate type compaction model.

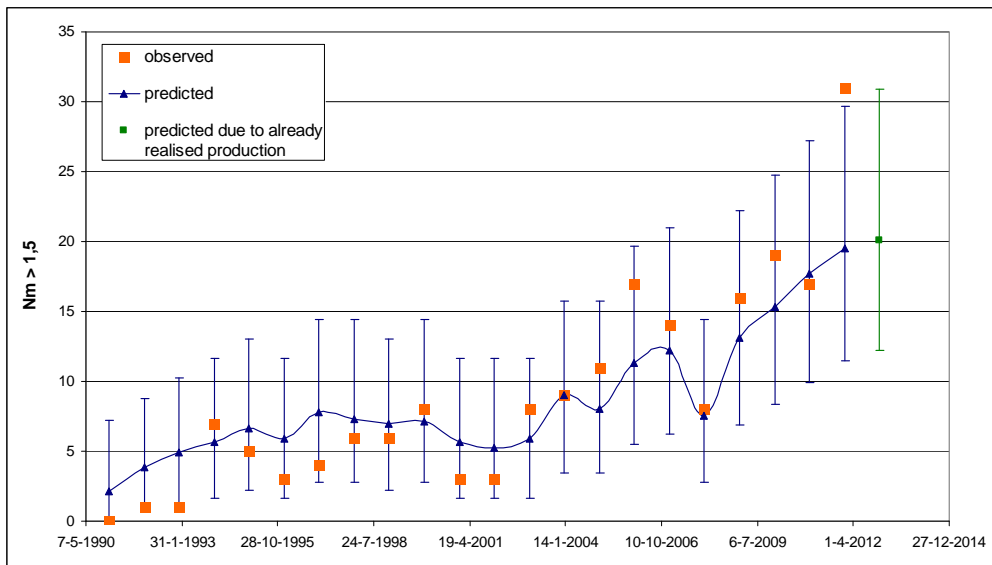


Figure 14: Modelled expectation value for the annual number of earthquakes based on equation (2) for the historic Groningen production. The error bars provide the confidence intervals of the predicted number of earthquakes based on a 95% confidence interval. The historically observed annual number of earthquakes is given in orange. The green point represents the prediction for the period 1-7-2012/1-7-2013 due to the already realised production in the period 1-7-2011/1-7-2012 with its confidence interval corresponding to a 95% confidence level. Note that the number of observed earthquakes is incomplete for the years preceding 1996.

Equation (4) even suggests that for each given magnitude  $M$  there could exist a production rate  $Q_{dot_{ref}}$  below which no earthquakes above that magnitude will occur. The lower  $M$ , the lower the corresponding production rate will be. Hence, there might be a production rate dependent magnitude which acts as a bounding maximum magnitude in the BGR when deriving the probability for an earthquake with a particular magnitude to occur based on the computed expectation number of

annual earthquakes with  $M \geq 1.5$ . Based on the seismicity data, the following speculative relationship between such a bounding maximum magnitude and the production rate is guesstimated:

$$M'_{\max} = (Q_{\text{dot}_{j-1}}/Q_{\text{dot}_{\text{ref}}}) * 1.5 \quad (5)$$

Equation (5) implies that at a rate twice the reference rate, no earthquakes above magnitude 3 will occur. As indicated previously, there have been two intervals in the production history during which the annual production was lower than 25 normal BCM/yr while seismicity was occurring: 1-7-1999/1-7-2002, and 1-7-2006/1-7-2007 (see Figure 11). Equation (5) would imply that during the periods with production less than 25 BCM/yr no earthquakes with magnitudes larger than approximately 3.0 could occur. This is consistent with the data as shown in Table 3. Taking into account the one year delay, the observed maximum magnitude in the corresponding seismicity periods are consistently lower than the predicted bounding maximum magnitude. This is despite the fact that on the basis of an unbounded GR and the expectation amount of earthquakes with  $M \geq 1.5$  predicted on the basis of equation (2), a significant expectation value for the probability of earthquakes with magnitudes larger than  $M'_{\max}$  are calculated (up to 90%).

Table 3: Comparison between the bounding maximum magnitude derived from equation (5) and the maximum magnitude detected during 2 periods in which the annual production rate has been less than 25 normal BCM/yr. The observed maximum magnitude is consistently lower than the predicted bounding maximum magnitude despite the fact that on the basis of an unbounded GR and the amount of seismicity with  $M \geq 1.5$  predicted significant expectation values for probabilities of earthquakes with magnitudes larger than  $M'_{\max}$  exist (up to 90%).

period	Annual production (BCM/yr)	$M'_{\max}$ based on equation 3	Maximum magnitude detected in period +1 year delay
1-7-1999/1-7-2002	22.2-24.0	2.7-3.0	2.2
1-7-2006/1-7-2007	23.5	2.9	2.2

In conclusion, the preliminary equations derived in this section suggest that the expectation value for the probability for an earthquake with a particular magnitude to occur is determined by 1) the expectation value for the seismicity rate derived from the predicted expectation number of earthquakes as computed by equation (4), 2) the slope (b-value) of the BGR determining the variation of the number of earthquakes of different magnitudes (for Groningen b equals 1) and 3) a production rate dependent bounding maximum magnitude as guesstimated by equation (5).

A strong word of warning needs to be given here. The work on the relation between seismicity and delayed compaction via cumulative production and production rate is still in progress. In addition, the number of data points is limited resulting in significant intrinsic statistical uncertainties. Equations (4) and in particular equation (5) need to be treated with care when using them to predict future seismicity. Given its speculative nature equation (5) has not been used for the further analysis presented in this report.

## 5 Consequences for future earthquakes in Groningen

The expectation probability for an earthquake of a particular magnitude to occur e.g. in the next year depends on the derived b-value of the BGR relation, the assumed value for the maximum possible magnitude and the expectation value of next year's number of earthquakes with magnitude 1.5 or higher. Predictions for the expectation value of the number of earthquakes of  $M \geq 1.5$  are derived from equation (4). The assumption is that future seismicity follows a BGR, also for higher magnitudes but with an as yet unknown value of  $M_{\max}$ . Given the recent production rates and the production level expected for the coming years, equation (5) is not relevant in this analysis (a production rate of 50 normal BCM per year would lead to a  $M'_{\max}$  of 6.3).

In a previous section, it was demonstrated that no maximum possible magnitude can be derived on the basis of the Groningen seismicity data. This does not imply that such a maximum value does not exist. In fact, it is highly likely that there is such a maximum, despite the fact that it cannot be derived from the Groningen earthquake data. Perhaps that non-seismic methods can be applied to obtain estimates for the maximum possible magnitude. This could include estimates based on the maximum percentage of the stored elastic energy that can be released in a single earthquake. Or an upper limit based on an analysis of the distribution and size of faults present in the field. At the moment such results are not available for Groningen. According to KNMI [17], a recent analysis of all known gas production induced earthquakes globally, shows that no *induced* seismic earthquakes of magnitudes larger than 5.0 have been reported so far. Based on the b value of 1 derived from the Groningen dataset, the expectation value for the probability of earthquakes at such a magnitude level in Groningen is low. This is because the expectation value of the total number of earthquakes with  $M \geq 1.5$  expected to occur during the total Groningen field life is estimated to be well below a thousand.

### 5.1 Expectation probability for larger magnitude earthquakes due to already realised production

Figure 15 shows the relation between the expectation value for the probability and maximum possible magnitude for an earthquake of magnitude of 3.9 or higher and 4.5 or higher, respectively. The calculation is based on the expectation value for the number of earthquakes as predicted by equation (4) due to the already realised production rate between July 2011 and July 2012 and the cumulative production in July 2012, which is 20 earthquakes of magnitude 1.5 or higher (green dot in Figure 14).

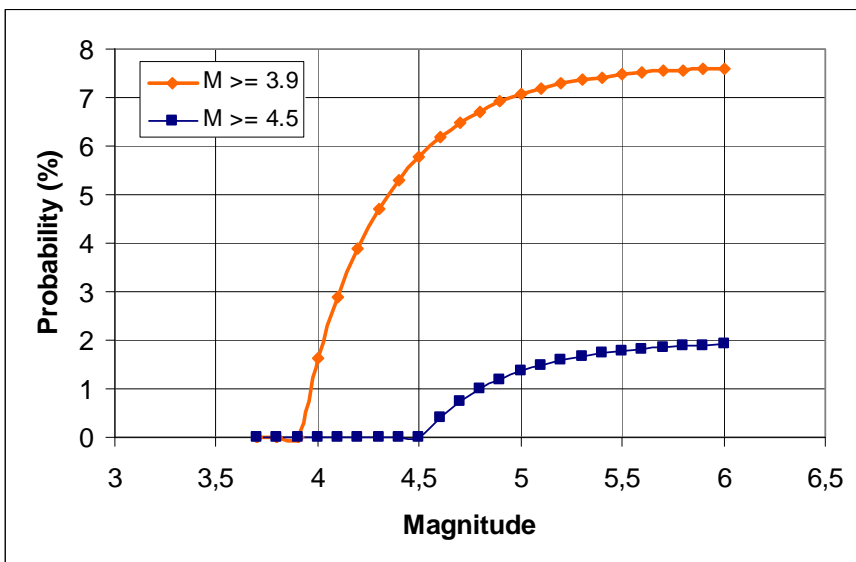


Figure 15: Expectation values for the probability of an earthquake of magnitude 3.9 or higher and 4.5 or higher, respectively, occurring in 2013 as a function of imposed maximum possible magnitude. The calculation is based on the expectation number of earthquakes predicted by equation (2) due to the already realised production rate between July 2011 and July 2012 and the cumulative production in July 2012, which results in an expectation value of 20 earthquakes of magnitude 1.5 or higher.

The expectation value for the probability for an earthquake with magnitude 3.9 or higher increases is 0 for imposed maximum possible magnitudes of 3.7, 3.8 and 3.9, which corresponds to the implicit assumption in the double bounded GR that it is not possible for an earthquakes to have a magnitude larger than the maximum possible magnitude. It increases up to a worst case expectation value for the probability (at  $M_{max} = 6.0$ ) of 7.6% that one of the next 20 earthquakes will have a magnitude  $>3.9$ . For an imposed  $M_{max}$  of 5.0 the expectation value for the probability for an earthquake with a magnitude equal to or above 3.9 in the next 20 seismic earthquakes in Groningen becomes 7 % and 5.8 % for an imposed  $M_{max}$  of 4.5. The expectation value for the probability for an earthquake with a local magnitude of 4.5 or higher ranges from 0 (for  $M_{max} = 3.7-4.5$ ) to almost 2% (at  $M_{max} = 6.0$ ). For an imposed  $M_{max}$  of 5.0 the expectation value for the probability is 1.4%.

## 5.2 Predicted earthquakes in Groningen under different production scenarios

As described in the introduction, the August 2012 earthquake, with a moment magnitude of 3.6, had the largest magnitude so far. The damage caused by this earthquake was extensive compared to previous earthquakes of comparable magnitude, though not of a structural nature. The earthquake raised general concern on the level of acceptability of damage caused by induced earthquakes and led to questions whether earthquakes with even larger magnitudes, possibly causing structural damage to property, could occur in the future. The results of the analysis described in this report show a distinct possibility that larger magnitude earthquakes ( $M \geq 3.9$ ) may occur, with an expectation value for the probability of up to 7.6 % for the next 20 seismic earthquakes. Hence, the question is raised whether or not the occurrence of such earthquakes might be mitigated by reducing production rates.

Even though extensive further research is required to fully comprehend the mechanism and physics of the occurrence of seismic earthquakes, the preliminary results described in this report have been used to derive estimates of the number of earthquakes expected for a number of different production scenarios which may be used to justify precautionary measures (under the precautionary principle) while further research is executed.

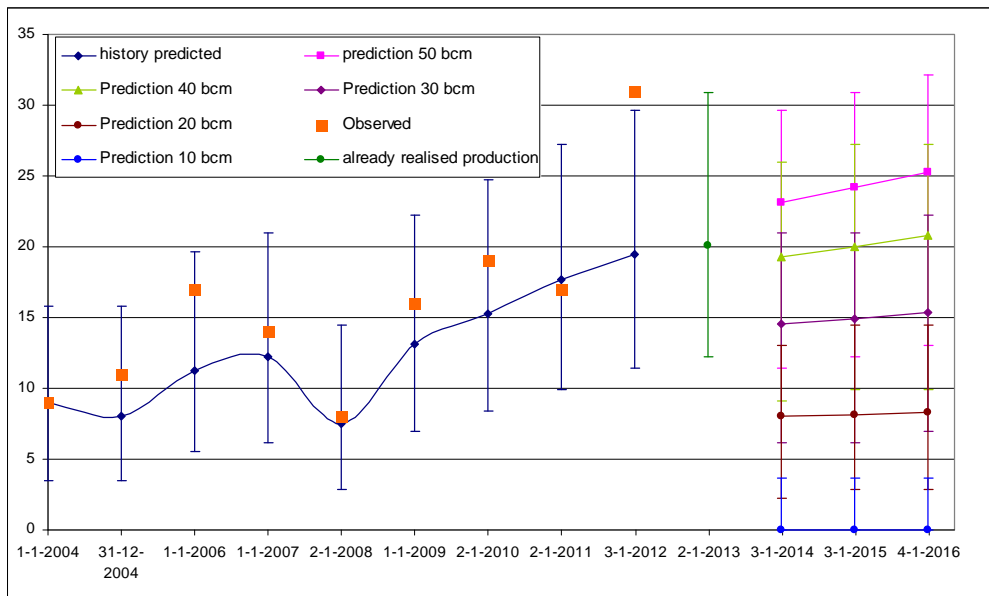


Figure 16: Predicted annual expectation number of earthquakes based on the relation given in equation (2) for both the historic seismicity (dark blue) and five possible production scenario's for the years 1-7-2012/1-7-2013 – 1-7-2014/1-7-2015 giving seismicity for the years 1-7-2013/1-7-2014 – 1-7-2015/1-7-2016. The error bars provide the confidence intervals of the predicted expectation number of earthquakes based on a 95% confidence interval. The historically observed annual number of earthquakes is given in orange.

The expectation number of annual earthquakes predicted by equation (4) for five level production scenario's at different annual production rates is given in Figure 16. All scenario's, except the level production at 10 bcm/yr, show an increase in annual expectation number of earthquakes during the 3 year period modelled. However, both the annual expectation number of earthquakes and its increase with time are distinctly lower for lower production rates. The scenario with a level production rate of 10 normal BCM shows no annual expectation number of earthquakes with time, as equation (5) predicts the absence of seismicity of magnitude equal or above 1.5 below a rate of 12 normal BCM/year. However, since the occurrence of seismicity follows a Poisson's distribution, up to 4 earthquakes per year may still occur (within a 95% confidence level interval).

Based on the annual expectation number of earthquakes the expectation value for the probability (%) for an earthquake with a magnitude larger than a particular magnitude M can be computed. Table 4 shows the expectation values for the probability (%) for the five scenario's of an earthquake with a magnitude larger than 4.0, 4.5 and 5.0, respectively, to occur given an imposed maximum possible magnitude of 4.5, 5 and 6, respectively, on the basis of the total expectation number of earthquakes predicted by the scenario's in the Groningen field for the next 4 years (1-7-2012/1-7-2016). In the computation equation (5) has not been incorporated, hence no rate dependent maximum bounding magnitude was imposed<sup>3</sup>. The highest expectation values for the probability are obtained for the highest production scenario. The lower the constant annual production level, the lower the expectation values for the probability for larger magnitude earthquakes.

Table 5 shows the same expectation values for the probability (%) for the year 1-7-2013/1-7-2014. As for the total annual expectation number of earthquakes, the expectation value for the probability for a larger magnitude earthquake to occur next year decreases by a factor of two, after the annual production rate is decreased by a factor of two for a twelve month period including a full winter period. As in Table 4 no rate dependent maximum bounding magnitude was applied

NAM proposes a simple linear relation between cumulative production and expectation value for total number of earthquakes for the period since 2001:

$$N (M \geq 1.5) = 0.32 \times Q_{cum} \quad (3)$$

With some (unspecified) delay between N and  $Q_{cum}$ . This relation under-predicts the recently observed high annual number of earthquakes: 15 earthquakes predicted vs. 24 observed in the period 1-7-2011/1-7-2012. However, the effect of the annual production rate is comparable to that predicted by equation (4). A decrease in the annual production rate by a factor of two decreases the predicted expectation value for the annual number of earthquakes for a twelve month period by a factor of two. Hence, the expectation value for the probability for a higher magnitude earthquake in this time period is also decreased by a factor two.

---

<sup>3</sup> The rate dependent maximum magnitude was not included in the expectation probability calculations since the equation is still speculative and needs further substantiation prior to its use in the expectation probability calculations.

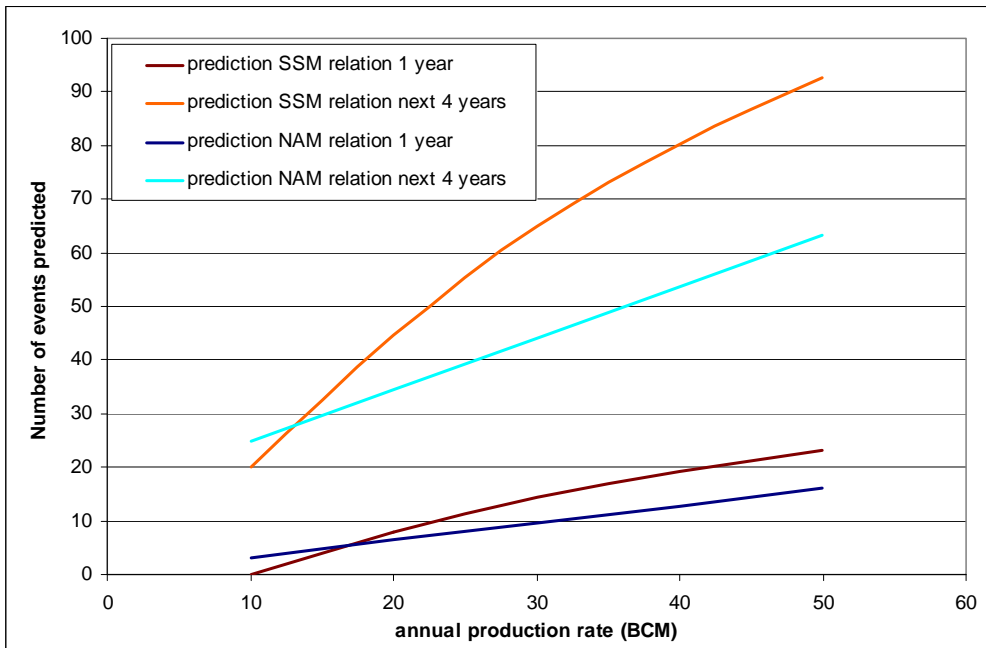


Figure 17: Comparison between the expectation number of earthquakes predicted by the NAM linear correlation and the SSM rate type compaction model based equation.



Table 4: Expectation value for the probability (%) for an earthquake with a magnitude larger than 4.0, 4.5 and 5.0, respectively, to occur given an imposed maximum possible magnitude of 4.5, 5 and 6, respectively, provided the total expectation number of earthquakes ( $N_m(2012-2016)$ ) in the Groningen field for the next 4 years is given by one of the seven production scenario's considered for the Groningen field. The numbers in brackets correspond to the confidence intervals at a 95% confidence level. Earthquakes with magnitudes in excess of the maximum magnitude are not feasible, hence their expectation value for the probability is 0%.

scenario	$N_m$ (2012-2016)	$M_{max} = 4,5$			$M_{max} = 5$			$M_{max} = 6$		
		$P(0,M>4, 2016)$	$P(0,M>4.5, 2016)$	$P(0,M>5, 2016)$	$P(0,M>4, 2016)$	$P(0,M>4.5, 2016)$	$P(0,M>5, 2016)$	$P(0,M>4, 2016)$	$P(0,M>4.5, 2016)$	$P(0,M>5, 2016)$
50 bcm	93 (75-113)	18 (15-22)	0.0	0.0	23 (19-28)	6.1 (5.0-7.4)	0.0	25 (21-30)	8.6 (7.0-10)	2.6 (2.1-3.1)
40 bcm	80 (63-100)	16 (13-19)	0.0	0.0	20 (16-24)	5.3 (4.2-6.6)	0.0	22 (18-24)	7.4 (5.9-8.2)	2.2 (1.7-2.5)
30 bcm	65 (50-83)	13 (10-16)	0.0	0.0	17 (13-21)	4.3 (3.3-5.5)	0.0	18 (14-23)	6.1 (4.7-7.7)	1.8 (1.4-2.3)
20 bcm	45 (32-60)	9.2 (6.7-12)	0.0	0.0	12 (8.7-14)	3.0 (2.1-3.6)	0.0	13 (9.5- 17)	4.3 (3.0-5.6)	1.3 (0.9-1.7)
10 bcm	20 (12-31)	4.2 (2.6-6.5)	0.0	0.0	5.5 (3.4-8.4)	1.4 (0.8-2.1)	0.0	6.0 (3.7-9.2)	1.9 (1.1-2.9)	0.6 (0.3-0.9)

Table 5: Expectation value for the probability (%) for an earthquake with a magnitude larger than 4.0, 4.5 and 5.0, respectively, to occur given an imposed maximum possible magnitude of 4.5, 5 and 6, respectively, provided the expectation number of earthquakes ( $N_m$  (2013-2014)) in the Groningen field in the year 1-7-2013/1-7-2014 is given by one of the seven production scenario's considered for the Groningen field. The numbers in brackets correspond to the confidence intervals at a 95% confidence level. Earthquakes with magnitudes in excess of the maximum magnitude are not feasible, hence their expectation value for the probability is 0%.

scenario	$N_m$ (2013-2014)	$M_{max} = 4,5$			$M_{max} = 5$			$M_{max} = 6$		
		$P(0,M>4, 2014)$	$P(0,M>4.5, 2014)$	$P(0,M>5, 2014)$	$P(0,M>4, 2014)$	$P(0,M>4.5, 2014)$	$P(0,M>5, 2014)$	$P(0,M>4, 2014)$	$P(0,M>4.5, 2014)$	$P(0,M>5, 2014)$
50 bcm	23 (15-35)	4.8 (3.2-7.3)	0.0	0.0	6.3 (4.2-9.5)	1.6 (1.0-2.4)	0.0	6.9 (4.6-10)	2.2 (1.4-3.3)	0.7 (0.4-1.0)
40 bcm	19 (11-30)	4.0 (2.4-6.2)	0.0	0.0	5.2 (3.0-8,1)	1.3 (0.7-2.0)	0.0	5.7 (3.4-8.9)	1.8 (1.0-2.9)	0,5 (0.3-0.9)
30 bcm	14 (8-23)	3.0 (1.7-4.8)	0.0	0.0	3.9 (2.3-6.3)	1.0 (0.5-1.6)	0.0	4.3 (2.4-6.9)	1.3 (0.8-2.2)	0.4 (0.2-0.7)
20 bcm	8 (3-14)	1.7 (0.6-3.0)	0.0	0.0	2.3 (0.9-3.9)	0.5 (0.2-1.0)	0.0	2.4 (0.9-4.3)	0.8 (0.3-1.3)	0.2 (0.1-0.4)
10 bcm	0 (0-4)	0 (0-0.9)	0.0	0.0	0 (0-1.1)	0 (0-0.3)	0.0	0 (0-1.2)	0 (0-0.4)	0 (0-0.1)

## Conclusions

1. In the Groningen field the annual number of gas production induced earthquakes and their released energy are increasing with time. For Groningen this leads to a higher expectation value for the probability for the occurrence of higher magnitude earthquakes.
2. A Monte Carlo analysis shows that it is not possible to determine a value for  $M_{\max}$  on the basis of the Groningen seismicity data other than that its value is above 3.6. This does not imply that an upper bound does not exist.
3.  $M_{\max}$  values above 3.9 cannot be excluded without additional estimates based on non-seismic methods. These are not available for Groningen.
4. As  $M_{\max}$  for Groningen cannot be determined at the moment, the probability for an earthquake with magnitude 3.9 or higher to occur during the next twelve months is poorly defined. The worst case expectation value for the probability imposing an  $M_{\max}$  of 6.0 is approximately 7.6%. For an imposed  $M_{\max}$  of 5.0 this becomes 7 %, 5.8 % for an imposed  $M_{\max}$  of 4.5 and 0 % for an imposed  $M_{\max}$  of 3.9. The expectation value for the probability for an earthquake with magnitude 4.5 or higher during the next 12 months is between 0 and 2%.
5. A preliminary version of an equation has been found that predicts the expectation number of annual earthquakes with a magnitude equal to or above 1.5 - and its variation over time - in terms of cumulative production and production rate. The equation is related to a (rate type) compaction model that can be used to properly describe the observed non-linear compaction behaviour of the Groningen field.
6. On this basis SSM has developed an approach that predicts the observed seismic behaviour of the Groningen field within the intrinsic statistical fluctuations. The b-value derived from the Gutenberg Richter relationship for the Groningen field ( $b = -1$ ) is combined with the above equation and an assumption on the value of the maximum possible magnitude  $M_{\max}$  in Groningen. The same approach can be used to calculate the expectation value for the probability for the occurrence of an earthquake above a given magnitude during a given time period in the future.
7. The expectation value for the probability for a larger magnitude earthquake ( $M > 3.9$ ) might be decreased by approximately a factor of two, by decreasing the annual production rate by a factor of two compared to the current production rate of around 50 normal BCM per year, followed by a gradual decline. Even then a significant expectation value for the probability for a larger magnitude earthquake remains.
8. Based on the derived preliminary version of the relation between the annual expectation number of earthquakes and the production, the production rate would have to be lowered to values around 12 BCM/year in order to achieve minimal risk. It is therefore possible that at this production rate almost no earthquakes with magnitudes  $\geq 1.5$  would occur after a number of years.

## References

- [1] Dost, B., Goutbeek, F., van Eck, T., Kraaijpoel, D., 2012. Monitoring induced seismicity in the North of the Netherlands: status report 2010, KNMI scientific report; WR 2012-03
- [2] NAM, 2010. Bodemdaling door Aardgaswinning, NAM velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, NAM B.V. EP201006302236: 43 pp
- [3] NAM, 2012, Ketelaar, V.B.H., Van der Veen, W. & Doornhof, D., 2011. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 23 jaar gaswinning. In: Publicatie Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, oktober 2011: 9-29
- [4] De Waal, J.A., 1986. On the rate type compaction behaviour of sandstone reservoir rock. PhD dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands: 166 pp.
- [5] Bjerrum, L., 1967. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to the settlements of buildings. *Geotechnique* 17: 81-118
- [6] Kolymbas, D., 1977. A rate-dependent constitutive equation for soils. *Mechanical Research Communications*, 4: 367-372
- [7] Den Haan, E.J., 1994. Vertical compression of soils. PhD dissertation, Delft University Press: 96 pp.
- [8] Van Thienen-Visser, K., Nepveu, M. en Hettelaar, J., 2012. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland, TNO-rapport 2012 R10198,
- [9] Shapiro, A.A., 2010. Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations, *The Leading Edge*, 29(3):304
- [10] Gutenberg, R., and C.F. Richter, 1944. Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185-188
- [11] Gutenberg, B and C.F. Richter, 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd ed. (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1954).
- [12] Abercrombie, R.E., and J.N. Brune, 1994. Evidence for a constant b-value above magnitude 0 in the southern San Andreas, San Jacinto, and San Miguel fault zones and at the Long Valley caldera, California, *Geophys. Res. Lett.*, 21 (15), 1647-1650
- [14] Bhattacharya, P., Chakrabarti, B.K., Kamal, and Samanta, D., 2009. "Fractal models of earthquake dynamics", Heinz Georg Schuster (ed), *Reviews of Nonlinear Dynamics and Complexity*, pp. 107–150 **V.2**, Wiley-VCH, ISBN 3-527-40850-9
- [15] Pelletier, J.D., 2000. "Spring-block models of seismicity: review and analysis of a structurally heterogeneous model coupled to the viscous asthenosphere" *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes*, American Geophysical Union, ISBN 0-87590-978-7
- [16] Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice-Hall
- [17] Dost, B. en Kraaijpoel, D., 2013. The august 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen), KNMI scientific report.
- [18] Presentation: "Induced Seismicity", NAM, presented 18th December 2012, shared 21st December 2012.

## Appendix A: October 8th SSM technical assessment

Summary of technical assessment as presented by SSM on the 8th of October to KNMI, TNO-AGE and the NAM

### SSM observations:

1. Gas production induced tremors in the Groningen field have been observed since the early nineties. Since 1996 completeness of the recording network has been achieved for magnitudes above 1.5 (be it with limited redundancy).
2. No tremors have been observed in the Groningen gas field prior to 1991, at that time the average reservoir pressure had dropped by some 150 bar.
3. Lower magnitude tremors (e.g. below 2.0) might well have occurred prior to 1991.
4. On the 16th of august 2012, the highest magnitude Groningen gas production induced tremor to date took place near Huizinge. It had a moment magnitude of 3.6.
5. Pressure differences within the field were significant during the early production period, subsequently they were strongly reduced, recently they are increasing again.
6. Pressure differences in the field are calculated using subsurface models and production data. Experience (e.g. 4D seismic elsewhere) demonstrates that uncertainties are usually way larger then initially considered possible (we start to believe our own models beyond reason). In particular the effects of faults not seen on seismic, fault transmissibility, barriers, baffles and thief zones can be large.
7. The Frequency Magnitude analysis applied by KNMI assumes an underlying stationary process. This is usually valid for tectonically driven seismicity but questionable for gas production induced seismicity.
8. Differential compaction over faults with unfavourable geometries is the likely engine behind the induced seismicity in Groningen. The induced stresses build up as a result of differential compaction and are locally (partially?) released when tremors occur.
9. As cumulative production from the Groningen field increases, the strength of the engine behind the induced seismicity increases in strength over time until a steady state situation is realised with more or less equal amounts of build-up and release of differential stresses.
10. It is not clear that such a pseudo steady state has been arrived at, the tremor data suggests this in not yet the case.
11. There has been a steady non-linear increase in the annual number of tremors since 1991. This is true for the total number of tremors and also for the different magnitude classes.
12. There has been an increase in the released seismic energy over time with a break around 2003 and possibly another break around 2012.
13. Production rates in Groningen have varied considerably over time.
14. So far these non-stationary aspects have not been taken into account in the seismic risk analysis. This could have a significant effect and needs to be sorted out. An example of not accounting for such effects is seen when cumulative annual frequencies are derived for two different time windows during the Groningen field life.
15. Not accounting for non-stationary effects could explain the observed curvature at higher magnitudes in the Frequency-Magnitude plot for the full Groningen production history. The curvature would then not be related to a maximum possible tremor magnitude.
16. There has been a marked increase in the frequency of tremors with a magnitude above 3.0. Before 2003 tremors of such magnitude were not observed. Since 2003 they have occurred almost annually.
17. There are clear indications that variations in the production rate have an large influence on the number of tremors observed in the following year. The data suggest that there is a delay of between one and two years between a change in production rate and its impact on the tremor frequency. In particular acceleration and deceleration seem to play a significant role.
18. Based on the data available to date it cannot be excluded that tremors with magnitudes higher than the previously estimated maximum of 3.7/3.9 can occur in the future.

**What needs to be solved / can possibly be solved / cannot be solved:**

1. Full deterministic prediction of the induced seismicity based on modelling or monitoring is not considered possible. Any predictions will remain of a statistical nature, at best providing the probability/frequency of tremors of a given magnitude as a function of time.
2. It might be possible to incorporate the effects of increasing seismicity over time as cumulative production increases. Possibly a model can be developed to calculate the impact of production, production rate, pressure differences etc. on these probabilities. Potentially this could include the effects on the likely maximum magnitude to be expected during the field life and the period shortly thereafter.
3. Will the frequency of tremors continue to increase as production of the Groningen field continues? This seems likely given the observations. It also suggests similar increases for the different magnitude classes.
4. What is the maximum magnitude that could occur in the future? A clear answer cannot be provided at the moment. Such a maximum could be linked to the maximum energy available if the tremors are fully induced without impact of local tectonics. The magnitude can also be limited by the maximum size of the largest fault present in the ensemble of affected faults. The maximum ride slip could be different for compaction-induced tremors compared to tectonically driven events. The tremor data cannot be used to exclude the possibility of future tremors with magnitudes above 3.7 / 3.9.
5. Is the apparent effect of production rate changes on seismic frequencies not of a statistical nature? If not, can it be quantified and captured in a model?

**SSM proposed starting point conceptual model:**

Based on the data available and preliminary analysis carried out on this data SSM propose a starting point conceptual model for the induced seismicity in Groningen. It goes as follows:

1. Differential compaction over faults with unfavourable geometries provides the engine for the induced seismicity.
2. The (traditional) Gutenberg Richter relationship/model remains valid throughout field life to describe the relative probability of tremors as a function of magnitude at any given moment in time (for the relative probabilities at each particular moment in time). Background is the fact that the number of faults and their (assumed log-normal Gaussian) distribution does not change over the production time period. And that all faults simultaneously feel the effects of the increasing production -> increasing pressure drop -> increasing (differential) compaction.
3. No tremors are initially observed, simply because there is not enough differential compaction during the early production period to generate observable events. This effect is further enhanced by the non-linear compaction behaviour of the Groningen reservoir, further reducing compaction during early field life (De Waal et al, 2012). Given the very low number of low magnitude tremors at this stage (if any), the probability for higher magnitude events at the time was virtually zero (and none were actually observed).
4. The increasing strength of the engine over time implies that faults that slip at later stages occurs when more differential compaction has accumulated. This is enhanced by the time dependent compaction behaviour resulting in larger amounts of (differential) compaction per unit of production during later field life. This explains why magnitudes increase over time. Or actually why the total number of annual tremors increases and therefore via Gutenberg Richter also the absolute probability for higher magnitude events.
5. In that respect the observation that boundary faults have not yet generated observable tremors could be a concern. Alternatively it could be that induced stresses from differential compaction can relax non-seismically at boundary faults e.g. due to the presence of salt.
6. The total number of tremors in a given year (the seismicity level) varies over time. This is firstly caused by the increasing differential compaction over unfavourable fault geometries as cumulative production and hence compaction increase over time. Using the Gutenberg Richter model to calculate/predict annual frequencies is not valid if not correcting for this effect.
7. Secondly, changes in production rate during the field production history will have an effect, be it solely from the speed with which the "movie" is played. E.g. when increasing the production rate threefold, it can be expected that the annual number of tremors will also triple. This will not increase the total number of tremors of a given magnitude over the

total production period as the increased production rate will shorten the field production period proportionally. But not accounting for this “movie frame-rate” effect will cause significant differences between observed frequencies during high production rate periods and predicted frequencies, when these predictions are based on data from a preceding low production rate period.

8. Thirdly, the available data suggests a significant effect of changes in the production rate above and beyond the “frame-rate” effect. The physical background could be that differential stresses building up due to increasing differential compaction might be able to relax micro-seismically or non-seismically when build up rates are slow and hence more time for relaxation is available. At higher production rates there would not be enough time for the non-seismic relaxation mechanisms to reduce the stresses significantly, causing the tremors to “hang” for longer periods and resulting in higher magnitude event when they eventually go. Alternatively or in addition, higher deformation rates results in increased friction angles over the fault zones, enhancing the process (e.g. Dieterich 1987, Runia 1983).

**Summarising:**

1. Differential (time dependent) compaction over unfavourable fault geometries is the engine driving the seismicity
2. Gutenberg Richter remains valid to describe relative frequencies for tremors with different magnitudes at a particular given moment in time
3. The total number of events per unit of time or per unit of production increases with increasing total cumulative production
4. The number of events can increase or decrease at a given time due to the “frame-rate” effect and a relaxation-mechanism related loading rate effect
5. In particular accelerations and decelerations seem to correlate very well with changes in seismicity
6. There is a delay between changes in production rate and the impact on the tremor frequencies
7. At the total number of tremors increases with time, so does the probability for larger magnitude events and hence they start to occur
8. All these effects need to be taken into account when predicting tremor frequencies
9. Whether or not there is a maximum magnitude for the induced tremors remains unresolved at this stage

**Proposed way forward:**

1. Investigate if there are measures that can already be taken now to prevent or reduce the risk for and the magnitude of induced seismicity in Groningen.
2. Realise that short term measures could also worsen things as a result of incomplete understanding. An example is where existing pressure differences within the field could in some cases have a stabilising effect. On the other hand unjustified postponement of actions also poses risks.
3. Using available data and knowledge investigate short term (3 months?) what can be concluded on the induced seismic behaviour of Groningen. Investigate the potential dependence on production, production rate, production rate changes, reservoir pressure, reservoir pressure differences, stress (changes), (time-dependent) reservoir compaction, geometry, time etc.
4. Test the validity of the proposed SSM conceptual model against these results.
5. From the above derive any conclusions that can be made with respect to the induced seismicity to be expected in the future (frequencies and magnitudes).
6. Extend the modelling work to assess the impact of different types of tremors, of different duration and at different magnitude levels on different types of buildings.
7. Repeat the assessment of potential measures once the results of 2-4 are available.
8. Increase monitoring of the Groningen seismicity both near surface and at reservoir level.

9. Investigate possible links between the time dependence in the Groningen subsidence behaviour and the observed thresholds in seismicity. In this context look at the potential merits of using rate and state type constitutive models to describe the compaction and seismic behaviour of the Groningen reservoir.
10. Investigate the feasibility of the proposed SSM conceptual model, improve or modify the model over time as appropriate.

**We should start thinking about:**

1. What could be done now to reduce the tremor and the risk they create?
2. How must the present seismic hazard risk analysis for Groningen be updated to account for the effects of increasing production and production rate (frame-rate effect)?
3. What about the effect of changes in loading rate observed above and on top of that?
4. What work needs to be done to advise on the December Winningsplan?
5. What data is required for that and when can NAM provide that data?
6. Do we need a "Hand on the Tap" type of approach for Groningen?

**References**

1. Dieterich, J.H., 1978. Time-dependent friction in rocks and the mechanics of stick-slip, *Pure Applied Geophysics*, 116, pp 790 - 806
2. Runia A, 1983, Slip Instability and State Variable Friction Laws; *Journal of Geophysical Research*, Volume 88, No. B12, pp 10359 – 10370
3. Waal, de et al, 2012, The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits? *Netherlands Journal of Geology*, special Wadden sea issue, *Netherlands Journal of Geosciences*, No 91 – Vol. 3, pp 385 - 399

## Appendix B: Summary of peer review workshop outcomes

A peer review workshop was held on the 8th and 9th of November 2012 with experts from Shell, NAM, TNO-AGE, KNMI and SSM. The objective was to review the work presented in the first few chapters of this report. The outcome of the peer review is presented in the table below.

	<b>SodM position prior to workshop</b>	<b>Workshop outcomes</b>	<b>SodM position after the workshop</b>
1	Both the annual rate and the maximum magnitude of tremors in Groningen are increasing.	No agreement could be reached. Further statistical testing was recommended.	Both the annual rate and the maximum magnitude of tremors in Groningen are increasing.  SodM supports statistical testing. In our opinion it is unlikely that the results will change our position.
2	The area where most of the tremors occur is expanding and corresponds to the area where the largest subsidence occurs.	The area in the Groningen field where most of the seismicity occurred corresponds to the area where the largest pressure drop and-or pressure gradients occurred.	The area where most of the tremors occur corresponds to the area with the largest compaction/subsidence.  The largest pressure drop corresponds in general with the largest subsidence. In hindsight the area around the southern production clusters is a clear exception with large pressure drops and few tremors. Also there seem to be two maximum compaction areas, both reflected in the seismicity. Hence the move back to our original position.
3	Seismicity in Groningen increases with increasing cumulative production.	Most experts agree that the Groningen seismicity is not a stationary process in time. Some feel it needs to be statistically tested	Seismicity in Groningen increases with increasing cumulative production.  No change in position, most experts agreed.
4	The data suggests a probable relation between production rate and seismicity (at a 20% significance level).	The data suggests a probable relation between annual production and annual number of events (at a 14% significance level with a 0-3 year timelag-window).	The data suggests a probable relation between annual production and annual number of events.  No change in our position as it was agreed at the workshop that there is only a one-in-seven chance that the relationship found is coincidental. There is a 75% chance that the timelag is one year.
5	Groningen seismicity is not a stationary process.	Most experts agree that the Groningen seismicity is not a stationary process in time. Some feel it needs to be statistically tested.	Groningen seismicity is not a stationary process.  No change in position, most experts agreed.



6	The varying Groningen seismicity is not taken into account in a (Gutenberg Richter) annual frequency analysis which only applies to stationary seismicity processes.	An analysis for the maximum probable magnitude based purely on the Groningen seismicity data has so far not been done due to the small number of earthquakes.	The varying Groningen seismicity cannot be taken into account in the KNMI annual frequency-magnitude relationship which only applies for a stationary seismicity process.  KNMI prefers to use the term "annual frequency-magnitude relationship". Minor changes, no analysis refuting the SodM position was presented.
7	This leads to deviations in the calculated annual frequencies, in particular for higher magnitudes.	Not challenged	This leads to deviations in the calculated annual frequencies, in particular for higher magnitudes.
8	The downward curvature in the calculated Gutenberg Richter annual frequency relation suggesting a maximum possible magnitude of 3,7 / 3,9 is an artefact of the analysis method.	The data of all fields in the Netherlands has been used to derive a maximum probable magnitude. The result of the current analysis indicates a 10-15% probability that the maximum magnitude is above 3.9*.	The downward curvature in the calculated annual frequency-magnitude relationship suggesting a maximum possible magnitude of 3,7 / 3,9 is caused by the deviations in the calculated annual frequencies.  Change in wording to better clarify our position.
9	The alternative approach applied by SodM is not sensitive to varying seismicity levels in time.	Not challenged, but some experts not convinced.	The alternative approach applied by SodM is not sensitive to varying seismicity levels in time.
10	Results show a constant ratio (b-value -1) between tremors of different magnitudes, independent of seismicity levels or time.	Not challenged, agreed by all experts.	Results show a constant ratio (b-value -1) between tremors of different magnitudes, independent of seismicity levels or time.
11	Each unit increase in magnitude reduces the probability by a factor of 10: This is valid for all Groningen tremors, including the largest magnitude events.	Not challenged, agreed by all experts.	Each unit increase in magnitude reduces the probability by a factor of 10. This is valid for all Groningen tremors, including the largest magnitude events.
12	While its existence at some level is likely, a maximum magnitude thus cannot be derived from the available Groningen seismic data. Its minimum value is 3,9 and probably above 4,5.	The magnitude and validity of the largest probable event need to be reviewed by KNMI in the light of the latest data, using the Monte Carlo method as in previous studies within the framework of internationally accepted methods of probabilistic seismic hazard assessment. This work should be peer reviewed by independent experts. Until results of this analysis are available no seismologically based statements on the maximum probable magnitude for Groningen should be made.	Until results of the KNMI Monte Carlo analysis are available no seismologically based statements on the maximum probable magnitude for Groningen should be made.  SodM agrees to add a Monte Carlo analysis** but expect limited impact. Preliminary Monte Carlo analysis by SodM confirms seismologically based statements on the maximum probable magnitude cannot be made***.
13	Conclusions on $M_{max}$ on the basis of statistics from multiple fields is problematic.	Derivation of a maximum probable magnitude for a specific field on the basis of statistics from multiple fields is intrinsically problematic.	Derivation of a maximum probable magnitude for a specific field on the basis of statistics from multiple fields is intrinsically problematic.  Essentially a re-wording of the earlier position.

14	There is a 5-10% probability of a magnitude 3.9 event occurring in the next year.	No agreement could be reached	There is a 5-10% probability of a magnitude 3.9 event occurring in the next year.  No analysis was presented refuting the SodM analysis. The position was strengthened by the workshop agreement that no statements should be made on a maximum probable magnitude.
15	The present analysis could not be made reliably at an earlier stage given a then still more limited dataset and the required statistical significance.	Not challenged	The present analysis could not be made reliably at an earlier stage given a then still more limited dataset and the required statistical significance.

\* 2010 KNMI, using data from all fields in the Netherlands

\*\* The Monte Carlo analysis must honour the varying seismicity levels. Otherwise deviations in the calculated annual frequencies will occur again, invalidating conclusions.

\*\*\* All workshop experts agreed that the benefits of constraining seismological analyses using geomechanics should be investigated.

## Position Statement of KNMI

Position Statement of KNMI with regard to the report: "Reassessment of the probability of future higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field", dated January 16, 2013, by the State Survey of Mines

In this Statement we declare our position with regard to the conclusions of the Report. It should be mentioned that during the preparation of the Report, SSM has frequently consulted and shared drafts with KNMI.

The Report presents the results of an SSM analysis of the seismicity in the Groningen field (GF) based on the seismic catalogue data as provided by KNMI in the public domain. Notable differences with earlier analyses by KNMI (e.g., Dost et al., 2012, which has a broader scope) are the stronger focus on the GF in isolation, and the attempt to establish a computational model for the relation between gas production and seismicity.

The SSM analysis addresses descriptive statistics of the past seismicity, as well as predictions of (the statistics of) future seismicity. The predictions involve two kinds of extrapolation: (a) extrapolation in time, and (b) extrapolation in magnitude.

The descriptive statistics primarily concern (i) the evaluation of the seismicity rate, the number of events in a certain time window (say, a year) above a certain threshold magnitude, and (ii) the characterization of the relative frequencies of events of different magnitudes within a population of events.

The extrapolation in time concerns the seismicity rate. The Report suggests extrapolation -- or prediction --, using a computational model that expresses seismicity rates as a function of cumulative and annual gas production (Equation 4). The proposed model gives a history match according to the authors' criteria and is subsequently used to predict seismicity rates for several production scenarios.

The extrapolation in magnitude concerns higher, still scarce or unobserved magnitudes. The Report suggests extrapolation using the assumption of the classical Gutenberg-Richter relation bounded by an undetermined maximum magnitude. The extrapolated Gutenberg-Richter relation is combined with the extrapolated seismicity rates to predict probabilities for the occurrence of events exceeding certain magnitudes.

With regard to the descriptive statistics KNMI supports the conclusions (1-3) of the Report, based on our own research, concerning (1) the increase in the annual number of earthquakes in the GF, (2) the inability to estimate a  $M_{\max}$  for the GF using earthquake statistics and (3)  $M_{\max} > 3.9$  cannot be excluded based on seismicity data only.

We conclude that:

- The seismicity rate of the Groningen field has been increasing significantly since the onset of seismicity
- The seismicity of the Groningen field has not been stationary over time
- The distribution of the current catalogue of past events in Groningen is well described by a Gutenberg-Richter relation with a b-value of around 1.0, a typical value for natural and induced earthquakes.
- The distribution of magnitudes does not show evidence for a maximum magnitude.

With regard to the extrapolation in time KNMI takes the position that the model proposed by SSM is speculative and should be better motivated and tested. KNMI is therefore not able to give full support to conclusions 5-8 of the Report, dealing with inferences of the proposed preliminary model. However, as a first attempt the model gives some directions and both the SSM and NAM model agree that the annual number of earthquakes depend on cumulative production. Cumulative

production is responsible for compaction and we agree that differential compaction is most likely the driving force behind seismicity in the field.

With regard to the extrapolation in magnitude KNMI takes the position that the bounded Gutenberg-Richter model is a reasonable model to predict the relative frequencies of higher, unobserved magnitudes. However, it should be clear that this model is an assumption. Other types of relative frequency-magnitude distributions may also be envisioned. KNMI supports conclusion 4 of the Report with the additional qualifier that it is based on the assumption of a bounded Gutenberg-Richter model for all magnitudes above the magnitude of completeness. The percentages mentioned depend on that assumption. Since we do not know the  $M_{max}$ , these conclusions are only used as examples.



‘To ensure that mining and the transport of gas are executed in a socially responsible manner.’

## Review TBO rapportage onderzoek 5

Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO),  
Den Haag, Utrecht, de Bilt, 24 november 2013

Hans de Waal	SodM
Barthold Schroot	EBN
Karin van Thienen-Visser	TNO-AGE
Bernard Dost	KNMI
Joost Haenen	Voorzitter Technische Begeleidingscommissies

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## 1. Inleiding

In deze notitie beschrijft de Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO) de resultaten van het reviewproces voor de rapportage van NAM over onderzoek 5, getiteld “Report on Subsurface Aspects of Induced Earthquakes in the Groningen Field”.

### *Vraagstelling en scope*

Onderzoek 5 maakt onderdeel uit van de 11 onderzoeken die de Minister van Economische Zaken heeft aangekondigd in zijn brief aan de Tweede Kamer van 11 februari 2013. In die brief spreekt de minister over een “onderzoek naar de (nieuwe) maximum sterkte van bevingen voor het Groningen gasveld”. NAM heeft de scope van het onderzoek verbreed tot en met het ‘seismisch hazard’ dat gepaard gaat met de bevingen in Groningen. In deze rapportage wordt het begrip (seismische) hazard gebruikt, waar het gaat om de kans op de overschrijding van een bepaalde bodembeweging. Als het woord risico wordt gebruikt, wordt bedoeld op die kans (hazard) maal de gevolgen (in termen van schade).

Aan de rapportage van NAM ligt een aantal (deel)studies ten grondslag, op het gebied van geomechanische modellering, statistische analyse en petroleum engineering. (Zie bijlage 2 voor een schematisch overzicht van het “Earthquake Study and Data Acquisition Program” van NAM.)

De rapportage van NAM is opgebouwd uit de volgende elementen:

- Een beschrijving van de geologie van het Groningen veld en van de historisch waargenomen seismiciteit in het veld.
- Een korte beschrijving van gegevens en relevante literatuur over geïnduceerde aardbevingen.
- De effecten van gasproductie op de compactie van het gasveld.
- Het vrijkomen van in het veld door compactie opgebouwde energie door aardbevingen.
- De berekening van de beweging aan het oppervlak die daarvan het gevolg is.
- Op basis van de voorgaande elementen is de ‘seismische hazard’ berekend, met de daarbij behorende grondbewegingen en contouren. Hiervoor wordt een probabilistische analyse gemaakt, met behulp van een Monte Carlo simulatie.
- Een hoofdstuk is gewijd aan geomechanische modellering en met name aan de rol van breuken.
- Een laatste onderdeel gaat over het verzamelen van aanvullende gegevens, waarvoor NAM een meet- en monitoring programma zal opstellen.

### *Proces*

De TBO is sinds mei 2013 periodiek geïnformeerd over de voortgang en de (tussentijdse) resultaten. Er zijn drie grote workshops georganiseerd, waarop deelstudies zijn gepresenteerd en bediscussieerd. Daarnaast zijn er voor experts technische bijeenkomsten georganiseerd over specifieke onderwerpen, gericht op begrip en verdieping. De TBO heeft in al deze discussies vooral gestuurd op het binnen de beschikbare tijd verkrijgen van de best mogelijke antwoorden op de vragen van de minister.

---

TBO : 24 november 2013

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## *Inhoudsopgave*

In de volgende paragraaf worden de bevindingen van NAM kort samengevat. Daarna wordt in paragraaf 3 een beoordeling gegeven van de resultaten. In paragraaf 4 en 5 volgen ten slotte de conclusies en aanbevelingen van de TBO aan de Stuurgroep. In bijlage 1 volgt een schematisch overzicht van de belangrijkste conclusies van de NAM rapportage, waarin de TBO zijn gedetailleerde commentaar heeft opgenomen, de mogelijke consequenties schetst en aanbevelingen geeft voor vervolg activiteiten.

Bijlage 2 geeft, zoals gezegd, een schematisch overzicht van de door NAM uitgevoerde (deel)studies. In de bijlagen 3 en 4 worden afzonderlijke meer gedetailleerde reviews gegeven van de belangrijkste van die(deel)studies. Het betreft in de eerste plaats een review van de hazard analyse die is gemaakt. In de tweede plaats volgt een review van het aanvullende geomechanische werk, toegespitst op het gedrag van breuken in Groningen.

## **2. Bevindingen van NAM**

De rapportage bevat de resultaten van onderzoek naar geïnduceerde seismiciteit in het Groningen veld, dat door NAM in 2013 is uitgevoerd. NAM benadrukt dat er weliswaar veel vooruitgang is geboekt in het begrip van de seismiciteit in het Groningen veld, maar dat de onzekerheden in de daarop gebaseerde voorspellingen voor de toekomstige seismiciteit aanzienlijk zijn. Er is een grondige statistische analyse uitgevoerd op de gegevens van alle 187 bevingen in Groningen met een magnitude van 1,5 en hoger, geregistreerd in de periode april 1995 tot oktober 2012. De grote mate van onzekerheid is o.a. gevolg van het beperkte aantal bevingen in deze periode, vooral in de hogere magnitude klassen. De onzekerheid neemt toe naarmate verder in de toekomst wordt gekeken. NAM stelt dat de resultaten van de seismische hazard analyse conservatief zijn en kondigt een programma aan om aanvullende gegevens over het veld te verzamelen en nader onderzoek uit te voeren om de onzekerheden, waar mogelijk, te reduceren.

Beschreven wordt dat de productie uit het gasveld leidt tot verlaging van de druk in het reservoir, die resulteert in compactie van het reservoirgesteente, waardoor spanning wordt opgebouwd in de ondergrond. De seismiciteit in het veld, zo wordt verondersteld, ontstaat als een gedeelte van deze spanning (of opgeslagen mechanische energie) zich ontladst als het gesteente gaat schuiven langs een natuurlijke breuk in het veld. In de onderliggende studies van Bourne en Oates (zie bijlage 3) stelt NAM dat er een relatie bestaat tussen de toenemende compactie van het gasreservoir en de in de loop der jaren toegenomen seismiciteit.

Als de seismiciteit in de toekomst de trend volgt die in het verleden is waargenomen, is er - op basis van de huidige statistische analyse op de 187 historische bevingen met een magnitude van 1,5 en hoger - in de komende tien jaar (periode 2013-2023) een kans van 50% op een beving met een magnitude (M) groter dan 4,2 op de schaal van Richter, een 10% kans op  $M > 4,9$  en een 1% kans op  $M > 5,4$ . Het betreft hier de kans over de genoemde periode van 10 jaar. De jaarlijkse kans neemt toe in de tijd.



# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

Het voorspellen van de frequentie en magnitude van toekomstige bevingen kent een grote onzekerheid. Wanneer vervolgens in de hazard analyse het effect van een bepaalde beving in termen van grondbewegingen wordt berekend, worden additionele grote onzekerheden geïntroduceerd, die inherent zijn aan de daarvoor gebruikte empirisch bepaalde Ground Motion Prediction Equations (GMPEs).

Voor de grondbeweging wordt op basis van een probabilistische seismische “hazard” analyse voor de komende tien jaar een jaarlijkse overschrijdingskans van 0,2% voorspeld op een maximale grondversnelling (PGA) groter dan 0,57 g, boven het gebied met de grootste reservoir-compactie. In diezelfde periode is er een jaarlijkse overschrijdingskans van 1% op een PGA groter dan 0,26 g.

De belangrijkste bijdrage aan de onzekerheid in de berekende hazard is volgens NAM de zogenaamde partiticoëfficiënt. Dit is een empirische factor die beschrijft welke fractie van de totale - vanwege compactie - in een gegeven periode opgeslagen energie vrijkomt in de vorm van bevingen. Om deze onzekerheid te reduceren dient meer fysisch begrip van de partiticoëfficiënt verkregen te worden en vervolgens in de analyses te worden ingebracht. NAM werkt o.a. aan meer gedetailleerde geomechanische modellering, maar die wordt bemoeilijkt door het gebrek aan relevante gegevens van het veld. Een programma om aanvullende gegevens te verkrijgen is gestart. Daarmee kan potentieel de bestaande onzekerheid worden gereduceerd, stelt NAM.

### 3. Beoordeling

De TBO is onder de indruk van de kwaliteit en de omvang van het werk dat wordt gepresenteerd, in het licht van de beperkte hoeveelheid gegevens en de korte tijd die voor het onderzoek beschikbaar was. Een gedegen statistische en seismologische analyse van de beschikbare data leidt tot een voorspelling van de seismische hazard, meer in het bijzonder van de frequentie van bevingen als functie van tijd en plaats en van de grondbeweging aan het oppervlak die gepaard gaat met een aardbeving.

Het bovenstaande neemt niet weg dat er zeker kanttekeningen bij de resultaten kunnen worden geplaatst, zoals NAM dat zelf in een aantal opzichten ook nadrukkelijk doet. Een eerste kanttekening van NAM is dat ten aanzien van de resultaten een grote - en met het aantal jaren waarmee vooruit gekeken wordt snel toenemende - onzekerheid bestaat. De verwachting is dat een deel van die onzekerheden in de komende jaren kan worden gereduceerd, als meer gegevens beschikbaar komen en aanvullend onderzoek wordt gedaan. De TBO deelt de mening van NAM over de grote onzekerheid in de berekende seismische hazard. Voor een deel is die onzekerheid inherent aan de gekozen (statistische) benadering, en de beperkte hoeveelheid gegevens die voor de analyse beschikbaar is. Voor een ander deel heeft de onzekerheid te maken met de beperkte fysica in het model waardoor de seismiciteit nu uitsluitend is gekoppeld aan de compactie van het veld.

Grote onzekerheid bestaat er over zowel de grootte (nu geschat op 0,1%) als de ontwikkeling in de tijd van de partiticoëfficiënt. Extrapolatie van deze factor op basis van de huidige gegevens is niet eenduidig en wordt nog niet ondersteund door een geomechanische duiding.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

Zoals NAM opmerkt, is het onzeker of de op basis van de historische gegevens afgeleide (exponentiële) ontwikkeling van die coëfficiënt zich in de toekomst zal voortzetten.

Uit de rapportage blijkt niet of voldoende is onderzocht op welke wijze en in welke mate de partiticoëfficiënt ook afhangt van andere factoren dan de cumulatieve compactie. Daarbij valt te denken aan, bijvoorbeeld, niet lineaire tijdsafhankelijke effecten door vervormingsgedrag van steenzout van de Zechstein formatie, afhankelijkheid van de breukdichtheid en van de snelheid waarmee de productie en dus de daaruit volgende compactie plaatsvindt. Dat laatste is van belang gegeven de discussie over het verlagen van de productiesnelheid als mitigerende maatregel. Het sneller of langzamer produceren van het veld heeft in het huidige NAM model hetzelfde gevolg als het sneller of langzamer afspelen van een film: dezelfde geschiedenis speelt zich af in een kortere of langere tijd. Het totale aantal bevingen en de verdeling naar magnitude van die bevingen blijft daarbij gelijk.

Ook ten aanzien van de in de toekomst te verwachten compactie zelf (die het aandrijvend mechanisme vormt) bestaat aanzienlijke onzekerheid. De drie verschillende compactiemodellen die NAM heeft beschouwd leiden in de eerste vijf jaar tot beperkte verschillen (minder dan 5 cm), maar daarna nemen die verschillen fors toe. Dit draagt in belangrijke mate bij aan de toenemende onzekerheid op de langere termijn. Daarbij moet worden aangetekend dat NAM in de statistische analyse tot nu toe heeft gewerkt met een zogenaamd (bi)lineair compactiemodel. Inmiddels gaat NAM voor de 'base case' bodemdalingsberekening uit van het *time decay* compactiemodel, dat tot een iets grotere compactie leidt. Het berekenen van de seismische hazard met dat compactiemodel moet nog worden uitgevoerd. Ook een derde compactiemodel, het zogenaamde *isotach* model, is nog niet doorgerekend. Toepassen van het *isotach* model zou tot een nog grotere compactie leiden in vergelijking met het *time decay* model.

Een tweede kanttekening van NAM zelf is dat de resultaten als conservatief beschouwd moeten worden. De TBO neemt aan dat met 'conservatief' in dit verband bedoeld wordt, dat resultaten worden gepresenteerd die *worst case* scenario's representeren, die m.a.w. aan de bovenkant van (maar binnen) de onzekerheidsmarges vallen. In de ogen van de TBO kan worden gesteld dat de hazard analyse voor de komende vijf jaar in die zin conservatief is, omdat de gepresenteerde hazard een gemiddelde kans over de komende tien jaar betreft, terwijl het model uitgaat van een jaarlijkse toename van die kans (omdat de partiticoëfficiënt exponentieel toeneemt). Als gevolg wordt de kans in de eerste jaren van de periode van 2013 tot 2023 overschat en in de laatste jaren van dezelfde periode onderschat.

Een ander element dat als conservatief ingeschat kan worden beschouwd, is de afschatting van de bovengrens voor de fysisch maximaal mogelijke magnitude. De TBO is het eens met NAM dat de gepresenteerde methoden om die bovengrens op basis van fysische overwegingen te bepalen van weinig nut zijn, ook al omdat ze geen invloed hebben op de berekende seismische hazard.

Gelet op de grote onzekerheden is een antwoord op de vraag of de resultaten conservatief zijn in zijn algemeenheid thans niet (wetenschappelijk) te onderbouwen. In de ogen van de TBO

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

maken die onzekerheden het meer in zijn algemeenheid zeer risicovol om nu definitieve conclusies te trekken, zeker voor de langere termijn.

De TBO deelt de mening van NAM dat meer gegevens en verder onderzoek (bv. de verdere geomechanische studies en het uitvoeren van het voorgenomen monitoringsplan) nodig zijn om de onzekerheden in de toekomst mogelijk te kunnen reduceren.

Een meer gedetailleerde beschrijving en beoordeling van de conclusies van de rapportage van NAM is gegeven in paragraaf 4 en in meer detail opgenomen in bijlage 1. Hier worden de belangrijkste opmerkingen uit die bijlage kort genoemd:

- NAM gaat in de onderliggende onderzoeken uit van het bestaande productieprofiel van Groningen. De belangrijke vraag, wat de impact zou zijn van een aangepast productieprofiel (bv. productiebeperking) op de seismische hazard, wordt in de rapportage niet beantwoord. NAM heeft toegezegd deze vraag mee te nemen in de rapportage over onderzoek 6. Het antwoord op deze vraag lijkt zeer relevant om nut en noodzaak van een eventuele productiebeperking te kunnen beoordelen.
- De empirische “Ground Motion Prediction Equations” die worden gebruikt, zijn gebaseerd op tektonische aardbevingen in Europe en het Midden Oosten, maar aangepast om te fitten aan de waarnemingen in Groningen. Het is de vraag of deze GMPEs ook gelden voor grotere magnitudes dan tot nu toe zijn waargenomen in Groningen. Ook is niet aangetoond dat sterkere geïnduceerde bevingen vergelijkbaar zijn met tektonische aardbevingen met een vergelijkbare magnitude. De gemeten duur van de bevingen in Groningen is, bij gelijke sterkte, langer dan bij andere gasvelden in Nederland (o.a. Roswinkel) en de vraag is hoe deze duur zich verhoudt tot tektonische bevingen. Deze kanttekening neemt niet weg dat op dit moment geen betere GMPEs voorhanden zijn.
- Voor de groundbeweging voorspelt NAM op basis van een probabilistische seismische hazard analyse voor de komende tien jaar een jaarlijkse overschrijdingskans van 0,2% op een grondversnelling (PGA) groter dan 0,57 g, boven het gebied met de grootste reservoir compactie. In diezelfde periode wordt een jaarlijkse overschrijdingskans van 1% op een PGA groter dan 0,26 g voorspeld. De TBO tekent hierbij aan dat dit een gemiddelde kans is over de komende tien jaar. De jaarlijkse kans zal kleiner zijn in 2013 en groter in 2022, gezien de veronderstelde exponentiële toename van de partiticoëfficiënt.
- De centrale vraag van de minister voor onderzoek 5 betrof de (nieuwe) maximale sterkte van bevingen voor het Groningen gasveld. Voorheen werd rekening gehouden met een maximum van  $M = 3,9$ , maar de ontwikkeling van de seismiciteit in de afgelopen jaren maakte het nodig dit cijfer te herzien.

Deze vraag wordt in de rapportage van NAM niet beantwoord. Er wordt weliswaar een *fysisch* maximaal mogelijke magnitude gepresenteerd, maar die is niet vergelijkbaar met de *waarschijnlijke* maximale magnitude, waarvan bij de  $M = 3,9$  sprake was. De TBO betwijfelt of de gehanteerde methodieken om tot een afschatting van de bovengrens van  $M_{max}$  te komen wel toepasbaar zijn in het geval van Groningen en of de gekozen parameters wel realistisch zijn. De TBO is verder van oordeel dat een vergelijkbare

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

waarschijnlijke maximale magnitude ( $M_{max}$ ) voor de kortere termijn wel afgeleid zou kunnen worden uit de gepresenteerde berekeningen, bijvoorbeeld door de  $P_{90}$  te nemen voor de komende tien jaar. In dat geval zou de  $M_{max}$  uitkomen op  $M = 4,9$  met een overschrijdingskans van 10%. Daarbij moet aangetekend worden dat in de door NAM gepresenteerde hazard analyse  $M_{max}$  geen rol speelt en vervangen wordt door het totaal beschikbare seismische moment.

Prof. Main (University of Edinburgh), die de onderhavige rapportage van NAM heeft gereviewd, complimenteert de auteurs en onderzoekers met het veelomvattende en professionele werk dat in zo korte tijd is verricht. Hij concludeert dat “all of the major conclusions and caveats listed in chapter 11 (*dat de conclusies samenvat - TBO*) are reasonable in the light of current knowledge [...], as are the plans in going forward with outstanding work to reduce the remaining uncertainties further”. Main komt wat dat laatste betreft met suggesties voor de richting van het geomechanische werk (bv. onderzoek naar de partiticoëfficiënt of de feitelijke aspect ratio).

De TBO deelt de observatie van professor Main dat het belangrijk is om de onzekerheden verder te reduceren. De belangrijkste onzekerheden betreffen het compactiemodel, de ontwikkeling van de partiticoëfficiënt (en de onderliggende fysieke processen) en de GMPE.

## 4. Conclusies

1. De TBO is van mening dat NAM in korte tijd grote stappen heeft gezet in het verkrijgen van meer begrip van de seismiciteit in het Groningen veld. Het onderzoek is met voldoende onafhankelijkheid opgezet en uitgevoerd en doorstaat - zoals blijkt uit verschillende onafhankelijke reviews - de toets der wetenschappelijke kritiek.
2. De grondige statistische analyse op de set gegevens van de 187 historische aardbevingen heeft geleid tot meer inzichten en vormt een goede basis voor de hazard berekening. O.a. vanwege de beperkte hoeveelheid gegevens bestaan er echter nog grote onzekerheden.
3. De TBO concludeert dat er consensus is over het eerste orde fysisch mechanisme dat de bevingen veroorzaakt. Het drijvend mechanisme wordt gevormd door de door gasproductie veroorzaakte afnemende reservoirdruk. Deze leidt tot compactie van het reservoirgesteente. Vervolgens komt een gedeelte van de hierdoor opgebouwde spanning vrij als seismische energie.
4. Er is consensus over de conclusie dat verdergaande depletie van het reservoir (verdere drukdaling) zal leiden tot meer aardbevingen en daarmee tot een grotere kans op sterkere bevingen en dat het niveau van de jaarlijkse gasproductie in eerste orde bepaalt hoe frequent de aardbevingen zich zullen voordoen.
5. Er is nog geen consensus over het fysisch model dat de afhankelijkheid van de compactie van de drukdaling in de tijd het beste beschrijft (het ‘compactiemodel’). Hiervoor bestaan verschillende hypothesen die op basis van de huidige bodemdalingmetingen alle valide kunnen zijn. De diverse modellen zullen naar

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

verwachting voor 2018 leiden tot verschillen in de bodemdalingsvoorspellingen die toetsing beter mogelijk maken.

6. Er is een reële mogelijkheid dat op de iets langere termijn (> 5 à 7 jaar) een tweede effect in het fysisch mechanisme - nl. een afhankelijkheid van compactie van de snelheid van productie - een belangrijke rol zal blijken te spelen. Hierover bestaat op dit moment geen consensus. De invloed van de productiesnelheid op de seismiciteit is daardoor een onzekere factor, waarnaar NAM in de ogen van de TBO nog onvoldoende onderzoek heeft gedaan.
7. De grootte van de partiticoëfficiënt en de ontwikkeling ervan in de tijd zijn belangrijk en in belangrijke mate bepalend voor de toename van de seismiciteit in de komende jaren. De TBO deelt de conclusie van NAM dat de huidige statistische analyse laat zien dat het waarschijnlijk is dat deze coëfficiënt toeneemt. De mate waarin dit het geval zal zijn is echter zeer onzeker omdat goed fysisch begrip van de betekenis van de empirisch bepaalde partiticoëfficiënt ontbreekt.
8. Het is gewenst om verder onderzoek te doen naar de afhankelijkheid van de partiticoëfficiënt van andere factoren dan de compactie zoals de breukdichtheid en de compactiesnelheid.
9. De TBO betwijfelt of de gehanteerde methodieken om tot een afschatting van de bovengrens van  $M_{max}$  te komen wel toepasbaar zijn in het geval van Groningen. Bovendien is de *fysisch* maximaal mogelijke magnitude die gepresenteerd wordt, niet vergelijkbaar met de *waarschijnlijke* maximale magnitude.
10. De TBO vindt de alternatieve weg die in het onderzoek is gekozen, nl. het uitvoeren van een seismisch hazard analyse m.b.v. een Monte Carlo simulatie, een goede aanpak.
11. De TBO onderschrijft de conclusies van NAM dat er meer gegevens en aanvullend onderzoek nodig zijn om verdere stappen in de komende jaren te kunnen zetten.

## 5. Aanbevelingen

Hoewel onderzoek 5 (in combinatie met onderzoek 6) naar het zich laat aanzien voldoende basis vormt voor besluitvorming op dit moment, is de onzekerheid op de wat langere termijn zo groot, dat aanvullende onderzoek en data acquisitie noodzakelijk wordt geacht met als doel om die onzekerheden binnen beheersbare grenzen te houden. De TBO vindt het met het oog op het reduceren van de onzekerheden gewenst dat NAM de noodzakelijke verdere stappen verder concretiseert en daarvoor ook een planning maakt. In de ogen van de TBO zullen daarin ten minste de volgende onderdelen een plaats moeten krijgen.

- Maatregelen om de noodzakelijke extra gegevens te verkrijgen. Daarbij gaat het in elk geval om gegevens die een betere bepaling van de historische bodemdaling en calibratie van het compactiemodel mogelijk maken, extra gegevens over de seismiciteit (nauwkeuriger plaatsbepaling, dieptebepaling en duur van de beving) en over de resulterende grondbeweging (PGAs en PGVs).

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

- Op basis van deze extra gegevens kan de monitoring verbeterd worden en kan regelmatig een nieuwe beoordeling van de seismische hazard worden gemaakt. Dit vormt de basis van een seismisch risico management systeem, met inbegrip van de bovengrondse aspecten.
- Het compactiemodel moet nader worden bezien. De verschillende gesuggereerde modellen dienen op hun validiteit en toepasbaarheid getoetst te worden, zowel aan de hand van nieuwe meetgegevens in Groningen in de komende jaren, als door wetenschappelijk onderzoek.
- Het porositeitsmodel dat medebepalend is voor voorspelling van compactie dient kritisch te worden gevalideerd en te worden geactualiseerd naarmate meer gegevens binnen komen.
- Er moet meer fysica worden gebracht in de seismische hazard analyse en in het bijzonder in de afleiding van de partiticoëfficiënt en de GMPEs. Door geomechanische modellen te integreren in de statistische analyse kan de rol van breuken en van de compactie-snelheid worden ingebracht. *Full waveform* modellering kan de onzekerheden in de GMPEs verlagen.
- Er is 3D geomechanische modellering nodig om bv. de effecten van de oorspronkelijke spanningstoestand in de ondergrond (*stress state*), de dichtheid, geometrie en afmetingen van breuken te bestuderen.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## Bijlage 1

### Review by the TBO of the conclusions of NAM's draft report on 'Subsurface Aspects of Induced Earthquakes in the Groningen Field'

4. Historical compaction / subsidence and future trends			
Conclusions NAM	TBO comments	Consequences	Follow-up
Three compaction models were calibrated against field data and applied to assess the uncertainty in future compaction and subsidence. All models fulfill the condition that they match the historical dataset.	Different compaction models have different consequences for the future behaviour of compaction with production. Indeed, all models are matched to the subsidence so far.	At this point, no conclusions about the compaction model can be drawn yet.	The compaction model and time delay behaviour of compaction need to be studied using future subsidence measurements of levelling and, ideally, permanent GPS stations.
At present, the base case compaction model is the time-decay model that describes compaction following depletion with a fixed time-decay constant. The bi-linear model reacts instantaneously on the depletion and of the three models predicts the least amount of subsidence and compaction in the future. The third model, the isotach model proposed by TNO, where loading rate plays an important role in the calculated compaction, predicts significantly more compaction in future and is regarded as the high compaction case.	The previously used bi-linear model is considered to be less plausible, also by NAM. This reduces the number of choices for the models, effectively: the time-decay or the isotach compaction model.	Using the time-decay model (preferred by NAM at this moment) results in lower future compaction compared to using the isotach model. The difference becomes significant between 7 – 10 years from now.	See above
A prognosis for the next ten years shows only little difference between the four compaction models. Results for the period beyond are seen to diverge.	Three compaction models were considered instead of four. For the next 10 years the compaction between the different models seems to diverge only by 5 cm. After this period, the differences in compaction for the different models increase.	Due to this uncertainty (which model is best) a prognoses for compaction at the end of field life (up to 2080) is uncertain. As a result a reliable prognosis can only be made for shorter time periods.	Monitoring of the development of subsidence in view of these different compaction models.
A conservative assumption in the hazard	There are examples of foreign gas	A calculated figure for	Introduce more physics in the

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

calculation is that all modeled compaction volumes are recoverable strain volumes, available as stored strain energy for release as seismic energy.	fields, geothermal systems and water disposal systems where the amount of stored energy in the system does not equal the amount of released seismic energy.	total stored energy cannot be used to derive a realistic value for Mmax.	derivation of the partitioning coefficient. Investigate if the use of information available elsewhere would make it possible to substantiate a smaller partitioning coefficient.
<b>5. Induced seismicity due to gas production</b>			
Albeit rare, the open literature contains several comprehensive listings summarizing the known cases of induced seismicity following gas production.	The fact that open literature only describes a few examples does not mean that seismicity itself is rare. Few gas fields elsewhere have the dense monitoring system that Groningen has. It is likely that micro seismicity always takes place.	Micro seismicity can, probably, be observed for all producing gas fields.	
In most cases induced earthquakes are of small or intermediate magnitudes but there are documented cases of larger, damaging earthquakes being apparently induced or triggered by extraction of fluids from the subsurface. Magnitudes tend to fall in the range of $M=1 - 5$ (see advice KNMI 2012).	Larger magnitude events have generally occurred in active tectonic regions making them likely to be triggered instead of induced. In the literature this distinction is not always made e.g. in Klose (2013).	Triggering of larger magnitude events cannot be excluded in active tectonic regions. Conclusions from literature should be handled with care	
The Rotenburg $M=4.4$ earthquake is potentially a good analogue for Groningen (both Rotliegend reservoirs).	The report does not substantiate this. More information on e.g. the size of the field, the dimension of the fault(s), the amount of production/pressure drop and the geology would be needed in order to support this statement.	Rotenburg cannot be taken as an analogue for Groningen without further research.	Potential analogues for Groningen need to be analysed.
The Yibal example shows that events induced by reservoir compaction can be located outside (above or below) the reservoir.	It is not clear how Groningen compares to Yibal, in terms of e.g. geology, geomechanical parameters.	Events induced by reservoir compaction cannot be excluded to occur below or above the reservoir itself.	Improved monitoring in wells should provide this information.
<b>6. Release of energy by Earthquakes</b>			



## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

<p>According to current model-based predictions for the areal distribution of reservoir compaction at the end of field life, an induced earthquake of <math>M &gt; 6.5</math> is physically impossible. This limit, however, provides no information about the likelihood of an induced <math>M \leq 6.5</math> earthquake.</p>	<p>The assumption made here is that all compaction strain is released in a single seismic event. This is a very conservative assumption.</p>	<p>The maximum <i>physically possible</i> magnitude is large (<math>M=6.5</math>), albeit impossible to occur, and cannot be compared to the historical maximum <i>probable</i> magnitude of <math>M=3.9</math>.</p>	
<p>The location, frequency and magnitude of observed earthquakes in the Groningen field are consistent with bulk reservoir volume changes (compaction), being the main source of seismicity.</p>	<p>This implies that (increase in) compaction drives the induced seismicity. Other aspects such as initial stress state, differential compaction and presence of faults may also be relevant, but are not included in the present empirical seismicity model. These could also explain the observed variations over the field.</p>	<p>Prediction of future behaviour for areas with hitherto low seismicity is difficult as uncertainties are large and other factors have not been taken into account.</p>	<p>Improved monitoring and regular re-assessment based on new data.</p>
<p>The fraction of bulk reservoir volume changes accommodated by seismogenic fault slip is about 0.1%. If this fraction were invariant with production, the maximum magnitude of a future event is expected to be <math>M=4.5</math> with a 95% upper bound of <math>M=5.5</math>.</p>	<p>This comes from comparison between the estimated total seismic moment and moment realized.</p>		
<p>There is evidence that the release of seismic moment per unit production escalated with increasing production volume. If this trend continues with future production, an increasingly large fraction of the induced strain may be accommodated by seismogenic fault slip.</p>	<p>This implies that the strain partitioning factor (now estimated at 0.1%) could increase in the future as compaction will increase further.</p>	<p>The dependence of the strain partitioning coefficient on total compaction could change considerably.</p>	<p>Further investigate the sensitivity of the strain partitioning factor for increasing compaction and for different compaction models.</p>

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

<p>The fraction of induced strain accommodated by earthquakes is likely increasing with increasing reservoir compaction. This explains the observed temporal and areal distribution of earthquakes.</p>	<p>The extent to which the strain partitioning factor will increase in future is very uncertain.</p>	<p>Only, if the present trend continues, the annual number of earthquakes and the risk of larger magnitudes will increase significantly over the coming ten years.</p>	<p>It is important to keep on following the development of the strain partitioning factor in the next years.</p>
<p>If this escalation trend continues with future production the footprint of earthquakes is expected to continue extending from the center towards the edges of the field, but the relative abundance of earthquakes will continue to be localized within the regions of largest reservoir compaction in the center of the field.</p>	<p>In general this is a valid and plausible expectation. However, considering specific locations over the field, the presence or absence of (larger) faults is also important, since they are required to initiate earthquakes.</p>	<p>Local fault density is likely to influence the location of future earthquakes, in particular for larger magnitudes. The criticality of the faults will determine whether the shear stresses on the faults are sufficient to induce earthquakes. Prediction of future behaviour for areas with hitherto low seismicity is uncertain.</p>	<p>An attempt should be made in to integrate the statistical approach to seismicity with geomechanical modelling.</p>
<p>If future seismicity follows the same trend of increasing fault strain partitioning observed in the historic earthquake catalogue, then based on the current analysis there is a 1 in 2 chance of <math>M &gt; 4.2</math>, a 1 in 10 chance of <math>M &gt; 4.9</math>, and a 1 in 100 chance of <math>M &gt; 5.4</math> before the end of 2023. These estimates include known uncertainties associated with the trend of seismogenic fault slip accommodating an increasing fraction of the induced strain but currently exclude the possible trend of the b-value decreasing with compaction that may increase the likelihoods stated. These estimates also exclude</p>	<p>Uncertainties in these numbers are large and grow fast at later times. The chances given here would increase if future compaction would prove to follow the isotach model rather than the bi-linear model.</p>	<p>These findings imply the need for a measurement and control loop based seismic risk management system for Groningen.</p>	<p>These findings imply the need for a measurement and control loop based seismic risk management system for Groningen.</p>

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

the possibility of triggered earthquakes that may increase these likelihoods.			
<b>7. Movement at surface</b>			
Recorded peak ground accelerations (PGA) and velocities (PGV) from induced earthquakes in the Groningen field show remarkably low amplitudes, even compared to recordings from earthquakes of similar magnitude in the Roswinkel field.	These observed lower amplitudes might be related to the observed longer signal duration	Extrapolation to larger magnitudes is uncertain.	It is important to improve monitoring of PGA/PGV across the field and to use the observations to update the empirical ground-motion prediction equations that are being used to estimate PGA and PGV.
The most likely explanation for these low amplitudes is the effect of the high-velocity, high-density basal anhydrite layer in the Zechstein formation immediately above the Groningen gas reservoir, since this creates a strong negative impedance contrast.	This is a likely explanation. Other possible explanations should not be excluded at this point.	The presence of the anhydrite layer may prevent higher amplitudes of ground motion for magnitudes up to $M=3.5$ .	Waveform modeling should be performed to investigate this. Other possible explanations should be investigated as well.
The beneficial effect of the basal anhydrite is not assumed to hold for motions from larger earthquakes ( $M>4$ ) until verified by other investigations, and for the initial hazard analysis it is assumed that ground-motion amplitudes will be comparable to those recorded in tectonic earthquakes.	For larger events, the thick Zechstein layer also plays a role as high velocity layer, similar to the anhydrite layer.		
On this basis, ground-motion prediction equations (GMPEs) derived from recordings of tectonic earthquakes in Europe and the Middle East have been adopted for the prediction of PGA and PGV. The equations were selected on the basis of using hypocentral distance, which is consistent with the way earthquakes are modeled in the hazard analysis, and including a term for site amplification effects that is able to model the influence of the soft near-surface conditions	The adapted GMPEs used are for general tectonic events in Europe and Middle East. It remains to be seen whether the GMPEs hold for larger magnitudes, Also it remains to be proven that larger induced events are comparable to tectonic events of similar magnitude. However, this is at the moment the best model.	Hazard analysis strongly depends on the GMPE used. All GMPEs are associated with high uncertainties.	Improved monitoring of PGA/PGV and regular reassessment of GMPE in the case of higher magnitudes occurring.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

encountered in much of the Groningen field.			
The equations have been adopted in their original form for larger earthquakes, but adjusted below a threshold magnitude (4.2 for PGA, 3.8 for PGV) in order to provide a good fit to the Groningen data at smaller magnitude levels.	The adjusted part of the GMPE fits the observed Groningen PGA/PGV data.	The uncertainty of the GMPE in the smaller magnitude range ( $M < 4$ ) is (relatively to $M > 4$ ) small as it was fit to the observed Groningen data.	
Additional work is required to refine the local applicability of the selected GMPEs to the Groningen field and also to estimate the associated levels of epistemic uncertainty.	The Groningen database is small and has a limited magnitude range. Evaluation of epistemic uncertainty (rising from incomplete knowledge) is essential		A suitable model for the range of epistemic uncertainty should be developed.
Since currently only PGA and PGV are being predicted in the hazard analysis, it is important to take account of the fact that for most of the earthquakes considered in the hazard analysis, the duration of shaking will be short as a result of the small magnitude of these earthquakes.	Whether the duration of larger magnitude events is also short remains to be seen. Duration of Groningen events is already much larger than for Roswinkel events.	It cannot be excluded that the duration of shaking for larger events is larger than so far observed.	Monitoring of the duration of shaking and comparison with duration models based on other data to improve future seismic hazard estimates. The duration of shaking should become part of the seismic hazard assessment.
<b>8. The Hazard</b>			
A Monte-Carlo approach to Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) was identified as being best suited to the analysis of the Groningen field's induced seismicity.	For a statistical analysis, a Monte Carlo approach is indeed best suited.	In a Monte Carlo approach all uncertainties can be taken into account giving an accurate uncertainty range of the resulting analysis.	
Independent PSHA implementations in Python and C gave the opportunity for valuable cross checking of hazard estimates.	Cross-checking is important as the hazard estimates have a high impact.	An independent check on the implementation of a new algorithm minimizes unwanted errors.	

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

<p>Eurocode 8 has been adopted as a standard framework for the assessment of the seismic capacity of buildings in the Groningen field area. Consideration of PGA and PGV values corresponding to the 475-year return period specified in Eurocode 8 requires that a specific production period is chosen for calculating the annualized hazard due to the planned production and expected compaction.</p>	<p>Eurocode 8 is a standard framework and appropriate for assessment of seismic hazard in the Groningen area.</p>	<p>The annual hazard has to be calculated for a given production period.</p>	
<p>Predicted maximum ground motions with an average annual 0.2% chance of exceedance, for the 10 years of production from 2013 to 2023, are 22 cm/s (PGV) and 57% of g (PGA), located above the region of greatest reservoir compaction. These values were obtained using the modified form of the Akkar et al (2013) GMPE and by integrating over magnitudes from 1.5 to 6.5.</p>	<p>These values are average for the period 2013-2023. Annual hazard will be lower in 2013 and higher in 2023 if the assumption of an exponential increase in strain partitioning factor is correct.</p>	<p>Annual hazard is in particular sensitive to the behavior of partitioning coefficient.</p>	
<p>Direct comparisons with published 475-year hazard maps can be very problematic because such standard hazard maps generally impose a lower minimum magnitude limit than the <math>M=1.5</math> used here, such as <math>M=5</math> in California and <math>M=4.5</math> in Europe.</p>	<p>Seismic hazard maps for induced seismicity, so far, hardly exist for other fields than Groningen. 'Lower' should be replaced by 'higher'</p>	<p>Seismic hazard due to tectonic or due to induced events is difficult to compare.</p>	<p>Investigate the difference between seismic hazard due to tectonic and due to induced events.</p>
<p>Disaggregation of the hazard showed that the seismic hazard is dominated by events of intermediate magnitudes (<math>M = 4 - 5</math>). This contrasts with the maximum possible magnitude, <math>M = 6.5</math>, implied by the compaction-based seismicity model, showing that the induced seismic hazard is not well characterized by <math>M_{max}</math>.</p>	<p>The <i>physically</i> possible maximum magnitude <math>M=6.5</math> cannot occur. It is not used in the hazard analysis. The maximum <i>probable</i> magnitude, however, will have an impact on the seismic hazard.</p>	<p>Intermediate magnitudes will dominate the seismic hazard due to their probability of occurrence and the used GMPEs. The effect of a maximum <i>probable</i> magnitude event will be more extensive at least in affected area.</p>	<p>Examine the maximum <i>probable</i> magnitude and derive its impact in terms of seismic hazard.</p>

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

The most important uncertainty affecting the calculated hazard is the very large uncertainty in the coupling coefficient relating seismic moment budget to the volumetric strain due to compaction.	Note : by 'coupling coefficient' is meant 'strain partitioning coefficient'	The future behavior of the partitioning coefficient is uncertain	Focus further research on the physical basis of the partitioning coefficient
Sensitivity tests showed that the selection of a suitable ground motion prediction equation (GMPE) and the future production period chosen for calculating the annualized hazard had a strong influence on the resulting hazard estimates. Changes to the b-value however had limited impact on the calculated results.	GMPE and annual production will have a large impact on the annual seismic hazard.		
<b>9. The role of faults</b>			
The minimum horizontal stress is poorly constrained. No reliable data is available from the time before production started, while limited data is available under depleted reservoir conditions. Stress anisotropy is expected between different formations, but is not well established (except for the Zechstein formation). Both initial value and stress development as a consequence of depletion should be measured when having the opportunity (drilling of new wells, work overs).	Minimum horizontal stress is often poorly constrained.	This introduces more uncertainty on the criticality of the faults.	Relevant for new gas fields: try to measure initial stress and the development stress in gas fields at the start of production as well as several times during production.
Reservoir pore pressure in the Rotliegend reservoir is well established from production and observation wells, but there are areas in the field with poor well coverage. The main area of uncertainty is the pressure field over time in the underlying aquifer and in the overlying Ten Boer Claystone. Data acquisition is needed to reduce these uncertainties.	Pressure drop uncertainties in the underlying aquifer and the overlying Ten Boer Claystone introduce uncertainties in the compaction of the Groningen field and thereby in the estimation of seismic hazard.	Additional uncertainty in the total compaction of the field which gives additional uncertainty in the estimation of seismic hazard.	Pressure data acquisition in the over- and underburden is necessary.
Pore pressure evolution within faults is not known and cannot be measured in the subsurface. However, the impact of this process can be	2D geomechanical modelling will provide more insight into specific geomechanical issues such as pore		The results should be incorporated into the seismic hazard analyses where

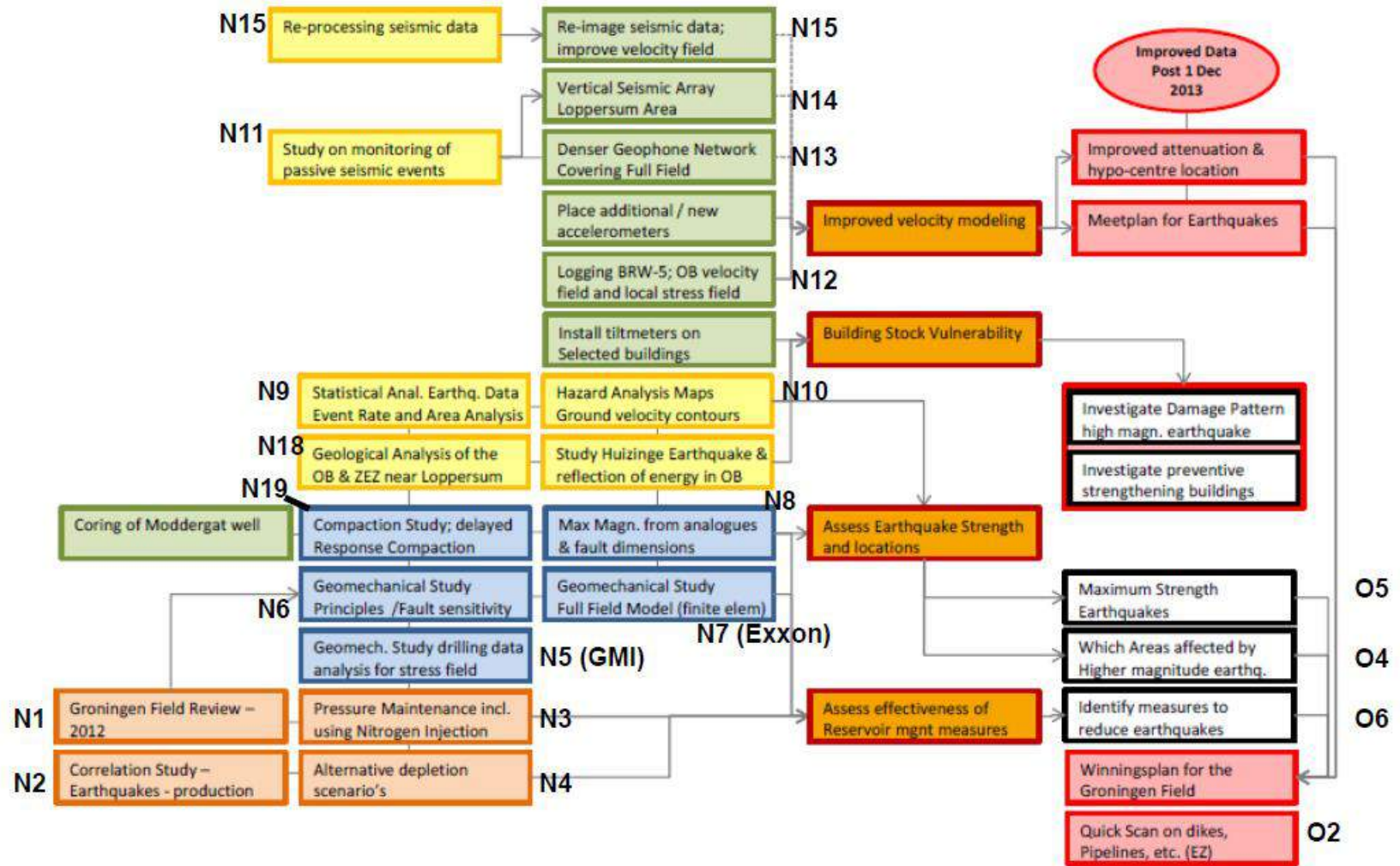
## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

evaluated through modeling. This is the objective of the ongoing vibration analysis study (2D evaluations).	pressure evolution within faults, but also constitutive behavior, behavior of the salt etc.		applicable.
The accuracy of determining hypocenter locations needs to be improved to differentiate between possible failure mechanisms. Both the installation of down hole geophones and additional shallow geophones fulfill this objective.	The improvement in hypocenter location accuracy will also help to determine the actual depths of the events as well as locations on existing faults	If the failure mechanism is known more accurate prediction may be possible in future.	Down hole geophones and additional shallow geophones should be installed.
Time-delayed compaction and other irreversible deformations that could delay or reduce fault slippage is the subject of ongoing research (KNAW, 2013).	Compaction has a much larger impact on seismic hazard than previously recognized.	Compaction is important for the determination of seismic hazard. Improved understanding of compaction theory will lead to improvement of assessment of seismic hazard.	The compaction model and time delay behaviour of compaction need to be studied using future subsidence measurements of levelling and, ideally, permanent GPS stations in order to correctly predict the future compaction and subsidence. New findings resulting from academic research should be incorporated as soon as possible in the future work related to the Groningen field.
Advanced 3D geomechanical modeling is carried out to investigate the stress evolution in and around the producing Groningen field and its relation to the reactivation of faults. The models also serve to evaluate the effects of different production scenarios in the framework of TBO research topic 6.	It is noted that this work will not be ready before the end of 2013. In future 3D geomechanical modeling is expected to give insight into these issues. However, uncertainties and simplifications in 3D modeling are such that conclusions have to be drawn carefully.		3D geomechanical modeling should be performed. The results should be incorporated into the seismic hazard analyses where applicable.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## Bijlage 2

### Earthquake Study and Data Acquisition Program – Dependency and Overview





## **Bijlage3: TBO Review of the NAM studies into the Seismic Hazard in the Groningen gas field**

### **Summary**

At the request of the Steering Group, the TBO (Technische Begeleidingscommissie Ondergrond) has reviewed the results of the studies carried out by NAM in 2013 into the seismic hazard caused by gas production from the Groningen field. The reviewers appreciate the quality and quantity of the work presented, also in view of the limited time period and the limited amount of data available for its execution. NAM has managed to pull together, at short notice, expertise available inside and outside of the NAM and Shell organisations. A novel seismology model has been developed relating induced seismicity in Groningen to the reservoir compaction resulting from the gas production.

The TBO notes the empirical nature of the presented findings and their reflection in the NAM seismicity model. The underlying physics is limited and needs to be extended by further studies and data. The introduction of a partitioning coefficient allows for the fact that only part of the accumulated strain energy is partitioned onto faults and released as seismic energy. This partitioning coefficient is an empirical parameter that can absorb or hide other physical processes not yet included in the model. The limited physical substantiation of the partitioning coefficient and the uncertainties in the limited data on which it is based, create considerable uncertainties on its further development. And hence on the development of seismicity for periods beyond a few years into the future. Some of these uncertainties may reduce over the coming years as new data and results from additional studies become available. Others will remain, as they are a consequence of the unpredictability of the occurrence of earthquakes.

In the opinion of the TBO it is shown by NAM that the observed phenomenon of increasing seismicity with increasing production is likely to continue for the coming years. And that, even when considering the large uncertainties, PGAs and PGVs may occur at a level and frequency that cause serious concern. The TBO agrees with NAM that the annual number of earthquakes and hence the annual hazard scales with the annual gas production. The TBO notes that the number of earthquakes during the total field life might reduce with lower production rates if time dependent relaxation mechanisms play a role. This aspect has not been investigated in depth.

A solid statistical and seismological analysis is made of the data from the Groningen field based on all registrations until October 2012. Based on its results, a workflow has been implemented that can be used to determine seismic hazard as a function of location and time under different Groningen gas production scenarios. First results are presented. Proper analysis and recognition of the large uncertainties in the obtained results are provided. The TBO is of the opinion that the analysis results in an empirical description of induced seismicity and the related seismic hazard to be expected in Groningen. It is made plausible that for the data analysed (until October 2012), the released seismic moment increases more or less exponentially with reservoir compaction. The TBO agrees with NAM that if this trend continues, the released seismic moment, the annual number of induced earthquakes and subsequently the probability of higher magnitude earthquakes in Groningen will increase. Under the assumption of a continued exponential increase, a PGA of above 0.57g is calculated

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

for an annual average 0.2% chance of exceedance between 2013 and 2023. The uncertainties in these predictions are very large and grow fast with time, in particular for predictions beyond a few years from now.

The TBO notes that the annual hazard will not be constant during the next 10 years. Initially the hazard will be lower, rising to higher values towards the end of the period. The TBO agrees that longer term (beyond ca. 2030) and depending on the future development of reservoir compaction, the hazard could gradually decrease again. The latter is a net result of the competing effects of increasing total compaction and decreasing annual production.

With respect to attempts to determine a maximum earthquake magnitude for Groningen it is noted that none of the three different methodologies as applied by NAM results in values below 5.5. However, the TBO doubts whether the methods used to arrive at an estimate of an upper limit to  $M_{max}$  are applicable to the case of Groningen. Furthermore, the presented values for *physically maximum possible* magnitudes cannot be compared to values of *probable* maximum magnitude. In any case,  $M_{max}$  is not relevant for the calculation of seismic hazard.

The main hazard (probability of a PGA above a given value) will result from earthquakes with magnitudes between 4.5 and 5.5 at hypocentral distances up to 10 km. Higher magnitudes contribute less to the hazard, mainly due to their lower probability combined with a saturation of ground motion amplitudes at these higher magnitudes.

The report does not show if and how it was examined to what extent the strain partitioning factor also depends on parameters other than compaction, such as e.g. the density of faulting, the production rate, or non-linear, time-dependent deformation behavior of rock salt of the Zechstein formation.

The TBO agrees with NAM that the reported findings imply the need for a strongly increased study and monitoring effort in combination with regular (annual) hazard assessment updates to feed a measurement and control loop as part of the seismic risk management system.

*Table 1: Summary of key uncertainties of the seismic hazard analysis identified by the TBO and proposed follow-up*

Key Uncertainty	Character	Consequence	Proposed follow-up
Development of strain partitioning coefficient	Lack of data  Lack of understanding of underlying physical mechanisms	Large uncertainty in future seismicity levels and in the PGA value corresponding to a 0.2% annual chance of exceedance	Test against different geomechanical models Study and include effects of initial stress state, fault density, fault orientation, deformation rate etc. though 3D geomechanical modelling. Improved monitoring of earthquakes (surface seismometers, accelerometers, borehole seismometers) Measurement and control loop
GMPE	Lack of data	Large uncertainty	Calibration with future data Full waveform modelling

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

Key Uncertainty	Character	Consequence	Proposed follow-up
Reservoir moment	Lack of data Lack of detailed studies Lack of accurate calibration	Large uncertainty in future seismicity levels and in the PGA value corresponding to an 0.2% annual chance of exceedance	Better determination of historical subsidence. Test alternative geomechanical models and compaction scenarios against the observed subsidence. Test impact of porosity model uncertainty
Impact of initial stress state, faults	Lack of data	Localisation of future events	3D geomechanical studies Better monitoring
Event density map	Limited data Uncertainty in porosity model	Localisation of future events	Monitor development over time Improve porosity model Incorporate effect of fault density on localisation
Impact of production and compaction rate on seismicity	Lack of data Lack of study	Unknown impact of production rate	Literature study on relaxation mechanisms, production/compaction rate dependence etc. (e.g. laboratory studies, field studies) Seek independent advice and review

## 1. Introduction

At the request of the Steering Group, the TBO (Technische Begeleidingscommissie Ondergrond) has reviewed the studies carried out by NAM in 2013 into the number and strength of earthquakes induced by gas production from the Groningen field. The work reviewed in this report is related to Research Question 5 and (to a limited extent) Research Question 6 raised by the Minister of Economic Affairs (Ref 1).

- Investigation 5: Maximum magnitude of earthquakes in the Groningen gas field  
 Investigation 6: Alternative production technologies to reduce the number and magnitude of the earthquakes (including the effects of production reduction)

Most of the results related to investigation 6 will be documented by NAM in a separate report to be reviewed by the TBO at a later stage. In the context of investigation 5, NAM commissioned a study by Bourne and Oates, from the Shell Technology Center in Rijswijk, into the seismic hazard for the Groningen Field. This review deals with this study, that has been documented in three preliminary reports made available to the TBO (Ref 2,3,4).

The work can be subdivided into the following main components:

1. An in depth statistical analysis of induced seismicity data registered in Groningen until October 2012
2. The development of a seismicity model linking released seismicity (total released seismic moment, location, magnitude and number of tremors) to the production induced volume changes resulting from compaction of the Groningen reservoir rock
3. Various attempts to derive a maximum possible magnitude for the induced earthquakes in Groningen

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

4. The calculation of the future seismic hazard by combining the above seismicity model with the predicted (amount and distribution of) future reservoir compaction and a Ground Motion Prediction equation (GMPE). Monte Carlo simulations are used to calculate probabilities of future peak ground velocities (PGV) and peak ground accelerations (PGA) associated with induced earthquakes of a given magnitude at a given location using the GMPE. From this PGV and PGA exceedance maps are generated

Main results of the TBO review are discussed in section 2. Details are provided in Appendix A, Table A1. An overall assessment of the consequences of the results according to the TBO is given section 3.

## 2. Review of NAM's technical work

In the opinion of the reviewers, a commendable effort has been made to document findings and results “on the go” as work progressed. It resulted in the availability of three evolving draft reports within a period of less than a year. In general a high quality of progress reporting was maintained, supplemented with regular opportunities for verbal clarification and in depth technical challenge.

The TBO review of the work related to each of the above mentioned four main components is detailed in Table A1. The first column summarises the main results presented by NAM. In the next two columns, TBO comments and potential consequences are listed. The fourth column lists the recommendations for follow-up where appropriate.

The TBO appreciates the quality and quantity of the work presented. Even more so when considering the limited time period and the limited data available for its execution. The authors have managed to pull together, at short notice, expertise available inside and outside of the NAM and Shell organisations. They have developed a novel seismology model relating induced seismicity in Groningen to the reservoir compaction resulting from the gas production.

A solid statistical and seismological analysis is made of the data of induced earthquakes registered until October 2012, resulting in a workflow that can be used to determine seismic hazard as a function of location and time under different production scenarios. This workflow has been implemented for application to the Groningen field. First results are presented. Analysis and recognition of the large uncertainties in the obtained results is provided.

The case is convincingly made that the engine behind the induced seismicity is closely related to reservoir (differential) compaction caused by gas production.

With respect to attempts to determine a maximum earthquake magnitude for Groningen it is noted that none of the different methodologies as applied by NAM results in values below 5.5. However, the TBO doubts whether the methods used to arrive at an estimate of an upper limit to  $M_{max}$  are applicable to the case of Groningen. As an example, unrealistic values for the aspect ratio of available fault dimensions were assumed in the finite fault size limit method. Reduction to more accepted values reduces the maximum magnitude estimates to 4.5. Furthermore, the presented values for the *physically maximum possible* magnitude cannot be compared to values of *probable* maximum magnitude.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

In any case,  $M_{max}$  is not relevant for the calculation of seismic hazard. The authors did not use maximum magnitude as a hazard parameter in their analysis. This was replaced by the total available seismic moment in the Monte Carlo calculations. It is made plausible that maximum magnitude is not a suitable hazard indicator as the main hazard (probability of exceeding a given PGA) will come from earthquakes with magnitudes between 4.5 and 5.5 at hypocentral distances of up to 10 km. Higher magnitudes contribute less to the hazard, mainly due to their lower probability of occurrence combined with a saturation of ground motion amplitudes at these higher magnitudes.

The report does not show if and how it was examined to what extent the strain partitioning factor also depends on parameters other than compaction, such as e.g. the density of faulting, the production rate, or non-linear, time-dependent deformation behavior of rock salt of the Zechstein formation.

### 3. Assessment of consequences

The TBO notes the empirical nature of the presented findings and their reflection in the NAM seismicity model. The underlying physics is limited and needs to be extended by further studies and data analysis. For instance initial stress state, presence of (large) faults, fault density and compressibility contrasts between reservoir and overburden are currently not accounted for in the NAM seismicity model. The introduction of a partitioning coefficient allows for the possibility that only part of the accumulated strain energy is partitioned onto faults and released as seismic energy. The partitioning coefficient is an empirical parameter that can absorb or hide other physical processes not yet included in the model, e.g. those mentioned above or an intrinsic dependence on compaction rate. The exponential dependence on compaction can be the result of inadequate porosity and/or compaction models. The limited physical substantiation of the partitioning coefficient and the uncertainties in the modest amount of data on which it is based, create considerable uncertainties on its further development and hence on the development of seismicity for periods beyond a few years into the future as recognised by NAM. Some of these uncertainties are expected to reduce over the coming years as new data and results from additional studies become available. Others will remain as they are a consequence of the statistical nature of earthquake occurrence.

Nevertheless, the phenomenon of increasing seismicity with increasing production is likely to continue for the coming years. Even when considering the large uncertainties, reported PGAs and PGVs and their probabilities are at a level that causes serious concern. The TBO agrees with NAM that this justifies a strongly increased study and monitoring effort in combination with regular (annual) risk assessment updates to feed a measurement and control loop as part of the seismic risk management system.

The TBO is of the opinion that the study carried out by NAM results in an empirical description of induced seismicity and related risks to be expected in Groningen. Given the assumed linear relation between gas production, reservoir compaction and released seismic moment, the annual number of earthquakes and therefore also the annual hazard of larger earthquakes scales with annual gas production. A twofold increase in annual production would result in a doubling of the annual number of earthquakes. Equally, halving the production rate would halve the annual number of earthquakes. The TBO notes that the number of earthquakes during the total field life might reduce with lower production rates if time dependent relaxation mechanisms play a role, e.g. if the seismic partitioning coefficient also depends on compaction rate. The TBO considers this a shortcoming to be addressed

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

urgently given the discussions on the use of the gas production rate for mitigation of the seismic hazard.

It is made plausible that, for the data analysed (until October 2012), the released seismic moment increases more or less exponentially with the available moment due to reservoir compaction. The TBO agrees with NAM that if this trend continues the released seismic moment, the annual number of induced earthquakes and the probability of higher magnitude earthquakes and high PGAs in Groningen will increase significantly over the next 20 years. Under the same assumption of a continued exponential increase, a PGA of above 0.57g is calculated for an average annual 0.2% chance of exceedance between 2013 and 2023.

The TBO notes that the annual hazard of exceedance will not be constant during the next 10 years. Initially the hazard will be lower, rising to higher values towards the end of the period. The TBO agrees that longer term (beyond ca. 2030) and depending on the future development of reservoir compaction, the hazard could gradually decrease again. The latter is a net result of the competing effects of increasing total compaction and decreasing annual production.

The TBO agrees with NAM that the quantitative uncertainties in all these predictions are large and that these uncertainties grow fast for predictions beyond a few years.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## 4. Critical issues and uncertainties in NAM's workflow

The following workflow is used by NAM to calculate the seismic risk for Groningen. It can be applied to different production scenarios:

- 1 Calculate reservoir compaction as a function of location and time for a given production interval.
- 2 Calculate the total reservoir moment available at a given time using the Kostrov equation and the calculated reservoir compaction field.
- 3 Calculate the total seismic moment using a single random independent sample from the total seismic moment distribution (defined by the distribution of the strain partitioning coefficient) for the given production interval.
- 4 Calculate the seismic event density map given the reservoir compaction for a given area and production interval as well as the statistical distribution of the strain partitioning coefficient. Select event locations taking into account the event density map under 4)
- 5 Draw a magnitude for each event using an appropriate Bounded Gutenberg Richter relationship. The upper bound is given by the maximum available seismic moment from 3)
- 6 Continue with steps 4 and 5 until the seismic moment calculated under 3) has been (almost) consumed
- 7 Calculate PGVs and PGAs for all resulting events at each observation point, using a random draw of GMPE equation parameters within their uncertainty.
- 8 Count the number of times a given PGV of PGA is exceeded for a range of thresholds.
- 9 Repeat all of the above steps until the stochastic error in the results becomes acceptable.

The above steps are discussed in more detail below, together with the key assumptions, recognised uncertainties and recommendations for follow-up, as seen by the TBO.

Step 1	Calculate reservoir compaction as a function of location and time for a given production interval (not part of the reviewed reports)
Description	Subsurface compaction is calculated by calibrating the geomechanical subsidence model against the observed surface subsidence between 1964 and 2013. For this, use is made of the static and dynamic reservoir models in combination with a geomechanical model calibrated against lab data and field history. This results in a subsurface compaction grid at reservoir level. Reservoir simulations are subsequently run to calculate future pressures under different production scenarios. These are then used to calculate reservoir compaction for each grid block as a function of location and time.
Key uncertainties	<p>1.1 The calculated reservoir compaction depends on the geomechanical model used. For the three models considered (the bi-linear, pressure decay and isotach/rate-type models) comparable fits with the historically measured subsidence can be achieved. A decision on which model to use cannot be made based on the fits obtained. The different models lead to significant differences in calculated future compaction, in particular for later times. Predicted subsidence during the field production period in the deepest point of the bowl varies between 42 and 65 cm depending on the compaction model chosen. Similar differences can be expected for the underlying compaction numbers. Impact on PGA exceedance risk maps will be large.</p> <p>1.2 The criteria used to decide which scenario gives the best fit to the measured “raw” geodetic levelling data (changes in height between individual benchmarks) has a significant impact on the parameter calibration for the geomechanical model and thereby on the calculated future compaction and subsidence</p> <p>1.3 The underlying static porosity model has a large impact on the underground lateral distribution of the reservoir compaction and therefore on the seismic risk maps. Uncertainties in the porosity distribution could be considerable as indicated by local misfits between measured and observed subsidence (e.g. around Delfzijl). The lateral variations in the porosity model seem rapid given the limited well control.</p>

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

	<p>1.4 The subsidence data needs to be consistent. This means proper integrated analysis of all measurements of height differences for all time intervals in order to avoid artefacts of the processing. In addition, uncertainties in the measurements should be accounted for properly in the analyses. Given the long time span of Groningen measurements and the large areal extent this is not trivial, and can significantly impact the parameter calibration of the compaction model. Alternatively a methodology could be developed where only the directly measured changes in height differences between pairs of benchmarks are used to calibrate the geomechanical models (see 1.2).</p> <p>1.5 The impact of different production scenarios</p>
Consequences	Uncertainties 1.1, 1.2 and 1.4 result in large uncertainties in the predicted seismicity level at later times (more than a factor 10 in the annual number of earthquakes. Uncertainty 1.3 can have a significant impact on the predicted localisation of the calculated seismic risks. Uncertainty 1.5 will have a large influence on the time evolution of the seismic risk.
Recommendation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Improved subsidence monitoring, including continuous 3D GPS.</li> <li>2. Development of improved technology to test competing geomechanical models against the evolution of benchmark height differences measured in the field.</li> <li>3. NAM to test validity and uncertainty range of the present porosity model.</li> <li>4. Re-processing of all available subsidence information in an integrated manner.</li> <li>5. Subsidence calculations under different production scenarios</li> <li>6. Development of low, expectation and high case compaction scenarios and calculation of the corresponding PGA exceedance risk maps</li> </ol>

<b>Step 2</b>	<b>Calculate the total reservoir moment available at a given time using the Kostrov equation and the calculated reservoir compaction field</b>
Description	The total reservoir moment is assumed to be a function of the strain at a given time. The total reservoir moment in a time span is given by the change in strain moment during this time span.
Key uncertainties	<ol style="list-style-type: none"> <li>2.1 The uncertainties in the calculated compaction equally apply here.</li> <li>2.2 Some questions can be raised on the applicability of the Kostrov equation. As faults and shear failure are likely to play an important role, it could well be that the partitioning coefficient increases with increasing shear strain, not with bulk strain (Kostrov).</li> </ol>
Consequences	As a result of uncertainties 2.1 and 2.2, the total reservoir moment could be up to two orders of magnitude higher or lower towards the end of the production period. The impact on seismic magnitudes will be limited given the logarithmic relation between magnitude and seismic moment. The probability of such higher magnitude events will increase or decrease proportionally with the change in total reservoir moment.
Recommendation	Continued monitoring and processing of subsidence (data) is necessary in order to assess the development of the total reservoir moment.

<b>Step 3</b>	<b>Calculate the total seismic moment using a single random independent sample from the total seismic moment distribution (defined by the distribution of the strain partitioning coefficient) for the given production interval.</b>
Description	The step determines the fraction of the total reservoir moment at the end of the production interval that will be realised through induced seismicity. The uncertainty in the strain partitioning is accounted for by drawing a sample from its derived distribution as a function of reservoir compaction.
Key uncertainties	3.1 The strain partitioning coefficient behaviour with increasing compaction is incorporated in this step. It is assumed that an extrapolation of the past behaviour is valid. Whether or not the resulting further exponential increase in the strain partitioning factor with increasing compaction will occur is uncertain.
Consequences	The exponential increase in the strain partitioning factor, with its large and increasing uncertainty band width, as currently implemented by NAM, results in an escalation of the predicted seismic moment with time, eventually approaching the total reservoir moment. Thus, the predicted seismic hazard escalates dramatically over time. And even more so if compaction increases beyond presently predicted values, which given the uncertainties in these, is possible.



## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

Recommendation	Check the relation between the partitioning coefficient and compaction under a range of compaction models and under different compaction scenario's Proper monitoring and regular (annual?) reassessment of the strain partitioning factor as part of a measurement and control management system.
----------------	---

<b>Step 4</b>	<b>Calculate the seismic event density map given the reservoir compaction for a given production interval and the statistical distribution of the strain partitioning coefficient.</b>
Description	Calculate the seismic event density for a production interval using the reservoir compaction and the distribution of the partitioning coefficient which determines the amount of seismic energy released.
Key uncertainties	4.1 The event density may fluctuate with time due to aspects other than reservoir compaction., e.g. the impact of the triggering mechanism for which fault density, fault orientation within the stress field, etc. become important. These aspects are currently not included in the calculation of the event density map.
Consequences	The event density in certain areas may be over- or underpredicted. This influences the areal distribution of the ultimately derived PGAs and PGVs.
Recommendation	Proper monitoring of the areal distribution of the future seismic events and frequent reassessment of the event density distribution. More study into the significance of fault density, fault orientation and fault geometry as well as the subsurface stress regime.

<b>Step 5</b>	<b>Select event locations taking into account the event density map under 4)</b>
Description	For each event a location is randomly drawn on the basis of the event density map.
Key uncertainties	5.1 The event locations are drawn independent of the magnitude of the event (as these are derived in step 6). Hence large magnitude events could occur in locations with low event density. 5.2 The impact of initial stress state, fault density and compressibility contrasts is not taken into account in the derivation of the event density map.
Consequences	Large magnitude events may be predicted for areas with limited compaction, while they are unlikely to occur at those locations based on the underlying model which predicts seismicity onwards from compactations of 10-20 cm.
Recommendation	Adjust procedure to exclude the possibility of larger magnitude events occurring in low event density areas. Make an effort to incorporate effects of initial stress state, fault density, compressibility contrasts

<b>Step 6</b>	<b>Draw a magnitude for each event using an appropriate Bounded Gutenberg Richter relationship. The upper bound is given by the maximum available seismic moment from 1) and 3)</b>
Description	The Bounded Gutenberg-Richter relationship is used to derive a magnitude for each event. The upper bound in the relationship is the magnitude belonging to the total seismic moment resulting from steps 1 and 3 being released in a single event. The resulting energy distribution for a catalogue of events is a Pareto distribution.
Key uncertainties	6.1 The procedure assumes a stationary b-value of 1 in the Bounded Gutenberg-Richter relation. The possible non-stationary character of the b-value, which allows for more larger magnitude events to occur with time, relative to the total number of events, is not included. This may lead to a (limited) further escalation of the seismic hazard.
Consequences	Seismic risk may be underestimated with time.
Recommendation	Regular re-assessment of the non-stationary character of the b-value as part of a measurement and control management system.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

<b>Step 8</b>	<b>Calculation of PGVs and PGAs for all resulting events at each observation point</b>
Description	The adapted Akkar et al. relations are used to compute PGA and PGV for each of the events in the resulting catalogue of step 7 in each observation point.
Key uncertainties	8.1 This procedure assumes that the chosen GMPE is also valid for the larger magnitudes, while there is no calibration possible for Groningen since the larger magnitudes have not occurred in the area. This remains to be seen as the present shape of the relationship at higher magnitudes is based on data from tectonic rather than induced events
Consequences	GMPE for the higher magnitudes may be underestimated or overestimated for the specific area.
Recommendation	Regular re-assessment of the PGA/PGV relation calibrated for the Groningen area.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## Conclusions

1. A solid and thorough statistical analysis is made of the Groningen earthquake data registered until October 2012, resulting in a workflow which can be used to determine seismic risk as a function of location and time under different production scenarios. This workflow has been implemented for application to the Groningen field. First results are presented. Proper analysis and recognition of the large uncertainties in the obtained results is provided.
2. The case is convincingly made that the engine behind the induced seismicity is closely related to reservoir compaction resulting from gas production.
3. It is made plausible that the phenomenon of increasing seismicity with increasing production is likely to continue for the coming years.
4. It is made plausible that for the data analysed (until October 2012) the released seismic moment increases more or less exponentially with the available moment due to reservoir compaction. If this trend continues released seismic moment, annual number of induced earthquakes and maximum observed magnitude will increase significantly over the next 20 years.
5. Even when considering the large uncertainties, reported PGAs and PGVs and their probabilities for the coming years are at a level that causes serious concern.
6. The TBO notes the empirical nature of the presented findings and their reflection in the NAM seismicity model.
7. The partitioning coefficient is an empirical parameter that can absorb or hide other physical processes such as intrinsic compaction rate dependence. The observed exponential dependence on compaction could be the result of inadequate porosity and/or compaction models. The TBO is of the opinion that this needs to be addressed at short notice given the important discussion on the impact of production rate.
8. The limited physical substantiation of the partitioning coefficient and the uncertainties in the data on which it is based, create considerable uncertainties on its further development and hence on the development of seismicity for periods beyond a few years into the future.
9. Initial stress state, presence of (large) faults, fault density and the compressibility contrast between reservoir and overburden are not accounted for in the NAM seismicity model while they are expected to play a role in deterministic hazard studies.
10. With respect to attempts to determine a maximum earthquake magnitude for Groningen it is noted that none of the three different methodologies as applied by NAM results in values below 5.5. However, the TBO doubts whether the methods used to arrive at an estimate of an upper limit to  $M_{max}$  are applicable to the case of Groningen. Furthermore, the presented values for physically maximum possible magnitudes cannot be compared to values of probable maximum magnitude. In any case,  $M_{max}$  is not relevant for the calculation of seismic hazard.
11. Given the link between gas production, compaction and released seismic moment, the annual number of earthquakes and the annual risk of larger earthquakes scales with gas production rate.
12. After 20 years, seismic hazard could gradually decrease as a net result of the competing effects of increasing total compaction and decreasing production rates.
13. Under the same assumption of a continued exponentially increasing seismicity PGA's of 0.57g are calculated at 0.2% annual chance of exceedance during the next 10 years (average for the 10 year period). The TBO notes that the annual hazard of exceedance will not be constant during the next 10 years. Initially the hazard will be lower, rising to higher values towards the end of the period.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

14. The TBO notes that the uncertainties in all these predictions are large and that these uncertainties grow fast for predictions beyond a few years as acknowledged in the reviewed studies. Some of the uncertainties may be reduced over the coming years as new data and results from additional studies become available. Others will remain as they are a consequence of the unpredictability of the occurrence of earthquakes.
15. The TBO supports the conclusion by NAM to strongly increase the study and monitoring effort in combination with regular (annual) risk assessment updates to feed a measurement and control loop as part of the seismic risk management system.

## References

1. Brief aan de Tweede Kamer: Toezending stukken naar aanleiding van gedane toezeggingen in Algemeen Overleg gaswinning Groningen, 11 februari 2013, Overheidsidentificatienr. 00000001003214369000
2. S.J. Bourne, S. Oates. Probability of an earthquake greater than magnitude 4 due to gas production from the Groningen field, 14 December 2012
3. S.J. Bourne, S. Oates. Induced strain and induced earthquakes within the Groningen Gas Field: Earthquake probability estimates associated with future gas production, 29 April, 2012
4. S.J. Bourne, S. Oates. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for the Groningen Field (Part III), July 2013

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## Appendix A

**Table A1 TBO review of the main individual components of the NAM technical work**

<b>1. Statistical analysis of the historical Groningen induced seismicity data set</b>			
<b>NAM results</b>	<b>TBO comments</b>	<b>Consequences</b>	<b>Follow-up (NAM)</b>
An in depth statistical analysis of the historical Groningen induced seismicity data set shows that it can be described reasonably well with a Gutenberg Richter distribution for the estimation of recurrence rates and magnitude distribution.	The provided statistical seismological analysis is extensive and of high quality. The authors follow the Monte Carlo approach consistently for determining the future seismic hazard including uncertainty.	No issues with provided statistical analysis	Periodic re-assessment
The missed fraction of the released seismic moment has reduced from an initial value of around 50% in the mid-nineties to less than 3% presently.	This is due to the initially small amount of higher magnitude events with higher magnitude events increasing over time.	Total released seismic moment can be monitored accurately.	None
The statistical analysis confirms that seismic moment in Groningen follows a Pareto distribution and that total seismic moment is a Pareto sum distribution.	The TBO agrees that the cumulative seismic moment is a Pareto distribution, primarily caused by the orders of magnitude difference in released seismic moment between small and large events. The resulting distribution is long tailed where most of the total moment of all events is due to the largest events.	The long tail causes the large error bars in estimations of future seismicity. Defining an upper bound for the future seismicity is difficult and uncertain by nature.	Intrinsic problem that cannot be resolved.
No maximum possible magnitude $M_{max}$ can be derived from the statistical analysis of the Groningen data set.	Larger earthquakes with a magnitude above 3.9 cannot be excluded in Groningen.	This implies that there is no statistical bound on the magnitude.	None
The statistical analysis shows that there is no basis for justifying the additional parameter ( $M_{max}$ ) in a Bounded Gutenberg-Richter (BGR) approach as all values for $M_{max}$ above 3.9 are equally likely.		There is no advantage to using a BGR approach in Groningen as $M_{max}$ is not known.	None

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up (NAM)
A b-value of 1 controls the probability of larger relative to smaller earthquakes for the Groningen field as a whole. There are indications for a decrease in b with increasing compaction from the local time evolution of b.	This confirms the non-stationarity of the seismicity in Groningen. It is not fully clear which methodology is applied to calculate b-values and if this could impact the calculated changes.	A decrease in b will give rise to more larger earthquakes relative to the total number or earthquakes as production continues.	Check validity of applied method to calculate b. Monitor and re-assess b value change over time.
Under the assumption that magnitudes follow a Gutenberg-Richter distribution with a b = 1 and a magnitude of completeness Mmin of 1.5, the probability of at least one earthquake exceeding magnitude 4.0 during the next 30 locatable earthquakes in Groningen is 0.09 (with a 68% confidence limit of 0.02 to 0.20).			
Not all observed events are independently distributed. Removal of 31 events occurring within 3 days of a previous event resolves this issue.	Some of the events thus removed are at large (>10 km) distance from the independent event. The 3-day period is considered arbitrary.	Minor effects only.	
There is no evidence that the amount of gas produced between consecutive events increases when gas production is lower. From this it is concluded that the number of earthquakes during the lifetime of the field will be independent of production rate.	Pore pressure diffusion effects following summer-winter swings in production rate cause different phase shifts for different parts of the field depending e.g. on the distance to the nearest well. This may have a large disturbing effect on the analysis.	No conclusions on rate sensitivity can be drawn from the results obtained.	Re-address, taking pore pressure diffusion and long term production rate variations into account.

### 2. Development of a model linking seismicity to production induced volume changes (=compaction)

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
There is significant evidence that the release of seismic moment per unit production escalates with increasing production.		Numbers and magnitudes of induced earthquakes will be significantly higher than previously recognised.	Monitor and re-assess over time.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up (NAM)
The occurrence time and areal position of earthquakes in Groningen are consistent with the temporal and areal distribution of bulk reservoir volume changes.	This indicates that the increase in compaction drives the induced seismicity. Other mechanisms such as initial stress state, differential compaction and presence and orientation of faults are likely relevant but not included in the present empirical seismicity model. These could also explain some of the observed variations over the field.	Prediction of future behaviour for areas with hitherto low seismicity is difficult as uncertainties are large and other factors have not been taken into account.	Improved monitoring and regular re-assessment based on new data.
The temporal and areal distribution of bulk reservoir volume changes can be calculated with an equation given by Kostrov.	The Kostrov equation is simplified by the authors. The shear strain terms are neglected while these might be driving the seismicity. The approach might work in first approximation if shear strain scales with the compaction.	The spatial distribution of shear strain is different from that of compaction. This has an impact on the spatial distribution of hazard.	Introduce the effect of shear strains by incorporating faults into the model.
The total bulk volume reservoir change approximately scales with the cumulative volume of gas production.	The assumption of a linear relation between compaction and production is an approximation and e.g. not valid for the period preceding 1995. Future compaction could well be higher. This can change the relationship between partitioning coefficient and compaction.	The dependence of the strain partitioning coefficient on compaction could change considerably.  Uncertainties in past and future compaction will have a large impact on the calculated seismic hazard.	NAM to repeat the analysis using alternative compaction models and a range of compaction scenarios.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up (NAM)
<p>The major factor governing the onset and the amount of seismicity is the compaction in the reservoir. The almost a-seismic northern and southern part of the Groningen field are due to either low depletion with a thick reservoir section in the north or large depletion with a thin reservoir section in the south.</p>	<p>The TBO concurs with the observation that the onset of seismicity so far corresponds to a compaction larger than 10 cm and smaller than 20 cm for the linear compaction model.</p>	<p>Prediction of future behaviour for areas with hitherto low seismicity is uncertain.</p>	<p>Improved monitoring and regular re-assessment based on new data. Incorporate outcomes of the Geomechanical study as they become available.</p>
<p>The fraction of induced strain accommodated by earthquakes is likely increasing with increasing reservoir compaction. This is consistent with the observed temporal and areal distribution of earthquakes. In the seismicity model this is accommodated by the introduction of a strain partitioning coefficient, increasing <u>exponentially</u> with increasing compaction. This finding is based on an areal analysis of the distribution of cumulative seismicity and cumulative reservoir compaction in 2012. The derived exponential increase of the partitioning coefficient (fraction of total reservoir moment released as earthquakes) with increasing compaction is supported by the time history of the induced seismicity in Groningen between 1995 and 2012.</p>	<p>The TBO considers this a credible approach for the short term but notes that uncertainties grow fast with time. Whether the strain partitioning factor will continue to increase in the future remains to be proven by continued monitoring. The partitioning coefficient allows for the possibility that only some of the strain is partitioned onto faults. To some extent, it is a fit factor that can be used to absorb/hide data inadequacies or other physical processes such as an intrinsic rate dependence.</p>	<p>Only, if the present trend continues, the annual number of earthquakes and the risk of larger magnitudes will increase significantly over the coming ten years.</p>	<p>Improved monitoring and regular re-assessment based on the new data.</p> <p>Investigate the influence of other credible physical mechanisms on changes in the strain partitioning coefficient over time and space.</p>
<p>The present fraction of bulk reservoir volume changes accommodated by seismic slip is about 0.1%.</p>	<p>Seismic slip does not accommodate bulk volume change. Seismicity can scale with increasing (differential) compaction.</p>	<p>Limited for overall seismicity but possibly significant for areal distribution.</p>	<p>Improved monitoring and regular re-assessment based on the new data.</p>



## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up (NAM)
If the above trends continues with future production than the footprint of the earthquakes will continue extending from the centre towards the edges of the field with continued localisation of the abundance of the earthquakes in the regions with the largest compaction (centre of the field).	The model used by Bourne and Oates does not take the presence or absence of faults into account. It is implicitly assumed that there will always and everywhere be enough faults present to seismically release the increasing fraction of the reservoir moment generated by the increasing compaction. Smaller faults not seen on seismic are sure to exist. Larger events will have to occur on the larger faults or on a fault network present in the field. The criticality of faults and Coulomb stress transfers onto the faults are not taken into account. Knowledge about the geomechanics of faults is not incorporated.	Local fault density is likely to influence the future localisation of earthquakes, in particular for larger magnitudes.  The criticality of the faults will determine whether the shear stresses on the faults are sufficient to induce earthquakes.	Integrate the B&O statistical approach with geomechanical modelling to investigate if fault density can be incorporated in the model  idem
Total bulk reservoir volume change approximately scales with the cumulative volume of gas production	Non-linear and/or delayed compaction is observed in many fields in the Netherlands including the Groningen field. This will change the derived compaction dependence of the fault strain partitioning coefficient and the PGA exceedance maps.	Possibly large, needs to be checked.	Investigate the impact of non-linear compaction models (e.g. delayed compaction, rate type compaction).
There is a 1 in 2 chance of an earthquake with $M > 4.3$ , a 1 in 10 chance of $M > 4.9$ and a 1 in 100 chance of $M > 5.4$ before the end of 2023. For the total remaining field life these numbers are 1 in 2 for $M > 4.5$ , 1 in 10 for $M > 5.4$ and 1 in 100 for $M > 5.8$ . All under the assumption that the results of the present analyses can be extrapolated into the future	Uncertainties in these numbers are large and grow fast at later times.	These findings imply the need for a measurement and control loop based seismic risk management system for Groningen.	Develop a measure and control loop based seismic risk management system.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

3. Maximum possible magnitude of induced earthquakes in the Groningen field			
NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
Of the various methods (see 1-6 below) used to derive an upper limit for the maximum possible magnitude of the induced earthquakes in Groningen (Mmax), none yields values below 5.5	See below.  There will be an upper limit, but its value cannot be derived from the applied methodologies.	A value for Mmax cannot be determined.	None
<b>1. Finite strain limit method</b> (Bourne and Oates Groningen seismicity model) The maximum possible magnitude on the basis of the maximum available reservoir moment (calculated from the predicted reservoir volume change/compaction) is in the order of 6.5.	An earthquake in which all reservoir moment is released in a single event is highly unlikely, but can theoretically not be excluded.	High magnitude events cannot be excluded on the basis of finite strain.	None
<b>2. Monte Carlo method</b> A Mmax cannot be derived from the statistical analysis of the Groningen data set.	But is also not necessary in the Monte Carlo method. Instead of Mmax the available seismic moment is used.	A bounded Gutenberg-Richter (BGR) relation cannot be deduced for the Groningen events. This implies that there is no statistical bound on the magnitude.	None
<b>3. Energy method</b> Estimating Mmax from the fluctuations in the historical plot of released cumulative seismic moment vs time is not reliable.	There is no justification to assume that future fluctuations will not exceed historical fluctuations.	Energy method cannot be used to estimate Mmax in Groningen.	None
<b>4. Finite fault size limit method</b> Calculation of Mmax based on the maximum fault sizes in Groningen gives a value around 5.8.	If lagging compaction due to build-up of shear stress on faults (and not total compaction) drives the maximum magnitude, it will be smaller than the 5.8 reported. Also, the height of the faults that can move could be more limited than assumed while the high aspect ratio fault movements required for magnitudes above 5.0 are probably not realistic (see comments external reviewer). Assumption of a more realistic aspect ratio lowers the Mmax.	Magnitudes above 5.0 cannot be excluded based on the finite fault size limit, but this requires a larger fault width than the assumed 0.3 km.	Geomechanical calculations to assess which strain drives seismicity, the impact of aspect ratio and the height of faults that can move.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up (NAM)
<b>5. Finite mass limit method</b> Applying the upper limit of the Klose correlation between reduced mass and magnitude to Groningen suggests an Mmax of around 6.0.	TBO has doubts about the analyses made by Klose and its applicability to Groningen. Especially high magnitude examples are most likely triggered.	The Klose method cannot be used to estimate Mmax for Groningen.	None
<b>6. Rule of thumb methods</b> These methods should be considered unreliable	These methods are not applicable for Groningen as they assume stationarity and sufficiently long observation periods.	Rules of thumb methods are not to be used to estimate Mmax in Groningen.	

4. Calculation of the future seismic hazard			
NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
Disaggregation shows that the main contribution to the seismic risk comes from earthquakes with magnitudes between 3.5 and 5.5 at hypo-central distances of up to 10 km.	Higher magnitudes have less influence on the risk mainly due to their lower probability of occurrence combined with a saturation of ground motion amplitudes for these higher magnitudes. The risk is therefore not mainly determined by the maximum magnitude.	Maximum magnitude is not an appropriate means of characterising the seismic hazard. Risk reduction is most effective by focussing on the less rare intermediate magnitude events ( $3.5 < M < 5.5$ ).	Monitoring is needed to check future development against present expectations.
Monte Carlo based ground motion prediction maps for 0.2% chance of exceedance are provided for a number of production scenarios and production periods.	Initial outcomes suggest PGAs and PGVs at a level that causes serious concern. Exact procedure to calculate seismic catalogues is not fully clear to the TBO.	No definitive numbers are available at this moment.	Further work needs to be done at short notice.
Sensitivities are provided for the impact of GMPE magnitude scaling and GMPE uncertainty scaling, switching GMPE, reference period and b-value. Some of these uncertainties turn out to have a major influence of the results.	Uncertainties need to be reduced where possible e.g. through monitoring. Unfortunately some uncertainties are intrinsic (stochastic) and will remain large.	Uncertainties will remain large.	Monitoring in order to reduce uncertainties in future, where possible.  Full wave form modelling to

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up (NAM)
			<p>Provide a physical basis for the GMPE.</p> <p>Study of intrinsic uncertainty in order to ascertain if reduction is feasible.</p>
<p>Application of a Eurocode 8 type approach is difficult given the non-stationary character of the induced seismicity in Groningen.</p>	<p>A topic for the TBB to comment on.</p>		
<p>The presented event density map shows that the area of high seismic risk will remain localised around the present area of highest seismicity.</p>	<p>Differences in gas pressure will remain limited over the field life. Hence the spatial distribution of the compaction is determined by the geometry (reservoir thickness) and rock properties (compressibility as derived from porosity). The relative increase in compaction will therefore be the same in all areas of the field with some exceptions due to pressure drop delays in some poorly connected areas of the field. The increase in compaction could result in an increase in the absolute risk towards the edge of the field, even when the largest risk remains in the center.</p>	<p>The relative risk remains the same as now. The absolute risk will increase which will have an impact on the risk of the region.</p>	<p>The impact of higher magnitude events at the edges of the Groningen field (e.g. Groningen city and Industry Delfzijl) should be addressed as well.</p>
<p>There are large uncertainties in the translation of PGAs and PGVs into risk using the location of buildings and building fragility curves. In particular due to the effect of ground motion duration and the lack of calibration data in Groningen for higher magnitude earthquakes.</p>	<p>This translation is important and should be approached in a manner similar to the derivation of PGAs/PGVs in order to properly include uncertainty and obtain proper personal and group risk estimates.</p>	<p>The estimation of seismic risk due to gas production of Groningen is dependent on many uncertain variables. The outcome will give a large range of possible risk scenarios.</p>	<p>Seismic risk to be calculated with Monte Carlo to obtain proper personal and group risk estimates taking the uncertainties into account.</p>

## Bijlage 4 TBO Review of the geomechanical studies of the Groningen gas field

### 1. Introduction

At the request of the Steering Group, the TBO (Technische Begeleidingscommissie Ondergrond) has reviewed the results of the geomechanical studies carried out by, NAM, as part of the NAM/Shell studies to address investigation 5. The work reviewed in this report is related to Research Question 5 raised by the Minister of Economic Affairs.

Investigation 5: Maximum magnitude of earthquakes in the Groningen gas field

In the context of investigation 5, NAM commissioned a geomechanical study to provide geomechanical insight into the occurrence of seismicity due to the depletion of the Groningen field. The work reviewed has been documented by a draft report of and several presentations made available to the TBO.

1. P. A. J. van den Bogert. Fault stability assessment Groningen field, presentation May 2013.
2. P. A. J. van den Bogert & R. M. H. E. van Eijs. Fault stability assessment for the Groningen Field, draft report July 2013.
3. P. A. J. van den Bogert. Second TBO workshop on Induced seismicity in the Groningen field : Fault stability analysis, presentation July 2013
4. P. A. J. van den Bogert, R. M. H. E. van Eijs, O. van der Wal. Update Geomechanical studies, presentation August 2013.

The geomechanical work can be subdivided into the following main components:

1. Fault stability analysis
2. 2-D geomechanical modelling
3. Compaction modelling

Results of the TBO review of the geomechanical work related to each of the above components are summarised in the appendix in tabular form. The first column summarises the main results obtained. In the next two columns, TBO comments and potential consequences are listed. The fourth column lists the TBO recommended follow-up actions where appropriate. This approach does not result in a chronological discussion of the above mentioned draft report and presentations.

Some of these uncertainties are intrinsic, due to the lack of geomechanical data. Solutions are not to be expected. Some uncertainties can be reduced over time as new data and results of additional geomechanical analysis become available. Lastly there is a category of uncertainties caused by different scientific insights and opinions. For some of these, further work, including independent scientific review and advice is recommended. The uncertainties in each of these categories are discussed in some detail.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## Appendix A

**Table A1 TBO review of the main individual components of the geomechanical work**

1. Fault stability analysis			
NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
The study gives a good overview of data available on in-situ stress conditions, fault orientations and fault and reservoir properties.	The study can be used to give a first indication of the criticality of the faults. Results should not be over interpreted.	Study can be used as a first indicator which faults are likely candidates for slip.	None
The authors use a simple geomechanical model to explain the onset of fault slip in Groningen. The model is based on a stress based failure criterion (Coulomb's friction law), and the assumption that faults will slip if the shear stress exceeds the shear carrying capacity at any location on the fault surface. Important underlying assumptions of this simplified model are: 1) virgin in-situ stress conditions are only depth dependent and uniform across the field 2) stress evolution during depletion is represented by a (constant) stress path coefficient 3) fault slip and stress changes only occur within the reservoir 4) depletion is uniform across the field	The approach used is generally accepted for studying the reactivation potential of faults. However, the underlying assumptions are severe limitations of the model (see also individual comments on main assumptions below). Reservoir heterogeneity, reservoir geometry and differential pressure depletion are not taken into account, but are relevant for the Groningen Field. Also uncertainties in input parameters of this simplified model (regional stress field, stress path coefficients and fault cohesion and friction) are large. The model can be used as a <b>first indicator</b> (ranking) which faults are likely candidates for fault slip.	Study can be used as a <b>first indicator</b> which faults are likely candidates for slip (based on their USC). However other factors should be taken into account (by means of 2D/3D geomechanical models)	None
The authors show that the faults aligned with the direction of maximum horizontal stress (i.e. NNW-SSE) have highest SCU (Shear Capacity Utilisation) and therefore have highest tendency to slip. The authors also find that faults with NNW-SSE orientation have the largest number of seismic events with magnitudes $M > 1.5$ within 500m.	Consistency of the predicted Shear Capacity Utilisation and recorded seismicity indicates that the fault orientation (in the regional stress field) can be used as a <b>first indicator</b> which faults are likely candidates for fault slip. However, other factors not taken into account in the present model are expected to have an important effect on fault reactivation and seismicity (e.g. geometry and spatial variation)	See above	Use 2D and 3D modelling to investigate the effect of geometry, juxtaposition, heterogeneity, offset, stiffness contrasts, non-uniform depletion, constitutive behaviour.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
The static subsurface model contains 1800 faults. 707 faults have been selected based on their relevance for dynamic reservoir modelling. These 707 faults are also used for fault stability analysis – to maintain consistency between the geomechanical assessment and results of reservoir pressure evaluation.	The 707 faults selected for their relevance to dynamic reservoir modelling may not correspond to the critical faults on the basis of the seismicity. The authors have introduced a possible bias here.	About 1100 faults are not taken into account in this study but may be relevant for the seismicity. The alignment of faults (NNW-SSE) most critically stressed will not change using the entire dataset. The relation of seismicity and the faults may change.	none
Assumption 1) Virgin in-situ stress conditions and pore pressures are only depth-dependent and uniform across the field.	The initial stress conditions (initial SCU) on the fault are only determined by the orientation of the fault and the orientation and magnitude of regional stress field. In reality, local stress variations are expected, due to, amongst others, reservoir heterogeneity, stiffness contrasts, fault offset and juxtaposition and the presence of rocksalt.	Local stress variations are not taken into account.	Use 2D and 3D modelling to investigate the effect of geometry, juxtaposition, heterogeneity, offset, stiffness contrasts, non-uniform depletion, constitutive behaviour.
Assumption 2) stress evolution during depletion is represented by a (constant) stress path coefficient	The evolution of stresses ( $S_v$ , $S_{hmin}$ and $S_{Hmax}$ ) during depletion will not only depend on stress path coefficient (directly related to poisson ratio), but will also depend on parameters like fault offset, stiffness contrasts, differential depletion etc. Furthermore, the range of values of the stress path coefficients is large.	Evolution of stress path during depletion is uncertain.	See above, analysis can be extended by taking into account other effects in 2D and 3D geomechanical modelling. Stress path coefficients in the reservoir can be further constrained by monitoring of stress path (additional mini-frac tests)

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
Assumption 3) fault slip only occurs within the reservoir and is the root cause of the recorded seismic events	Uncertainty of (vertical) location of seismic events is very large (>1 km). We do not know for certain that seismicity is located within the reservoir. Geomechanical 2-D/3-D modelling shows that slip also may occur above and below the reservoir.	Based on this study and the monitoring data, it cannot be excluded that events may occur below or above the reservoir	Further seismic monitoring and 2D/3-D geomechanical modelling may provide an answer
Assumption 3) Stress changes only occur within the reservoir. Stress conditions above and below the reservoir formation remains undisturbed.	This is only valid for a horizontal, laterally extended uniform reservoir and uniform reservoir depletion. Geomechanical 2-D/3-D modelling for more complex geometrical situations shows that the stress conditions above and below the reservoir can be affected by compaction of the reservoir.	Based on this study and the monitoring data, it cannot be excluded that stress changes may occur below or above the reservoir.	Further seismic monitoring and 2D/3-D geomechanical modelling may provide an answer
The reservoir is a uniform thickness	Not true according to the Petrel model. Also, reservoir offset along faults can cause differential shear displacements along fault.	Differential compaction cannot be excluded as a mechanism for shear stress release	2D/3D geomechanical modelling will give insight.
Assumption 4: Depletion pressure across the faults and within the reservoir is uniform.	According to the reservoir model this is the case. It is, however, not unlikely that small compartments may be shut-off from the main depleting system. Also reservoir offset with equal pore pressure depletion on both sides of the fault may result in differential shear displacements along the fault.	Differential compaction cannot be excluded as a mechanism for shear stress release	See above
Fault slip does not change the stresses and pressures in the reservoir	Fault slip changes the stresses in the reservoir. The Mohr-Coulomb stress transfer is known and used within the international seismological community	Events due to an increase due to Mohr-Coulomb stress transfer may occur as well.	Mohr-Coulomb stress transfer due to the occurrence of events should be taken into account.
The shear capacity utilisation (SCU) is defined as the ratio between the obtained shear stress and the shear stress carrying capacity of the fault. It is assumed that fault slip occurs if the SCU is found greater than one at any point on the fault	The exact value of the SCU is uncertain due to the uncertainties on the in-situ stress. In-situ stresses used in the report are roughly consistent with values found by one-dimensional modelling of GMI. In general however, especially value of SHmax is difficult to determine and uncertain.	The ranking of faults based on SCU may give insight, but not the 'true' values	None



## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
Number of faults exceeding the SCU at some point on the fault plane is increasing with depletion and horizontal stress-path coefficient.	The increase in SCU is determined by the combination of friction angle and stress path coefficient –in this study a combination is chosen in such a way that depletion leads to an increase in SCU. This is not a main finding – but a consequence of the input parameters chosen.	Evolution of stress path during depletion is uncertain (intrinsic uncertainty).	Stress monitoring during depletion may provide answers.
Fault cohesion, fault friction angle and horizontal stress path are the most sensitive parameters in the prediction of onset of fault slip using the current model.	Fault friction, cohesion and stress path are not well constrained. Values of friction and cohesion in this study are based on results for intact rocks, which are assumed to form an upper bound for the faults. The GMI study gives lower cohesion values and higher friction values for intact rock.	Stress path coefficients and friction angle are constrained in such a way that depletion leads to fault reactivation. Other mechanisms are ignored.	Other mechanisms for fault reactivation need to be taken into account.

2. 2-D geomechanical modelling			
NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
Shear and normal stress peaks develop at the top and bottom of the reservoir with increasing depletion	Results are in line with earlier work. Larger fault throw = higher stresses	Fault throw is important for the occurrence of seismic events	Further 2D/3D geomechanical modelling.
Depletion on one side of fault results in fault slip at the top of the reservoir extending upwards and downwards	Results are in line with earlier work.	Differential compaction is an important mechanism for the occurrence of events	Further 2D/3D geomechanical modelling.

## Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

3. compaction modelling			
NAM results	TBO comments	Consequences	Follow-up
NAM uses three compaction models: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bi-linear model</li> <li>- Time decay model</li> <li>- Isotach model</li> </ul>	Different compaction models have different consequences for the behaviour of compaction with production.	As production stops, the bi-linear model stops immediately, the time decay model stops after ~ 15 years, the isotach model stops depending on the chosen cm.	The compaction model and time delay behaviour of compaction need to be studied.
All compaction models have a comparable fit to the 2012 measured subsidence. Differences between measured and calculated subsidence remain particularly in the Delfzijl area and the northern part of Groningen.	The compaction models cannot be differentiated based on the observed subsidence.	The future compaction is uncertain	Subsidence needs to be measured (every year) as well as permanent GPS stations are necessary to identify which compaction model is valid
Future subsidence (2080) differs 25 cm depending on the compaction model	Since compaction is the driving force for the seismic events this is very important for the seismic hazard.	Seismic hazard for end of field life is very uncertain	Future subsidence, and therefore also future seismic risk, can only be determined for the coming 5 years with any degree of confidence

Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken  
Directie Energiemarkt  
T.a.v. de heer P. Jongerius  
Postbus 20101  
2500 EC DEN HAAG

**Onderwerp**

Aanbiedingsbrief rapport TNO-2013 R11953

Geachte heer Jongerius,

Hierbij bieden wij u het rapport "*Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld*" aan (rapportnummer TNO-2013 R11953, dd. 23 december 2013).

**Achtergrond**

In het rapport worden de resultaten beschreven van onderzoek, dat is uitgevoerd ter ondersteuning van de beoordeling van het door de NAM recent ingediende gewijzigde winningsplan Groningen. Dit onderzoek is beschreven in de opdracht van het ministerie van Economische Zaken met kenmerk DGETM-EM / L3707495 van 21 juni 2013. Conform die opdracht bevat het rapport een combinatie van:

- i) een review van de door de NAM ontwikkelde reservoirmodellen op alle voor bodembeweging belangrijke aspecten;
- ii) controleberekeningen op de NAM resultaten m.b.t. bodembeweging, zoals beschreven in de Technische Bijlage<sup>1</sup> behorende bij het door de NAM ingediende gewijzigde winningsplan Groningen;
- iii) TNO beantwoording van technische vragen van het Staatstoezicht op de Mijnen;
- iv) eigen geomechanisch modelwerk van TNO.

Het TNO rapport heeft een complex, technisch karakter. In deze brief wordt daarom eerst uitleg gegeven over de relatie tussen gasproductie en mogelijke schade door aardbevingen (het seismische risico). Vervolgens worden de belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit het rapport kort samengevat en toegelicht (zie de Bijlage voor uitleg van in deze brief gebruikte termen). Het rapport richt zich in het bijzonder op specifieke verschillen in modelkeuzes en aannames tussen de evaluaties van TNO en NAM. Deze brief plaatst de mening van TNO in een breder perspectief.

<sup>1</sup> Wijziging winningsplan Groningen 2013, inclusief technische bijlage. Versie 29 november 2013.

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75  
infodesk@tno.nl

**Datum**

16 januari 2014

**Onze referentie**

AGE 14-10.016

**E-mail**

ingrid.kroon@tno.nl

**Doorkiesnummer**

+31 88 866 45 31

**Doorkiesfax**

+31 30 256 45 05

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponneerd bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op [www.tno.nl](http://www.tno.nl).  
Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

**Datum**  
16 januari 2014

**Onze referentie**  
AGE 14-10.016

**Blad**  
2/6

## **Van gasproductie naar geïnduceerde seismiciteit**

Als gevolg van de productie van aardgas daalt de interne gasdruk in het reservoir en worden de gashoudende lagen samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen. Dit heet compactie. De compactie uit zich enerzijds in bodemdaling en anderzijds in bevingen, wanneer een deel van de door compactie in het gesteente opgebouwde energie zich ontleedt via beweging langs een breukvlak. Compactie kan dus worden gezien als de drijvende kracht achter zowel bodemdaling als seismiciteit. De opgetreden compactie in het reservoir is echter – afgezien van metingen in enkele putten – niet direct en voor het hele veld meetbaar. Daarom wordt compactie met een model berekend en vertaald in berekende bodemdaling, die wordt geïjkt aan gemeten bodemdaling. De daaruit afgeleide relatie tussen historische gasproductie en compactie wordt gebruikt om de toekomstige toename van de compactie – zowel in plaats als in tijd – te berekenen voor diverse productiescenario's.

Door een aardbeving beweegt de bodem aan het maaiveld met een kortstondige grondversnelling, waardoor er krachten worden uitgeoefend op gebouwen en infrastructuur. De maximale waarde van deze grondversnelling is bepalend voor de aard en omvang van schade. Het seismisch risico wordt bepaald door de combinatie van de kans dat een bepaalde grondversnelling wordt overschreden (seismische dreiging) en de effecten van die grondversnelling op omgeving en omwonenden.

## **Het TNO Rapport**

De NAM ondergrondmodellen zijn zorgvuldig geëvalueerd op de aspecten die TNO belangrijk acht voor bepaling van de seismische dreiging. TNO onderschrijft de generieke aanpak in het NAM-onderzoek met betrekking tot de statische, dynamische, geomechanische en seismologische modellen. De statische en dynamische modellen van de NAM zijn over het geheel genomen van hoge kwaliteit. Daarom zijn deze als uitgangspunt genomen voor het TNO onderzoek.

Bij de berekeningen van de geomechanische en seismologische modellen worden deels alternatieve methodieken, modelkeuzes en aannames voor parameters toegepast. TNO heeft verschillende productiescenario's doorgerekend voor compactie. Hierbij is gekozen voor een constante productie (van 30 bcm/jaar) en veranderingen in de manier van winning van het Groningen veld. De keuze voor de productiescenario's zijn bepaald in overleg met het Staatstoezicht op de Mijnen.

**Datum**  
16 januari 2014

**Onze referentie**  
AGE 14-10.016

**Blad**  
3/6

## **Belangrijkste conclusies en aanbevelingen**

### **1. Compactie en bodemdaling**

Het door TNO gebruikte compactiemodel geeft als maximum bodemdaling 39 cm in 2025; 45 cm in 2050; en 47 cm in 2080. De berekende diepte en vorm van de nog te verwachten bodemdaling komen overeen met de NAM prognoses binnen de foutenmarge van de ijking aan reeds waargenomen bodemdaling. Het door de NAM gebruikte compactiemodel wordt gekenmerkt door een tijdvertraging, waardoor op korte termijn nauwelijks variatie in compactie voor verschillende productiescenario's ontstaat. Door TNO ontwikkelde alternatieve modellen laten een response zien, die wordt bepaald door het tempo van de drukveranderingen.

De berekening van de compactie en daarmee de bodemdaling kan sterk worden verbeterd door op korte termijn:

- uitgebreider meetnet voor bodemdaling en meer nauwkeurige metingen
- verbeterde modellering van de reservoirporositeit
- verbetering van het aquifermodel

en op lange termijn:

- verbetering van de compactiemodellering

### **2. Seismische dreiging**

In het geval dat de gasproductie conform de marktvaart plaatsvindt, wordt de seismische dreiging, volgens de TNO analyse, boven het Groningen veld voor de komende 10 jaar vooral bepaald door bevingen met een magnitude van 4,0 tot 5,0 op de schaal van Richter.

De berekening van de seismische dreiging voor de periode na de komende 3 tot 5 jaar wordt gekenmerkt door een zeer grote bandbreedte van mogelijke uitkomsten. Deze bandbreedte kan worden gereduceerd, naast bovengenoemde aanbevelingen, door aanvullende studies naar de partiticoëfficiënt. Het verdient daarnaast aanbeveling om de huidige methoden uit te breiden door de al opgetreden compactie en bevingen mee te nemen in de bepaling van de seismische dreiging. Daarnaast is ook het meenemen van breuken in het model van groot belang.

### **3. Ruimtelijke verdeling van de seismische dreiging**

Het is op basis van de door TNO gemaakte evaluaties en berekeningen in het rapport aannemelijk dat reductie van de gaswinning uit de productieclusters nabij Loppersum zal leiden tot een verandering van de verdeling van de seismische dreiging tussen de verschillende deelgebieden boven het veld. Deze ruimtelijke verdeling is van significant belang voor de bepaling van het seismische risico en de beheersing daarvan.

**Datum**

16 januari 2014

**Onze referentie**

AGE 14-10.016

**Blad**

4/6

De berekening van de ruimtelijke verdeling van de seismische dreiging kan sterk worden verbeterd door:

- het bepalen van locatieafhankelijke seismische dreiging
- het verbeteren van de compactiemodellering
- driedimensionale geomechanische modellering

#### 4. Reductie seismische dreiging

Tijdelijke reductie van de seismische dreiging is mogelijk door een andere verdeling van gaswinning in het Groningen veld. Het betreft in het bijzonder significante reductie van de productie uit de vijf productieclusters nabij het Loppersumgebied in combinatie met deels vervangende productie uit het zuidelijk deel van het Groningen veld.

In het kader van doelmatige winning bevelen we aan om op korte termijn de verdeling van de productie te optimaliseren binnen *acceptabele* grenzen voor de seismische dreiging boven het Groningen veld.

Het verdient tevens aanbeveling om aanvullende studies te verrichten naar:

- de partiticoëfficiënt
- de lange termijneffecten van aanpassing van de manier van winning

ten einde de onzekerheden voor langere termijn voorspellingen te reduceren.

Hoogachtend,



Dr. I.C. Kroon  
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken

**Datum**  
16 januari 2014

**Onze referentie**  
AGE 14-10.016

**Blad**  
5/6

## **BIJLAGE: TOELICHTING TERMINOLOGIE**

### Bodembeweging:

De beweging van de bodem aan het oppervlak (door compactie of door een aardbeving op diepte)

### Bodemdaling:

Daling van het maaiveld – uitgedrukt in (centi-)meters – ten gevolge van compactie van gesteenten in de ondergrond.

### Compactie:

Samendrukking van ondergrondse lagen onder het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen, bv. door het afnemen van interne gasdruk door gasproductie.

### Dynamisch model:

Model voor de stroming en drukverdeling van gas binnen het reservoir

### Empirisch:

Letterlijke betekenis: ‘proefondervindelijk’. Een empirisch resultaat is een onderzoeksresultaat dat is verkregen door het vergelijken van de drijvende kracht van een proces met de waargenomen respons, zonder dat (noodzakelijkerwijs) de fysische relatie tussen die drijvende kracht en de response is verklaard en begrepen. Extrapolatie van langs empirische weg verkregen resultaten is alleen toegestaan onder de aanname dat het onderzochte systeem zich in andere omstandigheden (bv. in de toekomst, of op andere ruimtelijk schaal) net zo zal gedragen als in de huidige situatie. Zonder die toevoeging heeft een extrapolatie geen waarde.

### Geomechanisch model:

Model van het mechanisch gedrag van het reservoir onder variërende spanningscondities.

### Partiticoëfficiënt:

Empirisch bepaalde fractie van de in ondergrond door compactie opgeslagen energie die als seismische energie vrijkomt. Een waarde van 1 betekent dat alle in de ondergrond opgebouwde energie (uiteindelijk) vrijkomt middels één of meerdere bevingen; een waarde van 0,001 betekent dat slechts 0.1% ervan vrijkomt als seismische energie.

### Magnitude (Richter schaal):

De kracht van de aardbeving in de ondergrond, in het kader van deze onderzoeken meestal uitgedrukt middels een bepaalde waarde op de schaal van Richter.

### Seismiciteit:

Het optreden van (aard)bevingen.

### Seismische dreiging (“seismic hazard“):

In statistische analyses wordt de seismische dreiging meestal gedefinieerd als de kans dat een bepaalde waarde van grondversnelling wordt overschreden (binnen een bepaalde periode, bv. 1, 10 of 50 jaar).

### Seismisch risico:

De kans op door aardbevingen veroorzaakte schade (aan mensen, gebouwen, infrastructuur,

productie). Risico wordt – in het algemeen – bepaald door de combinatie van de kans dat iets gebeurt en de potentiële effecten daarvan. In die zin is “seismisch risico” de combinatie van de “seismische dreiging” en de potentiële effecten.

Seismologisch model:

In dit rapport: een model dat compactie vertaalt in grondversnellingen.

Schade:

Het effect van bodembewegingen op mensen, gebouwen, infrastructuur, productie etc.

Statisch model:

Geologisch reservoir model inclusief de breuken.

**Datum**

16 januari 2014

**Onze referentie**

AGE 14-10.016

**Blad**

6/6



Energie  
Princetoniaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75  
[infodesk@tno.nl](mailto:infodesk@tno.nl)

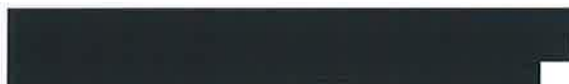
## TNO-rapport

TNO 2013 R11953 | Eindrapport

# Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld

Datum 23 december 2013

Auteur(s)



Aantal pagina's 211 (incl. bijlagen)  
Aantal bijlagen 5  
Opdrachtgever Ministerie van Economische Zaken  
Projectnaam Advisering winningsplan Groningen  
Projectnummer 060.01462/01.02

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vernieuwvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2013 TNO

# Managementuittreksel

**Titel :** Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld

**Auteur(s):** [REDACTED]

**Datum :** 23 december 2013

**Rapportnr. :** TNO 2013 R11953

## Doel en achtergrond

De NAM heeft een geactualiseerd winningsplan voor het Groningen gasveld ter instemming ingediend bij de Minister (01-12-2013). EZ heeft TNO-AGE gevraagd om in voorbereiding op advies over het winningsplan onderzoek te verrichten, waarover hier wordt gerapporteerd. De modellen en studies van de NAM ten aanzien van de verwachte bodemdaling en de seismische hazard zijn geëvalueerd aan de hand van eigen, onafhankelijke controleberekeningen. De door de NAM beschikbaar gestelde documentatie, alsmede de statische en dynamische reservoirmodellen dienen als input. In deze samenvatting volgt een overzicht van de belangrijkste bevindingen.

## Algemene conclusie

Het optreden van ruimtelijke differentiatie in de seismische hazard tussen verschillende productiescenario's is een belangrijke bouwsteen/uitgangspunt voor de beoordeling van het winningsplan Groningen. De resultaten van de TNO-AGE controleberekeningen laten ruimtelijk differentiatie in de seismische hazard zien tussen de verschillende productiescenario's. De NAM onderkent geen ruimtelijke differentiatie in het Groningen veld op basis van haar methoden en onderzoeken. Dit verschil in inzicht vloeit voort uit verschillen in de volgende aannames en uitgangspunten: het compactiemodel, de partiticoëfficiënt en de berekening van het seismische hazard.

## Seismische hazard

Door binnen de berekeningen identieke aannames te hanteren voor onzekere parameters kunnen uitspraken worden gedaan over de relatieve verschillen in seismische hazard tussen de verschillende productiescenario's en productiefilosofieën. De seismische hazard is gevoelig voor onzekerheden in de partiticoëfficiënt, het deel van het reservoirmoment dat wordt omgezet in seismisch moment (bevingen), en de berekende compactie. Hierdoor is het lastig uitspraken te doen omtrent het absolute niveau van seismische hazard.

Met de geanalyseerde alternatieve productie(beperkings)scenario's waarbij de jaarproductie wordt verlaagd tot 30 bcm/jaar, 20 bcm/jaar en 10 bcm/jaar, zal de totale seismische hazard over het veld binnen een gegeven tijdsperiode verminderen. Alternatieve productiefilosofieën, waarbij de productie uit de putten in het noordelijke Loppersumgebied wordt stopgezet en (deels) wordt gecompenseerd door een hogere productie in het zuidelijke deel van het veld, resulteren in een significante reductie van de compactie met 2-3 cm over een periode van 5 jaar in het gebied van maximale compactie.

TNO-AGE constateert dat differentiatie van seismische hazard over het veld mogelijk is. Het gebruik van een exponentiële relatie (zoals op dit moment wordt geobserveerd) tussen partiticoëfficiënt en cumulatieve compactie leidt tot een lagere seismische hazard in het zuidelijke deel van het Groningen veld ten opzichte van de overige delen van het veld. Bij andere relaties is geen differentiatie van de seismische hazard mogelijk.

De door NAM gehanteerde methode kan niet differentiëren tussen de verschillende productiefilosofieën voor wat betreft de seismische hazard. Dit komt deels door de tijdsvertraging in de compactieberekening, waardoor geen veranderingen zichtbaar zijn binnen 3 tot 5 jaar. Daarnaast zijn de gemodelleerde bevingen locatie-onafhankelijk. Hierdoor wordt de seismische hazard uitgesmeerd over het gehele Groningen veld.

#### **Maximale magnitude**

Waarnemingen in de overige Nederlandse gasvelden geven een waarschijnlijke bovengrens van de partiticoëfficiënt van 1% (waarde 0,01). Dit is ruimschoots lager dan de partiticoëfficiënt van 100% (waarde 1), nodig om een (theoretische) beving van magnitude 6,0 op de schaal van Richter te veroorzaken. De kans hierop is verwaarloosbaar. Het betreft een theoretisch absoluut maximum, waarbij wordt aangenomen dat het totale reservoirmoment in één beving vrijkomt als seismisch moment. Een belangrijk deel van het reservoirmoment is al vrijgekomen als seismisch moment tijdens eerdere bevingen, een deel is als bodemdaling gerealiseerd en een deel bevindt zich op te grote afstand ten opzichte van de grotere breuken.

## Samenvatting

In dit rapport zijn controleberekeningen uitgevoerd op de bodemdaling en de seismische hazard ter voorbereiding op het advies over de wijziging van het winningsplan Groningen op verzoek van EZ en zoals beschreven in de offerte van april 2013. In deze rapportage worden de resultaten van de technische deelactiviteiten beschreven: geologisch model (Hoofdstuk 2), reservoir dynamisch model (Hoofdstuk 3), compactiemodel/bodemdaling (Hoofdstuk 4 en 5), breukenmodel en seismiciteit (Hoofdstuk 6), alternatieve productiescenario's en effect op seismiciteit (Hoofdstuk 7) en voorbereiding advisering geactualiseerd winningsplan Groningen (Hoofdstuk 2 tot en met 8)

Ten behoeve van de controleberekeningen voor compactie en bodemdaling heeft de NAM een statisch reservoirmodel (Petrel) en een dynamisch reservoirmodel (MoRes) beschikbaar gesteld aan TNO-AGE. Uit de beoordeling van de kritische punten voor de compactiemodellering komt naar voren dat de berekende porositeiten in het statische reservoirmodel van grote invloed zijn op de bodemdaling en daarmee ook op de seismische hazard. TNO-AGE constateert discrepanties tussen de geobserveerde bodemdaling en de, op basis van de gemodelleerde porositeit berekende bodemdaling. Omdat de NAM geen inzicht geeft in de onzekerheidsbandbreedte van de gemodelleerde porositeit, is het nu niet mogelijk om na te gaan in hoeverre de geconstateerde discrepanties hiermee verklaard kunnen worden. Uit een analyse van de onzekerheidsbandbreedte door TNO-AGE blijkt wel dat dit een mogelijke verklaring is voor een deel van de gebieden met geconstateerde discrepanties. TNO-AGE is verder van mening dat de onzekerheidsbandbreedte van de geschatte porositeit verder kan worden gereduceerd door aanvullende geologische en geofysische sturing mee te nemen bij de modellering.

Naast het porositeitsmodel vormen de aan het Groningen veld verbonden aquifers een belangrijke component binnen de controleberekeningen. Deze aquifers zijn met name bepalend voor de verwachte extensie van bodemdaling tot (ver) buiten de grenzen van het veld. Dit is met name een aandachtspunt voor het Waddengebied. Omdat het Groningen model van de NAM hier een analytische (niet fysiek gemodelleerde) aquifer aanneemt en dit gebied tevens gekenmerkt wordt door een gebrek aan metingen van zowel bodemdaling als drukdaling, is de in deze studie berekende bodemdaling voor dit gebied niet betrouwbaar. Hetzelfde geldt mogelijk voor andere gebieden die aan het Groningen veld grenzen.

De verschillende door NAM beschouwde dynamische modellen met sterke en zwakke aquifers resulteren voor het tijdstip eind 2012 in een onderling verschil in bodemdaling dat kan oplopen tot 16 cm ten noordwesten van het Groningen veld. Dit verschil strekt zich uit tot het Loppersum gebied met afwijkingen tot 5 cm per eind 2012. Het dynamische model dat de NAM gebruikt voor de wijziging van het winningsplan Groningen (NAM 2013d) gaat uit van sterke aquifers en geeft daardoor geen goede fit met gemeten drukken en gas-water niveaus in het noordwesten van het veld. De bruikbaarheid van voorspellingen in het noordwestelijke deel van het veld zijn hiermee discutabel.

In de controleberekeningen zijn, naast de 40 bcm/jaar en 30 bcm/jaar productie(beperking)scenario's van de NAM (NAM, 2013b) ook alternatieve productie(beperking)scenario's van 20 bcm/jaar en 10 bcm/jaar opgenomen. De resultaten in termen van cumulatieve compactie van de 20 bcm/jaar en 10 bcm/jaar scenario's liggen, zoals te verwachten was, tussen het stop scenario en het 30 bcm/jaar scenario in. Bij deze scenario's wordt het seismische hazard verminderd maar strekt zich wel over langere tijd uit. De productie uit het Groningen veld zou bij deze scenario's tot na 2080 doorlopen.

Naast productieverlaging zijn ook alternatieve productiefilosofieën geëvalueerd. NAM (NAM, 2013b) introduceert hiervoor een scenario waarbij de productie in het gebied rond Loppersum wordt verlaagd en in het zuiden wordt verhoogd. TNO-AGE heeft aanvullend gekeken naar productie filosofieën die bestaan uit 1) het evenredig terugdraaien van productie, 2) het stoppen van productie in het noorden (Loppersum gebied) als de druk bij de put onder de 80 bar komt en 3) een algehele stop van productie in het noorden van het veld (Loppersum gebied) vanaf 1 januari 2014. De scenario's waarbij de productie uit putten rondom Loppersum wordt stopgezet, resulteren in een significant lagere cumulatieve compactie over de komende 5 jaar ten opzichte van het marktvaag productiescenario (circa 2-3 cm minder op de locaties van maximale compactie). De drukdaling in het Loppersum gebied vindt dan veel geleidelijker plaats aangezien een drukpuls in het zuiden van het veld er op dit moment 3-5 jaar over doet voordat deze het noorden van het veld bereikt.

Naast het bilineaire compactiemodel en het tijdvertragsingsmodel (Time-Decay) van NAM (basis model) zijn ook het Rate Type Compactie Model (RTCM) en het isotachen compactiemodel nader bestudeerd. Het RTCM model geeft de beste fit aan de geobserveerde bodemdaling waarbij 78% van de peilmerken binnen twee standaard deviaties uitkomt. Op basis van dit model wordt in 2025 een maximale bodemdaling van 39,2 cm voorspeld, in 2050 45,3 cm en in 2080 46,7 cm. De contouren van de nog te verwachten bodemdaling (2013-2080) in de TNO-AGE analyse en de NAM analyse komen overeen met een maximum van 17 cm in het diepste punt. Het Time-Decay model van de NAM overschat de bodemdaling aan de randen van de dalingskom waardoor hier sprake is van een lokale overschatting van de seismisch hazard. Het maximale verschil in totaal compactievolume tussen de verschillende productiescenario's voor het RTCM compactiemodel loopt op tot 30 miljoen m<sup>3</sup> in 2023, terwijl deze verschillen volgens het Time-Decay model in 2023 slechts 17 miljoen m<sup>3</sup> bedragen. Dit wordt veroorzaakt door de tijdsvertraging van 7,3 jaar (NAM 2013d) die is aangenomen in het Time-Decay model. Het effect van productieveranderingen per 01-01-2014 zal volgens dit model pas goed merkbaar worden in 2021.

In tegenstelling tot het Time-Decay model heeft het RTCM en het lineaire isotachenmodel twee componenten: een elastisch (instantane reactie) component en een kruip (niet instantane) component. Deze laatste component is bepalend voor de vertraging in het model. Voor het marktvaag productiescenario zijn de laterale verschillen tussen het RTCM en Time-Decay model klein (tot 1,5 cm). De verschillen in compactievolume voor de verschillende productiefilosofieën lopen op tot 4,5 miljoen m<sup>3</sup> in 2023. De laterale verschillen tussen de verschillende productie filosofieën onderling zijn wel significant. Het scenario waarbij de productie wordt verlaagd naar 30 bcm/jaar en de productie uit de putten rondom Loppersum per 01-01-2014 wordt gestopt (30 bcm A4 scenario) geeft een reductie van 31% van de

compactie t.o.v. het 30 bcm scenario zonder alternatieve productie filosofie (oftewel handhaving van productie bij Loppersum).

Het seismisch risico wordt gegeven door de seismisch hazard vermenigvuldigd met de gevolgen. De gevolgen bestaan uit schade aan gebouwen, infrastructuur en overstromingsrisico's. Uit de seismische hazard berekeningen blijkt vooral dat de zg. partiticoëfficiënt een belangrijke rol speelt. Deze coëfficiënt bepaalt welk gedeelte van de compactie-energie weer vrij kan komen als seismische energie in de vorm van bevingen. Verder volgt uit de relatie tussen de partiticoëfficiënt en de compactie de totale hoeveelheid seismische energie die vrij kan komen bij een bepaald niveau van compactie. Bij een exponentiële relatie voor de partiticoëfficiënt zal deze nog zodanig laag zijn dat het zuidoosten van het Groningen veld een kleinere seismische hazard heeft dan het midden en noorden van het veld. Bij hogere waarden voor de partiticoëfficiënt, zoals deze volgen uit bijvoorbeeld de 95% betrouwbaarheidsgrens relatie of een aangenomen constante waarde voor die coëfficiënt van  $10^{-3}$ , is variatie van de seismische hazard over het veld niet aanwezig. Belangrijker nog is dat deze methode niet geschikt is voor de differentiatie tussen verschillende productiefilosofieën. Dit wordt veroorzaakt door 1) de tijdsvertraging van het basis compactiemodel van NAM van 7,3 jaar waardoor geen veranderingen zichtbaar zijn binnen periodes van 3-5 jaar en 2) de ontkoppeling tussen magnitudes en locaties van bevingen waardoor grotere bevingen overal in het veld kunnen plaatsvinden (dus ook in gebieden met lage compactie). Dit laatste zal de seismische hazard over het gehele veld uitsmeren waardoor verschillen in compactie bij verschillende productiefilosofieën geen rol spelen. Verder wordt het reservoirmoment dat nog niet is vrijgekomen als seismisch moment in eerdere jaren, beperkt meegenomen. Hierdoor zijn grotere magnitudes dan berekend voor het specifieke interval (in dit geval de komende 10 jaar), niet uit te sluiten.

Binnen de methode van NAM (2013a,b) is de reservoircompactie sterk bepalend voor de seismisch hazard aangezien er een directe relatie tussen beide parameters wordt aangenomen. Alhoewel TNO-AGE van mening is dat deze aanname over het algemeen geldig is, zijn er wel kanttekeningen te plaatsen over het optreden van seismiciteit bij (kritische) breuken. Volgens de geomechanische modellering speelt differentiële compactie over de breuk een veel belangrijkere rol dan totale compactie die NAM gebruikt in haar methodiek. De differentiële compactie zal op zich wel schalen met de totale compactie (grotere totale compactie geeft grotere differentiële compactie) maar geeft binnen een afstand van 2 km tot de breuk een veel kleiner volume waarin veranderingen in compactie kunnen leiden tot spanningsveranderingen op de breuk.

Uit de door TNO-AGE uitgevoerde 2-D geomechanische modellering volgen aanwijzingen dat de partiticoëfficiënt en de daaraan gerelateerde onzekerheidsbandbreedte mogelijk lager zijn dan door de NAM berekend. Hier kunnen echter nog geen conclusies aan worden verbonden onder andere omdat het niet mogelijk is om met de statische modellen het frictiegedrag van de breuk tijdens een aardbeving te simuleren. Waarnemingen in de overige Nederlandse gasvelden hebben tot nu toe een gemeten maximum waarde opgeleverd voor de partiticoëfficiënt van 1% (waarde 0,01). Dit is ruimschoots lager dan de partiticoëfficiënt van 100% (waarde 1) die nodig is om een beving van magnitude 6,0 op de schaal van Richter te verklaren.

Samenvattend is het seismisch hazard heel gevoelig voor een aantal onzekerheden en keuzes in de bepaling van de compactie en het seismische hazard. Voorbeelden van onzekerheden zijn de partiticoëfficiënt, het porositeitsmodel, en de invloed van aquifers die aan het reservoirmodel zijn gekoppeld. Daarnaast spelen verschillende keuzes nog een belangrijke rol zoals het compactiemodel en het productiescenario. Aangezien seismische hazard direct gerelateerd is aan compactie kunnen verschillen tussen compactiescenario's worden vergeleken voor de verschillende productiefilosofieën. Hierbij wordt in het scenario waarbij de productie wordt verlaagd naar 30 bcm/jaar en de productie uit de putten rondom Loppersum per 01-01-2014 wordt gestopt (30 bcm A4 scenario) een reductie van 31% in compactie geconstateerd t.o.v. het 30 bcm scenario zonder alternatieve productie filosofie (oftewel handhaving van productie bij Loppersum). De door de NAM gebruikte methode is niet geschikt voor differentiatie tussen de effecten van verschillende productiefilosofieën (uit welke delen van het veld wordt geproduceerd).

# Inhoudsopgave

	<b>Managementuittreksel.....</b>	<b>2</b>
	<b>Samenvatting .....</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Statisch model .....</b>	<b>21</b>
2.1	Introductie statisch model.....	21
2.2	Beschikbaar materiaal .....	23
2.3	Breukenmodel.....	24
2.4	Stratigrafie en modelarchitectuur.....	30
2.5	Porositeitsmodel .....	34
2.6	Conclusies en aanbevelingen.....	47
<b>3</b>	<b>Dynamisch model van de NAM .....</b>	<b>49</b>
3.1	Evaluatie van het dynamisch model m.b.t. compactie en bodemdaling.....	49
3.2	Onzekerheidsanalyse dynamisch model m.b.t. modelleren van compactie.....	55
3.3	Dynamische scenario's.....	59
3.4	Samenvatting en conclusies .....	65
<b>4</b>	<b>Bodemdalingsmetingen .....</b>	<b>66</b>
4.1	Differentiëestaat NAM.....	66
4.2	Analyse voor stabiele peilmerken.....	66
4.3	Conclusies en aanbevelingen.....	70
<b>5</b>	<b>Compactie modellering .....</b>	<b>71</b>
5.1	Inleiding .....	71
5.2	Constitutieve modellen voor compactie.....	75
5.3	Invoerparameters en gedrag van de compactiemodellen .....	77
5.4	Berekening van de compactie en bodemdaling .....	84
5.5	Bodemdalingsprognoses voor 2025, 2050 en 2080.....	96
5.6	Compactie scenario's .....	101
5.7	Discussie en conclusie .....	104
<b>6</b>	<b>Geomechanische modellering .....</b>	<b>108</b>
6.1	Introductie .....	108
6.2	Maximale magnitudes afgeleid uit geometrie van breuken in het Groningen gasveld .....	108
6.3	Ruimtelijke analyse van geïnduceerde seismiciteit .....	112
6.4	2D geomechanische modellering .....	120
6.5	Conclusies en aanbevelingen.....	130
<b>7</b>	<b>Seismische hazard analyse .....</b>	<b>132</b>
7.1	Methodiek .....	132
7.2	Gevoeligheid seismische hazard analyse .....	138
7.3	Partiticoëfficiënt .....	141
7.4	Seismisch hazard naar seismisch risico.....	145
7.5	Conclusies en aanbevelingen.....	152



<b>8</b>	<b>Discussie en Conclusies seismische hazard .....</b>	<b>154</b>
8.1	Modellen .....	154
8.2	Gevolgen voor bodembeweging (winningsplan) .....	158
<b>9</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>159</b>
<b>10</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>163</b>
<b>11</b>	<b>Appendices .....</b>	<b>164</b>
	Appendix A .....	164
	Appendix B .....	172
	Appendix C .....	174
	Appendix D .....	179
	Appendix E .....	202

## Lijst van figuren

Figuur 2.1	Dieptekaart van top reservoir (Top Rotliegend) en de positie van de breuken in het [REDACTED] model. Het Groningen veld is rood begrensd en het studiegebied in blauw. Putlocaties zijn weergegeven met zwarte cirkels (productieclusters worden gerepresenteerd door één putnaam).	22
Figuur 2.2	Structurele elementen in de Groningen regio ([REDACTED]).	25
Figuur 2.3	Doorsnede op 3020 m diepte van het Ant Tracking volume (R2296_07Ant_Tracking) van NAM.	26
Figuur 2.4	Doorsnede op 3020 m diepte van het Ant Tracking volume van NAM (R2296_07Ant_Tracking), met weergave van de door NAM gemodelleerde breuken.	27
Figuur 2.5	Top Rotliegend dieptekaart met de gemodelleerde breuken (zwart) en de additionele breuken (wit).	28
Figuur 2.6	Top Rotliegend dieptekaart met de gemodelleerde breuken (zwart) en de additionele breuken (wit), waarop de seismiteit, geregistreerd door het KNMI, is weergegeven.	29
Figuur 2.7	Doorsnede NW-ZO toont het stratigrafische model van het Rotliegend over de Groningen regio ([REDACTED]), figuur 5.2).	30
Figuur 2.8	Reservoirzone verdeling door NAM, volgens het [REDACTED] (p. 103) en de corresponderende horizonbenaming uit het Petrel [REDACTED] model (rechter kolom afgeleid door TNO uit het [REDACTED] model).	31
Figuur 2.9	Laag definities van het [REDACTED] model, met alleen voor de LSS.1.res zone de onlap configuratie ('follow top').	32
Figuur 2.10	Noord-Zuid doorsnede door het porositeitsgrid en stratigrafie in het [REDACTED] model (geplat op RO_T). LSS_1.3_T (paars) toont de onlap configuratie op het Carboon. De overige horizons zijn volgens het 'wedge'-model gemodelleerd. De rode stippellijn geeft de Groningen veldgrens weer.	32
Figuur 2.11	Seismische doorsnede die de onlap toont van de Ameland lithostratigrafische zone op het Carboon ([REDACTED]). Er lijkt een verschil tussen het putniveau "ROCLA_HST" en de seismische interpretatie "Ameland event with onlap against Top_DC".	33
Figuur 2.12	Seismische doorsnede van het Groningen veld, afgeplat of RO_T (gele lijn). De onlap van de Ameland kleisteen is weergegeven in groen. De roze lijn geeft de top van het Carboon aan (Saalien unconformity) (Figuur 8b uit Grötsch et al., 2010).	34
Figuur 2.13	Stratigrafisch model voor alle Lower Slochteren en Ameland kleisteen zones (LSS.1.res t/m LSS.2.het) volgens NAM en TNO-AGE.	34
Figuur 2.14	Porositeit trendkaart voor USS2res zone met daarop de outlines van de facies-indeling van NAM (data door TNO gedigitaliseerd [REDACTED]).	37
Figuur 2.15	Voorbeeld van een porositeit trendkaart voor de USS.2.res zone met het Groningen veld rood omlijnd. Gebruikte putlocaties voor het maken van de trendkaarten zijn weergegeven als zwarte punten. De zeer lage porositeit in het westelijk deel van het veld (bij Bedum) is een voorbeeld van een lokaal minimum waarbij de porositeit in het centrum zelfs lager is dan de porositeit in de dichtstbijzijnde putten.	39

Figuur 2.16	Visualisatie van mogelijke over- en onderschatting die kan optreden bij interpolatie.....	39
Figuur 2.17	Semivariogram voor putdata gebruikt voor de trendmap voor de middelste Upper Slochteren reservoir zone (USS2.res). ....	41
Figuur 2.18	Porositeit trendkaart voor de USS2.res zone berekend door NAM. Zwarte ruiten geven de putten weer. De rood-wit-blauwe cirkels geven het verschil tussen berekende en geobserveerde bodemdaling aan (rood = meer bodemdaling berekend dan geobserveerd).....	42
Figuur 2.19	Gemiddelde trendkaart voor USS2.res op basis van 50 realisaties berekend door TNO. ....	43
Figuur 2.20	Standaarddeviatie van de door TNO gemaakte trendmap van de USS2.res zone. De cirkels geven het verschil in berekende en geobserveerde bodemdaling weer (blauw= meer bodemdaling geobserveerd dan berekend). ....	44
Figuur 2.21	Porositeitsgrid van de LSS2.res zone met de positie van de onlap van de LSS1 zone (wit) op het Carboon.....	45
Figuur 2.22	Porositeitsgrid van de USS1.res zone met de positie van de onlap van de Ameland kleisteen (LSS_2.4_T) (grijs) op het Carboon.....	46
Figuur 3.1	Overzicht van de aquifers rondom het Groningen veld. In wit is aangegeven aan welke randen analytische aquifers gedefinieerd zijn. ....	50
Figuur 3.2	Gesimuleerde en gemeten veranderingen in het gas-water contact in SDM-1, en ZRP-1. ....	50
Figuur 3.3	Gesimuleerde en gemeten veranderingen in het gas-water contact in ODP-1. ....	51
Figuur 3.4	History match van de druk in observatieput USQ-01 met gemeten en gesimuleerde drukken. ....	54
Figuur 3.5	Ontwikkeling van de druk in SDM-1 tot 2080 voor een zwakke en een sterke aquifer. ....	56
Figuur 3.6	Ontwikkeling van de druk in ZRP-1 tot 2080 voor een zwakke en een sterke aquifer. ....	56
Figuur 3.7	Overzicht van de druk op 31-12-2012 in laag 4 voor het scenario met een sterke (links) en een zwakke aquifer (rechts). ....	57
Figuur 3.8	Oost-west dwarsdoorsnede ter hoogte van SDM-1 en ZRP-1 van de druk op 31-12-2012 zoals ook door NAM gegeven van de sterke aquifer (links) en de zwakke aquifer (rechts). ....	58
Figuur 3.9	Noord-zuid dwarsdoorsnede door SDM-1 in de noordelijke helft van het model van het scenario met de sterke aquifer (links) en de zwakke aquifer (rechts). De getoonde variabele is druk op 31-12-2012. De blauwe lijn geeft de positie van de oost-west dwarsdoorsnede in Figuur 3.8. ....	58
Figuur 3.10	Overzicht van de jaarlijkse productie voor alle gerunde scenario's. ....	60
Figuur 3.11	Druk in het grid blok van het eerste interval van put SDM-1 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.....	61
Figuur 3.12	Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZND-10 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie. ....	61
Figuur 3.13	Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZVN-10 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.....	62
Figuur 3.14	Druk in het grid blok van het eerste interval van observatie put SDM-1 voor 6 scenario's met vaste jaarlijkse maximum productie van 30 bcm en verschillende productie strategieën (zie Tabel 3.2). ....	62

Figuur 3.15 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZND-10 voor 6 scenario's met vaste jaarlijkse maximum productie van 30 bcm en verschillende productie strategien (zie Tabel 3.2).....	63
Figuur 3.16 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZVN-10 voor 6 scenario's met vaste jaarlijkse maximum productie van 30 bcm en verschillende productie strategien (zie Tabel 3.2).....	63
Figuur 4.1 Bodemdalingsmetingen beschikbaar in de differentiestaat. Links: primaire meetcampagne van de peilmerken in 2008, rechts: InSAR metingen voor 16 december 2011.....	66
Figuur 4.2 Illustratie van de Student's t-test.....	68
Figuur 4.3 Peilmerken in de provincie Groningen. Rood zijn onstabiele peilmerken met een 99% betrouwbaarheidslimiet.....	69
Figuur 5.1 Geomechanisch modelinstrumentarium, met in lichtblauw de invoer en uitvoer.....	73
Figuur 5.2 Voorbeeld van een berekening met het gelineariseerde isotachenmodel. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingsnelheid 1000 bar/jaar en de onderste lijn 1 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting.....	79
Figuur 5.3 Voorbeeld van een berekening met het RTCM model. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingsnelheid 1000 bar/jaar en de onderste lijn 1 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting. Deze belasting is tussen 200 en 220 bar 1 bar/jaar, en dan tot 320 bar 10 bar/jaar en dan tot 500 bar 1000 bar/jaar. Bij 500 bar vindt een periode van 1 jaar lang kruip plaats, waarna met 100 bar/jaar doorbelast wordt tot 600 bar.....	80
Figuur 5.4 Voorbeeld van een berekening met het Time-Decay model. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingsnelheid 20 bar/jaar en de onderste lijn 0,01 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting.....	81
Figuur 5.5 Simulatie met het RTCM model, gelineariseerde isotachenmodel en Time-Decay model voor een constante productiesnelheid van 5 bar/jaar en constant blijvende belasting vanaf 60 jaar (kruip). Modelparameters zijn in elkaar omgerekend voor de 5 bar/jaar isotach met de methode beschreven in Pruiksmā et al. (2013).....	83
Figuur 5.6 Porositeits afhankelijkheid van de compactiecoefficient. De blauwe markers zijn alle beschikbare kernmetingen. De groene lijn is de derdegraads polynoom trendlijn door alle kernmetingen (vergelijking 4), en de rode lijn is de beste fit door de kernmetingen in het Groninger Rotliegend (vergelijking 5). ....	85
Figuur 5.7 Porositeitsverdeling in het Groningen MORES model van NAM.....	86
Figuur 5.8 Porositeitsafhankelijkheid van de compactiecoefficient vergelijk van de door NAM bepaalde relatie met de derdegraads polynoom door de Groningen kernen. De blauwe markers zijn alle beschikbare kernmetingen in het Groninger Rotliegend. De groene lijn is de beste derdegraads polynoom fit, en de rode lijn is de beste fit van NAM.....	86
Figuur 5.9 Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten,	

blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.....	89
<b>Figuur 5.10</b> Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het lineair isotachen model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.....	90
<b>Figuur 5.11</b> Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het Time-Decay model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.....	90
<b>Figuur 5.12</b> Verdeling van de fout in de bodemdaling voor de drie compactiemodellen.....	91
<b>Figuur 5.13</b> Gemodelleerde compactie voor de Groningen eind 2011 voor het RTCM model. Het verschil tussen berekende en geobserveerde bodemdaling is weergegeven op de peilmerklocaties. Een rode kleur geeft de gebieden aan waarbij de berekende bodemdaling groter is dan de geobserveerde bodemdaling.....	92
<b>Figuur 5.14</b> Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011 na toepassing van een porositeitsreductie met een factor 0,85 in een gebied met straal 4 km nabij Delfzijl (groene cirkel). Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.....	93
<b>Figuur 5.15</b> Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011 na toepassing van een porositeitsreductie met een factor 0,50 in het noordwesten van het veld (groene cirkel) en een reductie met een factor 0,85 in een gebied met straal 4 km nabij Delfzijl (groene cirkel). Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.....	94
<b>Figuur 5.16</b> Verschil in berekende bodemdaling (in m) eind 2012 tussen het sterke aquifer scenario en het zwakke aquifer scenario in meters. Er is ongeveer 16 cm meer daling in het noordwesten in het zwakke aquifer scenario.....	96
<b>Figuur 5.17</b> Verschil in berekende bodemdaling (in m) eind 2012 tussen het sterke aquifer scenario en het zwakke aquifer scenario in meters. Er is ongeveer 16 cm meer daling in het noordwesten in het zwakke aquifer scenario.....	96
<b>Figuur 5.18</b> Nog te verwachten bodemdaling vanaf 2013 tot en met 2080. In rood de contouren in centimeters bodemdaling berekend met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. In blauw de contouren uit het Winningsplan van NAM (2013d).....	97
<b>Figuur 5.19</b> Bodemdalingsprognose voor 2025 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.....	98
<b>Figuur 5.20</b> Bodemdalingsprognose voor 2050 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.....	99
<b>Figuur 5.21</b> Bodemdalingsprognose voor 2080 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.....	100

Figuur 5.22	Cumulatieve compactie in miljoen m <sup>3</sup> voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het lineair isofach model. ....	101
Figuur 5.23	Cumulatieve compactie in miljoen m <sup>3</sup> voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het Time-Decay model. ....	102
Figuur 5.24	Cumulatieve compactie in miljoen m <sup>3</sup> voor de periode vanaf 2013 tot 2023 berekend met het RTCM model voor de alternatieve 30 bcm scenario's uit Paragraaf 3.3. ....	103
Figuur 5.25	Compactie in m voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model voor het 30bcm scenario. ....	104
Figuur 5.26	Compactie verschil in m tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2023 met het RTCM model. ....	104
Figuur 6.1	Berekening van de parameter 'w' van de breuken in het Petrel breukmodel. Set 1 gaat uit van de breedte w van het breuksegment dat grenst aan het reservoirgesteente (rode pijlen). Set 2 gaat uit van de breedte w van het breuksegment, gemeten vanaf onderkant Zechstein zout tot een diepte van 5 km (groene pijlen). ....	110
Figuur 6.2	Moment magnitudes (M <sub>w</sub> ) berekend voor twee sets van breukoppervlaktes uit het 3D Petrel model: Magnitudes van set 1 (blauw) zijn gebaseerd op het oppervlak van de breuken dat grenst aan reservoir gesteente; magnitudes van set 2 (rood) zijn gebaseerd op het totale oppervlakte van de breuken onder het Zechstein steenzout, onder aanname dat de breuken doorlopen tot een diepte van 5000 m beneden maaiveld. Magnitudes zijn berekend voor een spanningsafname van 100 bar (10 MPa) en een schuif modulus van 10GPa. ....	111
Figuur 6.3	Magnitudes van aardbevingen versus depletiedruk in het reservoir. De kleurschaal geeft het tijdstip weer waarop de bevingen plaatsvonden. De blauwe lijn op M=1,5 toont de magnitude van completie (Magnitude waarboven de catalogus compleet is sinds 1996). ....	113
Figuur 6.4	Reservoir drukken in MoRes voor het tijdstip eind 2012, weergegeven voor een verticale WZW-ONO doorsnede door het Loppersum gebied. Relatief hoge drukken aan de top van het reservoir (roze en paarse kleurcodering) zijn drukken in de Ten Boer kleilaag. Bij juxtapositie van de Ten Boer kleilaag tegen goed doorlatende reservoir zandsteen zijn lokaal significante drukverschillen over de breuken aanwezig. ....	114
Figuur 6.5	Magnitudes van aardbevingen versus (gemodelleerde) cumulatieve compactie van het reservoir (RTCM-model). De kleurschaal geeft het tijdstip van de bevingen weer. ....	115
Figuur 6.6	Plot van de relatie tussen het verzet van de breuken, het cumulatief seismisch moment van de bevingen eind 2012 en de cumulatieve compactie (RTCM) berekend voor 2012. a) lineaire schaal voor verticale as seismisch moment b) logaritmische schaal voor verticale as seismisch moment. Kleurcodering geeft het verzet van de breuken weer. ....	116
Figuur 6.7	Plot van de relatie tussen het totaal vrijgekomen seismisch moment (op een breuk pijler), reservoircompactie en berekende initiële reactivatie potentieel van de breuken. a) lineaire schaal voor verticale as seismisch moment b) logaritmische schaal voor verticale as seismisch moment. Kleurcodering geeft reactivatie potentieel. ....	118

- Figuur 6.8 Locatie verticale doorsnede door het Loppersum gebied, dat gekenmerkt wordt door relatief hoge seismiciteit. Het gebied wordt gekenmerkt door aanwezigheid van veel NNW-ZZO georiënteerde breuken met variabel verzet. De locatie van de Huizinge  $M_w=3,6$  beving is op de kaart aangegeven als witte cirkel. .... 121
- Figuur 6.9 Verticale doorsnede door het gebied nabij Loppersum. De locatie van de Huizinge beving is op het profiel weergegeven (witte cirkel). .... 122
- Figuur 6.10 Detail van de geometrie in Diana (model met breuk offset van 50m). Breuk offset in de Diana modellen wordt gevarieerd tussen 0m en 290m. De totale dikte van het reservoir (Ten Boer kleilaag, blauw, en reservoir zandsteen, geel) bedraagt 290m. Bij een offset van 290m is het rechter reservoirblok over de volledige reservoir dikte verplaatst. .... 123
- Figuur 6.11 Spanningsontwikkeling op een breuk bij depletie van het reservoir aan weerszijden van de breuk: a) Effectieve normaalspanning op het breukvlak tegen de diepte voor 0, 20, 40, 60 en 80% depletie, modelgrootte 2000 m, b) Schuifspanning op het breukvlak tegen de diepte voor 0, 20, 40, 60 en 80% depletie, modelgrootte 2000m, c) en d) ratio schuifspanning/effectieve normaalspanning tegen diepte, voor modelgrootte van 2000, resp. 10000 m. .... 124
- Figuur 6.12 Invloedsgebied van reservoir compactie nabij de breuk. a) Linkerzijde van het breukvlak b) rechterzijde van het breukvlak. De breuk met een verzet (*offset*) van 190m (paarse lijn) beïnvloedt de compactie van het reservoir over de grootste afstand – en vice versa. Rode pijl geeft de maximale afstand waarover de spanningsveranderingen door reservoir compactie worden overgebracht op het breukvlak weer. In lichtblauw wordt de compactie voor het 2D model (zie ook Figuur 6.10) voor het gebied rondom Loppersum getoond, in paars de compactie voor het model met uniforme eigenschappen. .... 125
- Figuur 6.13 Slip op de breuk tegen de diepte, voor 4 geometrieën: a) offset 0m, b) offset 50m, c) offset 100m, d) offset 290m. Voor elke geometrie is tevens de verhouding berekend tussen het reservoir moment en het 'slip moment' op de breuk. .... 126
- Figuur 6.14 Invloed van differentiële compactie in een reservoir compartiment nabij een breuk, zonder verzet, op de effectieve horizontale en verticale spanning in het reservoir gesteente. In het rechter reservoir compartiment is een gebied gemodelleerd met een hoge stijfheid ( $E=30\text{GPa}$ ), wat lokaal leidt tot relatief minder compactie. De grootte van het gebied varieert van 1100 tot 1300m afstand tot de breuk (lichtblauwe lijn figuur a) en c), en van 1100 tot 4500m afstand tot de breuk (groene lijn figuur a) en c) en paarse lijn figuur b) en d)). De onderbroken oranje lijn geeft in alle gevallen de spanningen weer bij een uniforme compactie van het reservoir. De pijlen onderin de figuren geven de grootte van het reservoir-deel met afwijkende compactie weer. De verticale rode lijn geeft de positie van de breuk weer. .... 127
- Figuur 6.15 Invloed van differentiële compactie binnen een reservoir compartiment op de verplaatsingen gemodelleerd op de breuk. a) Lager gelegen reservoir blok met homogene stijfheid – geen differentiële compactie binnen reservoir compartiment (porositeit,  $E_{\text{young}} = 15\text{GPa}$ ) b) lager gelegen reservoir blok met lokaal minder compactie door stijver reservoir segment ( $E_{\text{young}} = 30\text{GPa}$ ) tussen 1100 en 4600 m, c) lager gelegen reservoir blok met

lokaal meer compactie door minder stijf reservoir segment ( $E_{young} = 7,5 \text{ GPa}$ ) tussen 1100 en 4500 m afstand van de breuk. ....	128
Figuur 6.16 Relatie tussen het 'volumetrisch moment' en het seismisch moment van de grootste aardbevingen in de Nederlandse gasvelden (Buijze, in prep.). Het volumetrisch moment $dV_{res}$ is berekend op basis van de vergelijking $2GdV_{res}$ , met $G$ de schuifmodulus van het specifieke reservoirgesteente, $dV_{res}$ de volume verandering door compactie, berekend met de drukval $dP * C_m$ ( $dP$ is hierbij benaderd door aan te nemen dat $dP/P_{init}$ is $dV_{gas}/V_{gasinit}$ ). $C_m$ is de gemiddelde compactiecoëfficiënt voor het specifieke gasveld, $P_{init}$ de initiële reservoirdruk, $dV_{gas}$ Volume gas geproduceerd en $V_{gasinit}$ het oorspronkelijke gasvolume. ....	129
Figuur 7.1 Compactie in het interval 2013-2023 voor het marktvraag scenario en berekend met het RTCM model. ....	132
Figuur 7.2 Vier partiticoëfficiënt relaties met compactie: een constante coëfficiënt (blauw), exponentieel (rood), +95% betrouwbaarheidsinterval interval (lichtblauw) en +95% betrouwbaarheidsinterval met een bovengrens op 1% (paars). ....	134
Figuur 7.3 Aardbevingsdichtheidkaart voor het marktvraag scenario berekend met het RTCM compactiemodel gebaseerd op een genormaliseerde seismische energiedichtheid berekend uit de compactie voor het interval 2013-2023. ....	135
Figuur 7.4 Cornell-Vanmarcke distributie met $b=1$ , $M_{min}=1,5$ en $M_{max}=4,5$ (exponentiële toename van de partiticoëfficiënt (Tabel 7.1)).....	136
Figuur 7.5 Versnelling aan van het aardoppervlak voor een beving met een sterkte van $M=4,0$ op de Richter schaal voor één gekozen locatie in het Groningen veld. ....	137
Figuur 7.6 Drie locaties (noord, centrum, zuid) welke gebruikt worden in de seismische hazard analyse. ....	139
Figuur 7.7 2% overschrijdingskans voor de gegeven grondversnellingen (PGA in $cm/s^2$ ), voor de exponentiële partiticoëfficiënt compactie functie en de komende 10 jaar. ....	139
Figuur 7.8 2% overschrijdingskans voor de gegeven grondversnellingen (PGA in $cm/s^2$ ), voor de constante partiticoëfficiënt compactie functie (links) en de +95% betrouwbaarheidsgrens partiticoëfficiënt compactie functie (rechts) voor de komende 10 jaar. ....	140
Figuur 7.9 a) Verandering in het (cumulatief) reservoir volume en aantal bevingen per compactie-interval b) cumulatief reservoirmoment en cumulatief seismisch moment per compactie interval c) aantal bevingen per eenheid volume verandering weergegeven per compactie interval d) totale seismisch moment fractie per compactie interval. Doorgetrokken groene lijn is de relatie voor de partiticoëfficiënt van NAM (2013b) voor het time decay compactiemodel (2013). De onderbroken blauwe lijn geeft de relatie tussen de partiticoëfficiënt en de cumulatieve compactie weer berekend voor het RTCM model.....	142
Figuur 7.10 Locatie van de deelgebieden ter bepaling van de lokale relatie tussen cumulatieve compactie en seismisch moment. ....	144
Figuur 7.11 Totale seismische moment fractie of partiticoëfficiënt versus compactie voor 7 deelgebieden in het Groningen gasveld. Locatie van de deelgebieden wordt weergegeven in Figuur 7.10. De blauwe lijn in b) geeft de	



oorspronkelijke best-fit weer van het 'time decay' compactie model beschreven in NAM (2013b).....	145
Figuur 7.12 Compactie in het interval 2013 tot 2018 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2).....	146
Figuur 7.13 Compactie in het interval 2013 tot 2018 voor het marktvraag scenario (Tabel 3.2). ....	147
Figuur 7.14 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2).....	148
Figuur 7.15 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het marktvraag scenario (Tabel 3.2). ....	149
Figuur 7.16 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2) en berekend met het Time-Decay compactiemodel. ....	150
Figuur 7.17 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het marktvraag scenario (Tabel 3.2), berekend met het Tim-Decay compactiemodel. ....	151

## Lijst van tabellen

Tabel 3.1	Overzicht van de slechtst gefitte metingen (samengevat over de hele geschiedenis tot 1-1-2013) .....	53
Tabel 3.2	Overzicht van de scenario's voor het dynamische model (bcm = mrd Nm <sup>3</sup> ). .....	59
Tabel 3.3	Overzicht van de afname in gas productie voor de verschillende scenario's voor de periode 1-1-2014 tot 1-1-2080. ....	60
Tabel 3.4	Overzicht van de drukdaling en productie rond Loppersum. Productie is de cumulatieve productie van de clusters LRM, PAU, POS, OVS en ZND over de periode 2014 t/m 2017. ....	64
Tabel 4.1	Aantal peilmerken in de datasets. ....	70
Tabel 5.1	Toestandsparementers gebruikt in de modellen. ....	77
Tabel 5.2	Materiaal parementers gebruikt in de modellen. ....	78
Tabel 5.3	Red Flag output voor het RTCM model. ....	87
Tabel 5.4	Red Flag output voor het Time-Decay model. ....	87
Tabel 5.5	Input parementers voor het gelineariseerde isotachenmodel berekend uit de beste set parementers voor het RTCM model in Tabel 5.3. ....	88
Tabel 6.1	Gradiënten van horizontale en verticale spanning, gebaseerd op NAM (2013b). ....	117
Tabel 6.2	Overzicht belangrijkste kenmerken structurele regio's Groningen veld. ....	119
Tabel 6.3	Geomechanische parementers van de eenheden onderscheiden in het Diana model. Waarden tussen haakjes zijn waarden gebruikt in het model met uniforme parementers. ....	123
Tabel 7.1	Het totaal aan seismisch moment (Nm) wat kan vrijkomen in de periode 2013-2023 voor verschillende aannames van de relatie van de partiticoëfficiënt met de compactie. Als dit seismisch moment in één keer zou vrijkomen zou dat leiden tot de maximale magnitudo in kolom 3. ....	133
Tabel 7.2	Overschrijdingskansen voor PGA in cm/s <sup>2</sup> voor de locatie in het centrum (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5). ....	138
Tabel 7.3	Overschrijdingskansen voor PGA in cm/s <sup>2</sup> voor de locatie in het noorden (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5). ....	138
Tabel 7.4	Overschrijdingskansen voor PGA in cm/s <sup>2</sup> voor de locatie in het zuiden (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5). ....	138
Tabel 7.5	Overschrijdingskansen voor PGA in cm/s <sup>2</sup> voor de locatie in het centrum (Figuur 7.6) en 1.000 catalogi, uitgerekend voor een constante functie van de partiticoëfficiënt en de exponentiële functie (Figuur 7.5). ....	141

# 1 Inleiding

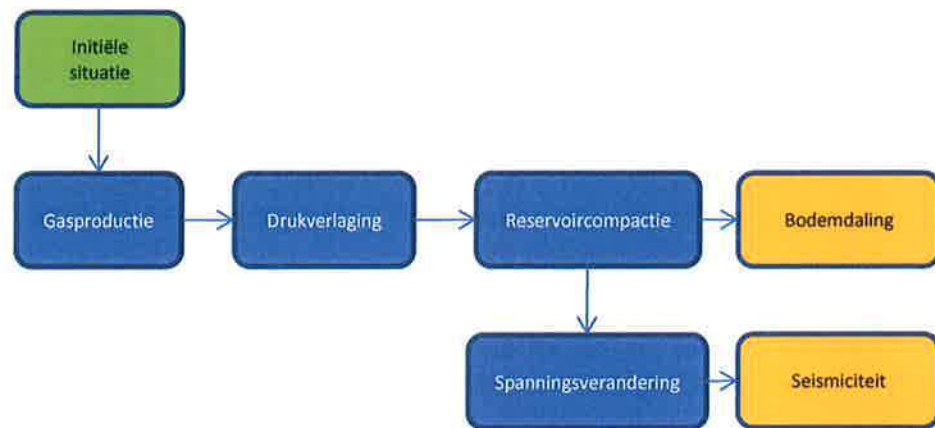
Het Groningen gasveld is sinds 1964 in productie. Als gevolg van deze productie vond in 1991 in Middelstum de eerste, aan gasdepletie gerelateerde beving plaats. Deze beving had een kracht van 2,4 op de schaal van Richter. Sindsdien hebben zich honderden, meestal kleine ( $M < 1.5$ ) bevingen voorgedaan boven het veld. In augustus 2012 vond in Huizinge de tot nu toe grootste beving plaats met een kracht van 3,4 op de schaal van Richter en een moment magnitude van 3,6. Na analyse van de frequentie en magnitude van de bevingen in Groningen concludeerde Staatstoezicht op de Mijnen (Muntendam-Bos en De Waal, 2013) dat het aantal bevingen alsook de kracht van de bevingen toeneemt en afhankelijk is van de productiesnelheid van het Groningen gasveld. Hierop stelde de minister van Economische Zaken in februari 2013 11 onderzoeken in en meldde dit via een brief naar de tweede kamer (referentie TK 2012-2013 33529, no. 2). Deze onderzoeken dienen als input voor de wijziging van het winningsplan Groningen.

In dit rapport worden controleberekeningen uitgevoerd ter voorbereiding op het advies over het gewijzigde winningsplan Groningen zoals beschreven in offerte met kenmerk DGETM-EM/13003762 van april 2013. Het uitgangspunt hiervan was dat, na indiening van het geactualiseerde winningsplan door de NAM (per 1-12-2013) er een zeer beperkte periode is voor het uitbrengen van het TNO-AGE advies. Het werkplan bevatte zes onderdelen als volgt opgesteld:

1. Geologisch model
2. Reservoir dynamisch model
3. Compactie/Bodemdaling
4. Breukmodel en seismiciteit
5. Alternatieve productiescenario's en effect op seismiciteit
6. Voorbereiding advisering geactualiseerd winningsplan Groningen

Hierbij wordt uitgegaan van een statisch reservoirmodel (Petrel) en een dynamisch reservoirmodel (MoRes) die door de NAM beschikbaar zijn gesteld aan TNO-AGE in november 2013. Deze modellen worden op kritische punten voor de compactie en bodemdalingsstudie beoordeeld, in samenhang met de door de NAM bij het winningsplan verstrekte informatie.

Het onderstaande schema heeft het causale verband tussen gasproductie, bodemdaling en seismiciteit. TNO-AGE heeft de opzet van haar onderzoek daaraan gekoppeld. Als strategie is gekozen om focus te leggen op die aspecten, die dominant bepalend zijn voor de relatie tussen gaswinning en seismiciteit. Het in eigen beheer bouwen van een geologisch modellen een dynamisch reservoirmodel zou qua beschikbare tijd en middelen niet haalbaar zijn geweest. Daarom zijn hiervoor de door de NAM ontwikkelde modellen als vertrekpunt genomen. Die modellen zijn overigens kritisch geëvalueerd en geconfronteerd met uitkomsten van andere projectonderdelen.



### Indeling rapport

In dit rapport worden de gevolgde werkwijze, het ontwikkelde modelinstrumentarium en de toepassing daarvan op het Groningen veld beschreven en vergeleken met de werkwijze en uitkomsten van de NAM..

In Hoofdstuk 2 en 3 worden respectievelijk het door NAM beschikbaar gestelde statische en dynamische reservoirmodel voor Groningen beschreven. Voor beide modellen worden een aantal, voor de compactiemodellering kritische aspecten nader geanalyseerd. Daarnaast wordt in hoofdstuk 3 een aantal productiescenario's en productiefilosofieën gedefinieerd en gemodelleerd. Hoofdstuk 4 focust op de bodemdalingmetingen. De differentiestaat is beschikbaar gesteld door NAM. Daarnaast heeft een analyse plaatsgevonden op de stabiliteit van de peilmerken uitgaande van de originele data van Rijkwaterstaat. In Hoofdstuk 5 wordt de compactiemodellering opgezet en toegepast op het Groningen veld. Hierbij wordt de compactie voor de verschillende productie(beperking)scenario's en de productiefilosofieën doorgerekend. Hoofdstuk 6 beschrijft de kritieke spanning op de breuken in het Groningen veld en de 2-D geomechanische modelering daarvan. In Hoofdstuk 7 wordt de compactie gebruikt om de seismische hazard te berekenen volgens de methode in rapport 5 (NAM 2013a). Daarnaast wordt het effect van alternatieve productiescenario's op het seismische hazard geëvalueerd. Tenslotte worden de belangrijkste conclusies samengevoegd in Hoofdstuk 8.

## 2 Statisch model

### 2.1 Introductie statisch model

De gashoudende lagen van het Groningen veld bevinden zich in sedimentgesteenten uit het Rotliegend (Perm) en voor een zeer klein gedeelte (in het zuidelijk deel van het veld) de ondergelegen Limburg Groep (Carboon). De huidige diepte van het reservoir ligt tussen de 2600-3200 m. Zechstein zoutafzettingen vormen de afsluitende laag voor de Rotliegend reservoirs. Natuurlijke breukzones doorkruisen de ondergrond en dus ook het reservoirgesteente van het Groningen veld (Figuur 2.1). De breuken vormen zones waarlangs gesteentevolume zich kan verplaatsen en waar mogelijk aardbevingen kunnen voorkomen.

Het statisch model is een driedimensionaal model van de verdeling van reservoir eigenschappen en de breukzones die zich in het reservoirgesteente bevinden. Het is het geologisch raamwerk van het Groningen gasveld en levert de basisinput voor de bodemdalingsstudie en geomechanische modellering (Hoofdstuk 5-6). Ook vormt het model de basis voor het dynamische reservoirmodel, waarin gas/water beweging kan worden geëvalueerd en voorspeld (zie ook Hoofdstuk 3).

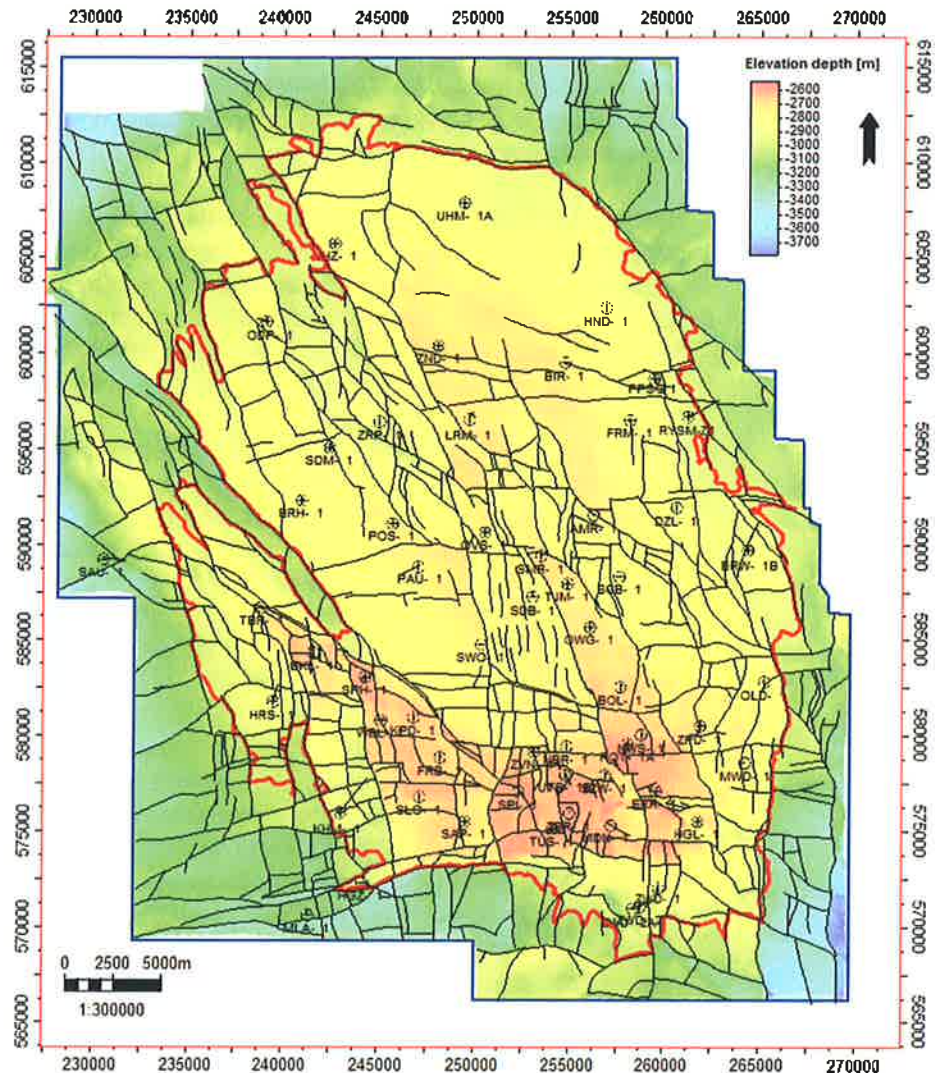
Het [REDACTED] statische model (NAM, 2012a) is het resultaat van een revisie van het Groningen veld door NAM geïnitieerd in 2009. Het vorige model stamt uit 2003 (NAM, 2003) en bestond uit een grover grid. Het bijbehorende dynamische model onderschatte de gemeten reservoirdrukken. Andere redenen om het statische en dynamische model te herzien waren nieuwe inzichten in de interne Rotliegend reservoir architectuur, een grotere dataset petrofysische logs en de aanzienlijke ontwikkelingen in modeltechnieken/software (NAM, 2012a).

Met behulp van informatie uit de in het Groningen veld geboorde putten heeft NAM in het [REDACTED] model verschillende reservoir eigenschappen van het veld gemodelleerd, waaronder de netto/bruto verhouding permeabiliteit en porositeit. Vooral de porositeit is van grote invloed op de berekening van de compactie (Hoofdstuk 5). Over het algemeen geldt dat een hogere porositeit van het reservoirgesteente tot meer compactie (en bodemdaling) kan leiden als gevolg van gaswinning. Bij het modelleren van de reservoir eigenschappen heeft de indeling in reservoirzones en de stratigrafische modelarchitectuur van de zones invloed op de resulterende verdeling van reservoir eigenschappen in het Groningen veld.

Het [REDACTED] model bevat informatie over de positie en grootte van de breukzones welke gebruikt wordt in de geomechanische modellering (Hoofdstuk 6). Het is van groot belang de structurele informatie en reservoir eigenschappen uit het [REDACTED] model zo goed mogelijk te begrijpen omdat deze informatie aan de basis ligt van de compactieberekening en verdere geomechanische studies. Met name het breuk- en porositeitsmodel vormen essentiële elementen in deze studies. Mogelijke alternatieve interpretaties van deze elementen kunnen de conclusies van de geomechanische studies beïnvloeden.

Het doel van de evaluatie van het statisch [REDACTED] model is te onderzoeken hoe robuust het [REDACTED] model is en of alternatieve interpretaties mogelijk of zelfs gewenst zijn. Tevens wordt onderzocht welke invloed mogelijk alternatieve interpretaties zouden kunnen hebben op de compactie en verdere geomechanische studies. Naast een beknopt overzicht van de beschikbare gegevens in het [REDACTED] model zal dit hoofdstuk zich concentreren op de volgende parameters:

- Breukenmodel (Paragraaf 2.3)
- Stratigrafisch model (Paragraaf 2.4)
- Porositeitsmodel (Paragraaf 2.5)



Figuur 2.1 Dieptekaart van top reservoir (Top Rotliegend) en de positie van de breuken in het [REDACTED] model. Het Groningen veld is rood begrensd en het studiegebied in blauw. Putlocaties zijn weergegeven met zwarte cirkels (productieclusters worden gerepresenteerd door één putnaam).

Figuur 5.13 toont de gemodelleerde compactie voor Groningen (Hoofdstuk 4 en 5). Op de peilmerklocaties is het verschil tussen de geobserveerde en de berekende bodemdaling weergegeven in kleur. Een rode kleur geeft de gebieden aan waarbij de berekende bodemdaling groter is dan de geobserveerde bodemdaling. Over het

algemeen komt de gemodelleerde bodemdaling goed overeen met de geobserveerde bodemdaling, met uitzondering van drie gebieden:

- 1) Overschatting van de berekende bodemdaling in het noorden nabij Uithuizen;
- 2) Overschatting van de berekende bodemdaling in het centraal-oostelijke gedeelte van het Groningen veld in de omgeving van Appingedam-Delfzijl;
- 3) Onderschatting van de berekende bodemdaling in het westelijke gedeelte van het veld, ten zuiden van Winsum en Bedum.

TNO-AGE heeft de verschillen tussen berekende en geobserveerde bodemdaling onderzocht. Evaluatie van de peilmerk data zelf laat geen regionaal patroon van onbetrouwbare datapunten zien dat correspondeert met de drie hierboven beschreven gebieden (Figuur 5.13 en Hoofdstuk 4 en 5). Daarnaast is onderzocht of lokale geologische variaties in de boven het Rotliegend gelegen lagen overeenkomen met de drie gebieden. Zowel dikte variaties in het Zechstein zout (Appendix A.1) als Holocene/Pleistocene afzettingen zijn bestudeerd, maar ook hier blijkt geen duidelijke correlatie met de drie gebieden.

Tenslotte heeft TNO-AGE het porositeitsmodel uit het [REDACTED] model bestudeerd. Het porositeitsmodel vormt de basis voor de compactie (en bodemdaling) berekeningen. Veranderingen of onzekerheden in het porositeitsmodel hebben direct invloed op de berekende compactie en bodemdaling.

NAM had in 2009 het doel met de revisie van het Groningen veld om met het vernieuwde statische en dynamische model een betere history-match tussen productie- en drukdata te verkrijgen, en om het dynamisch gedrag van water in het Groningen reservoir beter te begrijpen. Het statisch model met berekende reservoir eigenschappen lijkt geschikt voor deze doeleinden. TNO-AGE is van mening dat NAM's keuzes bij de bouw van het statische model mogelijk niet optimaal zijn voor bodemdalings- en geomechanische studies. Dit hoofdstuk beschrijft de uitkomst van TNO-AGE's studie van het statisch model, het mogelijke effect van het huidige model op bodemdalings- en geomechanische studies en de door TNO-AGE gewenste aanpassingen in eventuele vervolgstudies.

## 2.2 Beschikbaar materiaal

Een kopie van het statisch model in Petrel (NAM, 2012a) is door NAM beschikbaar gesteld. Daarnaast heeft TNO-AGE het bijbehorende rapport ([REDACTED]) en een presentatie uit november 2012 (NAM, 2012c) ontvangen. Het [REDACTED] beschrijft de studies uitgevoerd door NAM op het gebied van seismische interpretatie, structurele geologie, petrofysica, stratigrafie, depositiemodel, statisch model en GIIP (Gas Initieel In Plaats).

Het [REDACTED] Petrel model omvat:

- Begrenzing van studie gebieden/veld/aquifers
- Horizons (reservoir en bovengelegen lagen)
- FWL (Free Water Level) informatie
- Aquifers
- Geïnterpreteerde breuken en breukmodel
- Reservoir eigenschappen model (kleivolume, porositeit, netto-bruto verhouding, gas saturatie, permeabiliteit)
- Putten in het Groningen veld en omgeving en de petrofysische evaluaties

### 2.2.1 *Putten gebruikt voor bepaling petrofysische eigenschappen*

Sinds het statisch model GFR2003 heeft NAM een uitgebreide petrofysische evaluatie van alle putten in het Groningen gasveld uitgevoerd. In tegenstelling tot het statisch model uit 2003 waarin 125 putten waren gebruikt, is in het [REDACTED] model data van 365 putten gebruikt. Naast de individuele productie- en observatieputten zijn ook de aanwezige productieputten uit de 28 productie clusters meegenomen in het huidige model. Het [REDACTED] model bevat in totaal 425 putten (putten in het Groningen veld en in de nabij gelegen velden).

### 2.2.2 *Studiegebied en seismische datasets*

Om de verschillende lagen en breuken in de ondergrond te karteren wordt gebruikt gemaakt van seismiek.

In tegenstelling tot de GFR2003 studie waarin slechts één seismische survey werd gebruikt (PreSDM R826\_2), worden in de [REDACTED] drie seismische surveys gebruikt door NAM:

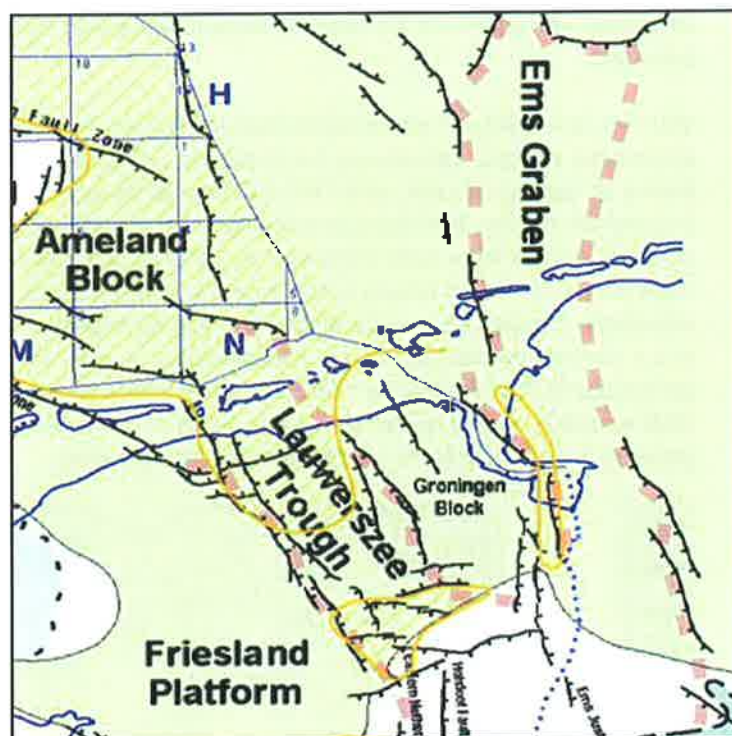
- de samengevoegde PreSDM dataset R2296\_07 (RMO gecorrigeerde R826\_2) uit 2007 welke het gehele Groningen veld beslaat.
- PreSDM data van Bedum (R2118\_05) (westelijk deel van het Groningen veld).
- PreSDM data van Veendam (R2437\_09) (zuidelijk deel van het Groningen veld).

Deze bovengenoemde drie meest recente seismische datasets zijn niet beschikbaar gesteld aan TNO-AGE. TNO-AGE heeft slechts beschikking over een attribuut volume dat uit de seismische survey is gegenereerd (Figuur 2.3). Dit Ant Track volume (R2296\_07Ant Tracking) is gegenereerd tussen 2400 en 4100 m. diepte en beslaat dus de reservoir zone van het Groningen veld. Een Ant Tracking volume versterkt de ruimtelijke discontinuïteit binnen de seismische data en geeft over het algemeen een beter beeld van mogelijke breukzones.

## 2.3 **Breukenmodel**

Het Groningen gasveld bevindt zich in het tektonisch stabiele Groningen Hoog. Het is omgeven door de Eems Graben in het oosten en de Lauwerszee Trog in het westen (Figuur 2.2). Zowel het Groningen Hoog als de grabens zijn gevormd tijdens een extensiefase in het laat Carboon/vroeg Perm. Tijdens deze extensie fase is waarschijnlijk de meerderheid van de NW-ZO georiënteerde breuken ontstaan in het Groningen veld. De O-W georiënteerde breuken zijn waarschijnlijk al voor de Saalien unconformity geïnitieerd. De evolutie van het breukensysteem in het Rottliegend is complex en bestaat uit verschillende fasen van re-activatie (bijv. Grötsch et al., 2011).





Figuur 2.2 Structurele elementen in de Groningen regio ( ).

NAM heeft op basis van de seismiek een groot aantal breuken gerepresenteerd door om de 400 m voor grote breuken (en om de 100 m voor kleine breuken) de aansnijding in de seismiek te markeren. Met behulp van deze aansnijdingen zijn in Petrel de breuken gecreëerd. Het door Petrel gemodelleerde breukvlak wordt vervolgens weergegeven door "breukpijlers" (twee-punts geïnclineerd), die standaard verlengd zijn tot 200 m boven en 400 m onder het Top Rotliggend vlak.

Het breukmodel is verdeeld in vier gebieden waarin een onderverdeling in sub-sets is gemaakt:

- NW Periferie
- NE Periferie
- SW Periferie
- SE Periferie

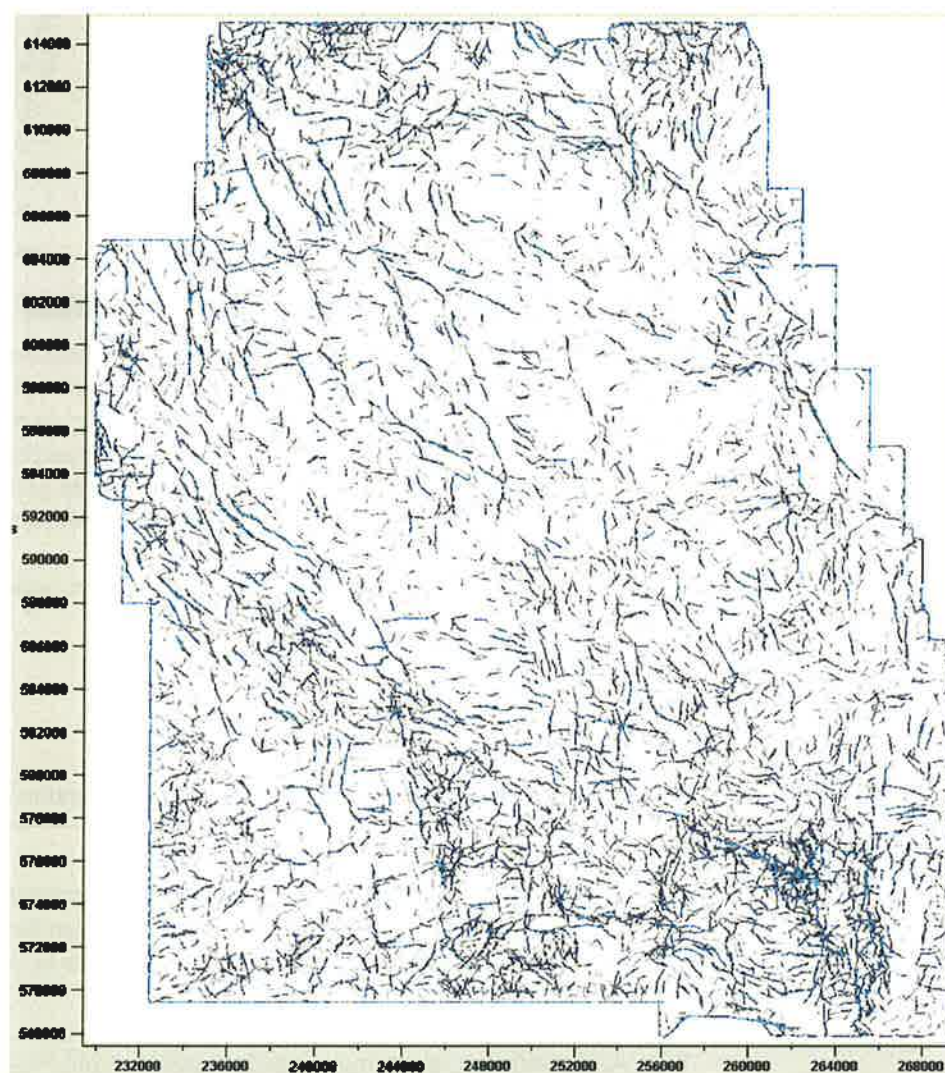
Elk van de vier gebieden bevat een set met '*major-boundary faults*' en een aantal sets met '*minor faults*'.

In het ( ) onderscheidt NAM negen verschillende structurele domeinen, waarvan de breuktrend en seismiciteit worden beschreven. Deze structurele domeinen zijn afgebeeld in Figuur 6.12, waarbij ook de seismiciteit is weergegeven.

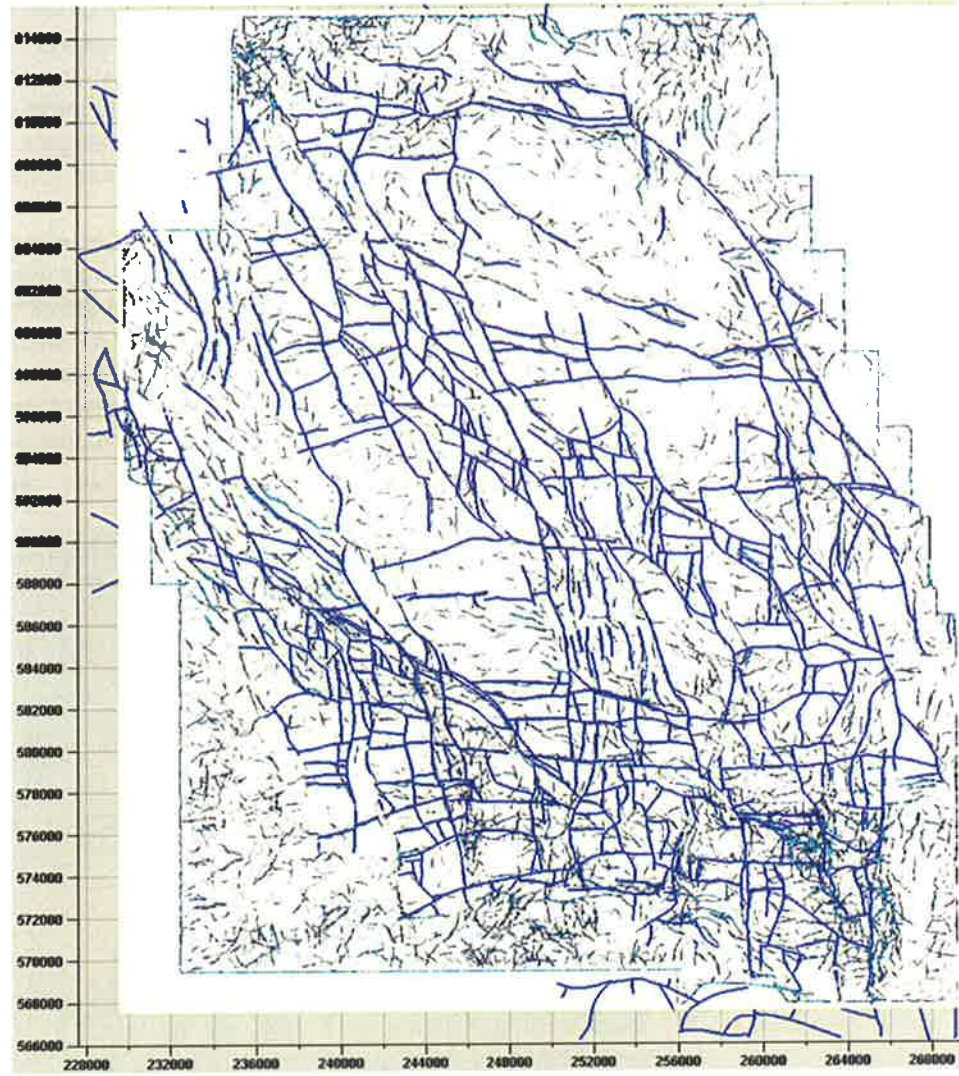
TNO-AGE heeft voor alle gemodelleerde breuken in het model lengte, oppervlak, hellingshoek en inclinatie bepaald. Tevens is voor elke gemodelleerde breuk de juxtapositie langs de breuk berekend. De individuele breuk data is naar Matlab geëxporteerd voor de geomechanische analyse (Hoofdstuk 6). Hiervoor zijn de breukpijlers loodrecht op de breukhelling geprojecteerd. Op elke breukpijler zijn de

snijpunten van zowel top als basis Rotliegend aan beide zijden van de breuk berekend.

Voor een evaluatie van de geïnterpreteerde breuken is gebruik gemaakt van het seismische attribuut volume van het Rotliegend (Figuur 2.3 en 2.4). Hierin, en met kennis uit eerdere studies, acht TNO-AGE zowel de locatie van geïnterpreteerde breuken als de breukarchitectuur realistisch. TNO-AGE adviseert om het verloop en afbuiging van de individuele breuken ook in het ondergelegen Carboon te karteren. Deze informatie is van belang voor begrip van het reactivatie potentieel van individuele breuken en voor de afschatting van de maximum fysische magnitude m.b.v. breukoppervlaktes, en zou dus onderdeel moeten zijn van de geomechanische modellering (Hoofdstuk 6). Aangezien het [REDACTED] model door NAM specifiek doelde op het statisch en dynamisch modelleren van het Groningen gasveld, is deze informatie op dit moment niet aanwezig.



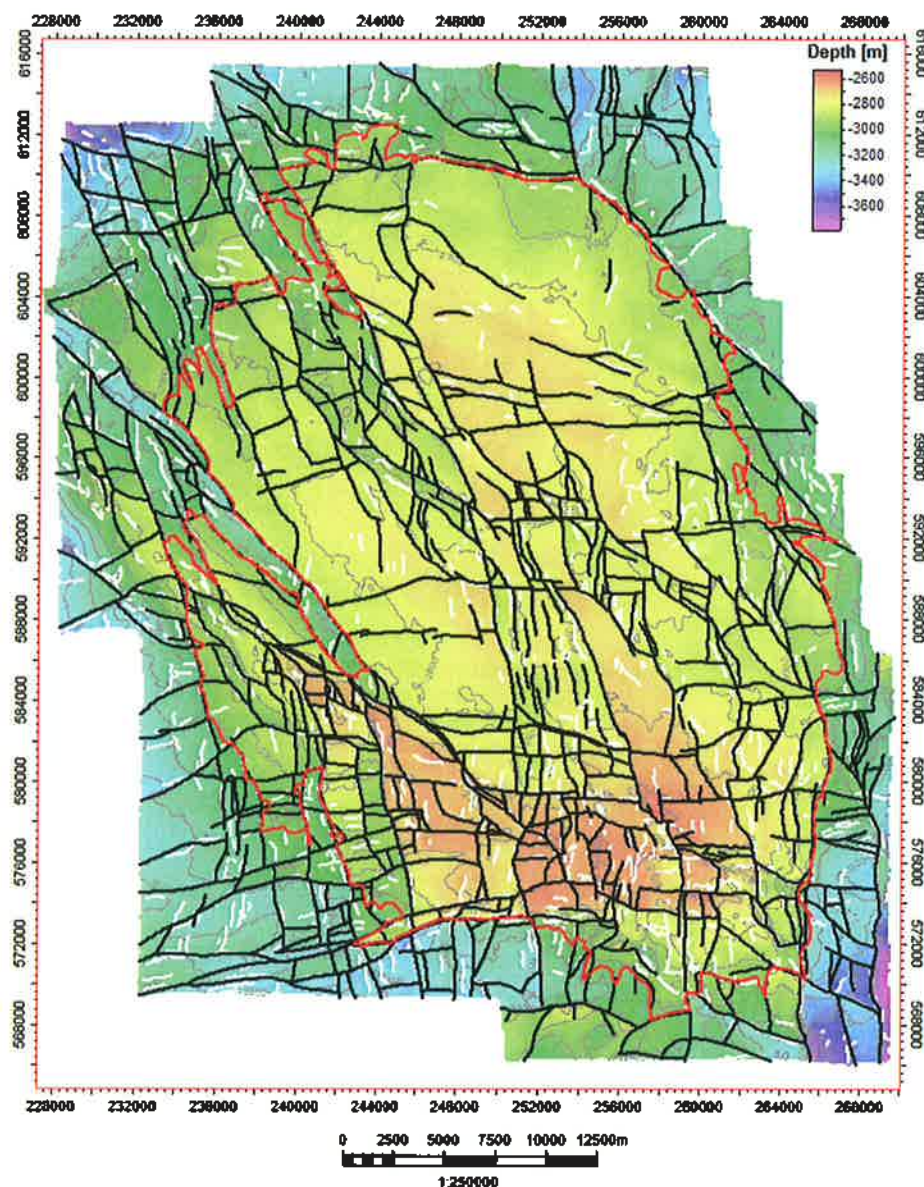
Figuur 2.3 Doorsnede op 3020 m diepte van het Ant Tracking volume (R2296\_07Ant\_Tracking) van NAM.



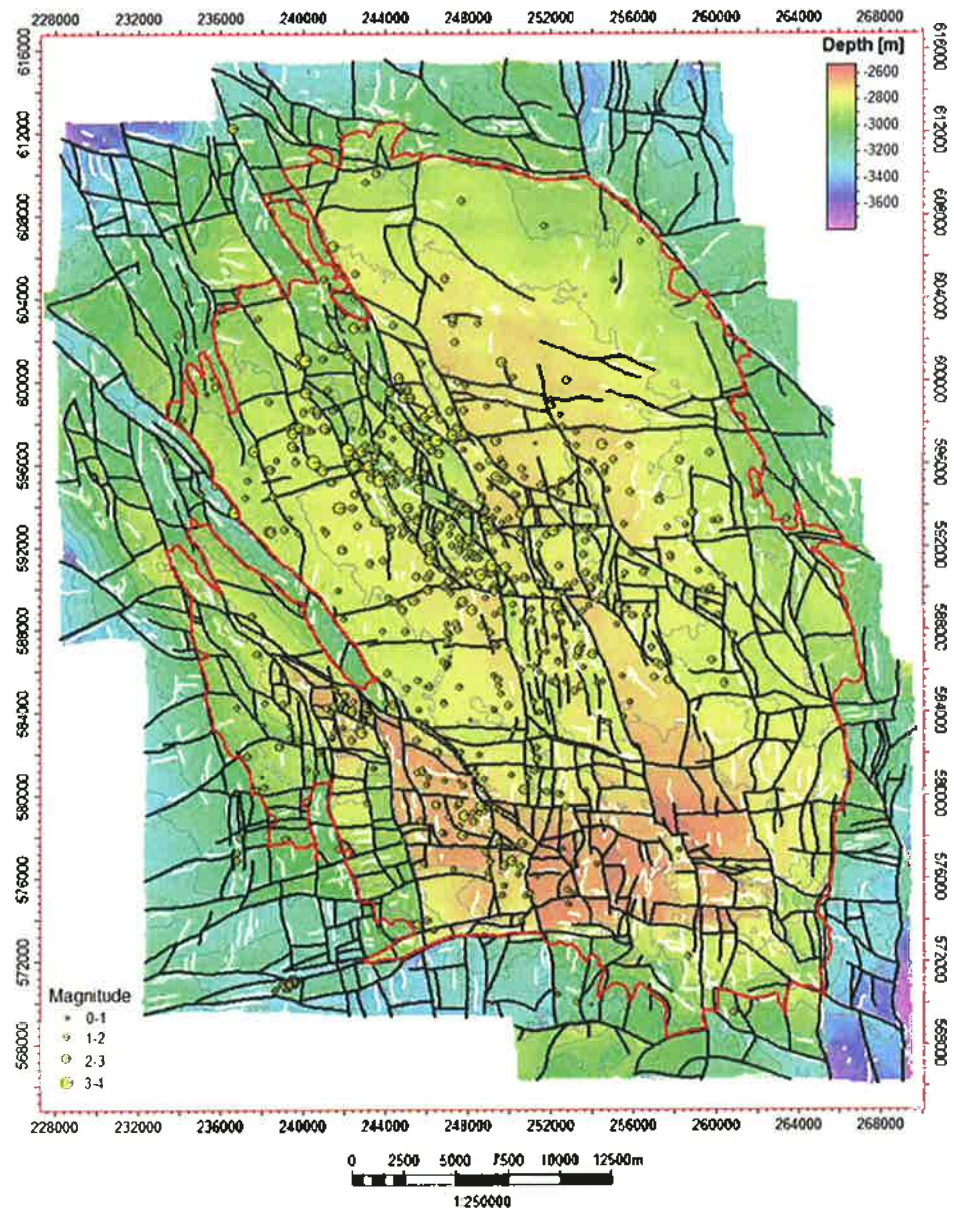
Figuur 2.4 Doorsnede op 3020 m diepte van het Ant Tracking volume van NAM (R2296\_07Ant\_Tracking), met weergave van de door NAM gemodelleerde breuken.

Binnen de [redacted] maken 707 breuken deel uit van het uiteindelijke statische model (Figuur 2.1). Deze 707 breuken zijn gebruikt in de geomechanische analyse. Het [redacted] Petrel project bevat daarnaast nog 377 geïnterpreteerde breuken die geen deel van het model vormen. Uit informatie verkregen van de NAM blijkt dat er 1800 geïnterpreteerde breuken in het Rotliegend reservoir kunnen worden beschreven. Vervolgens is modelinformatie van 1579 breuken aan TNO-AGE geleverd (NAM, 2013c).

Figuur 2.5 toont alle aan TNO-AGE verstrekte breuken, waarbij de 707 gemodelleerde breuken in zwart zijn weergegeven en de overige breuken in wit. De additionele breuken zijn over het algemeen klein wat betreft lengte en breukverzet. Doorsneden door het Ant Tracking volume (Figuur 2.4) tonen een nog groter aantal kleine breuken. Ook met de huidige modelleertechnieken is een geologisch model met 707 breuken reeds zeer uitgebreid. TNO-AGE meent, dat met dit aantal breuken een goed bruikbaar geologisch en reservoirmodel gebouwd is.



Figuur 2.5 Top Rotliegend dieptekaart met de gemodelleerde breuken (zwart) en de additionele breuken (wit).

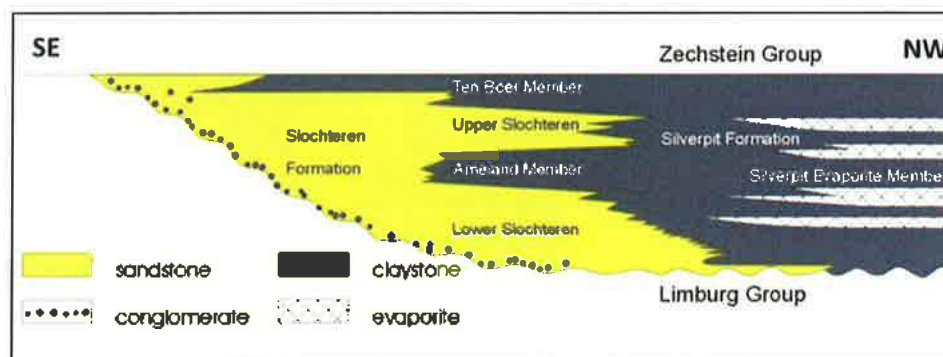


Figuur 2.6 Top Rotliegend dieptekaart met de gemodelleerde breuken (zwart) en de additionele breuken (wit), waarop de seismiciteit, geregistreerd door het KNMI, is weergegeven.

Voor een gedetailleerde geomechanische studie zijn ook de overige breuken van belang. Figuur 2.6 toont de bevingen geregistreerd door het KNMI op de breukenkaart. Aangezien de laterale onzekerheid van de locatiebepaling van een beving circa 500 m is ([www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)), verwacht TNO-AGE een geïnterpreteerde breuk binnen deze afstand van iedere beving. Een aantal van de bevingen is op een grotere afstand van de gemodelleerde breuken geregistreerd. TNO-AGE acht het waarschijnlijk dat ook kleinere en mogelijk sub-seismische breuken (= niet te zien op seismiek) bevinggevoelig zijn. Daarom adviseert TNO-AGE een breukinterpretatie uit te voeren waarin alle in de seismiek zichtbare breuken geïnterpreteerd worden en deze additionele breuken ook in mogelijke (vervolg) geomechanische studies mee te nemen (zie ook Hoofdstuk 6).

## 2.4 Stratigrafie en modelarchitectuur

De gashoudende lagen van het Groningen veld bevinden zich in gesteenten uit het Rotliegend (Perm) en voor een zeer klein gedeelte (in het zuidelijke deel van het veld) de ondergelegen Limburg Groep (Carboon). Het Rotliegend is onderverdeeld in twee belangrijke formaties: de Slochteren en Silverpit formatie. In deze formaties worden de sedimenten gegroepeerd op basis van hun dominante type gesteente (zand respectievelijk klei). Van zuid naar noord verandert de aard van de sedimenten. Figuur 2.7 toont het door de NAM gehanteerde stratigrafische model van de Rotliegend afzettingen in de Groningen regio. Voor een uitgebreide beschrijving van het reservoirgesteente verwijst TNO-AGE naar [REDACTED] en publicaties zoals Grötsch et al. (2011), Van Ojik et al. (2011) en Wong et al. (2007).

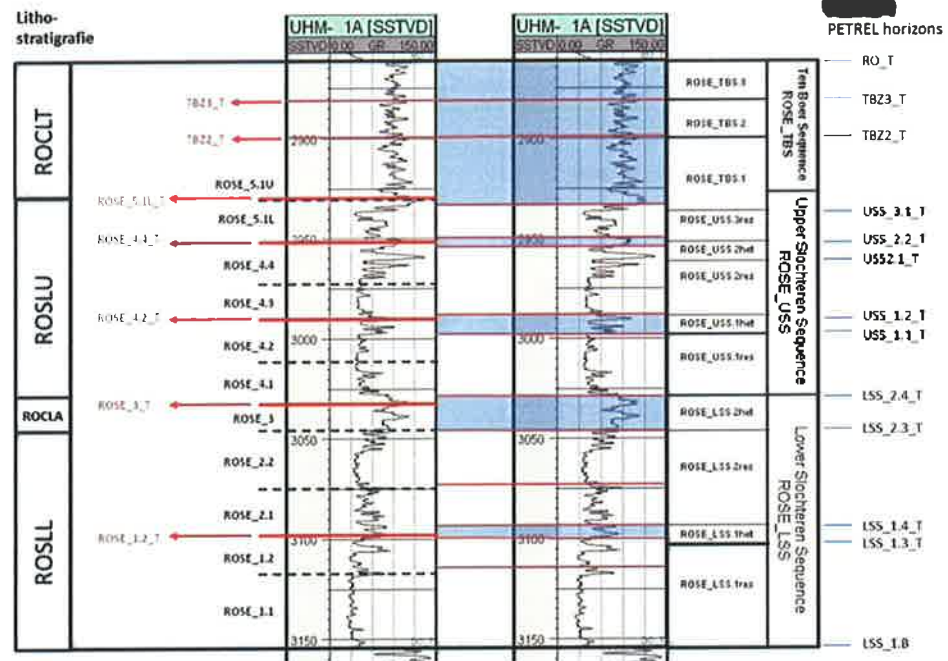


Figuur 2.7 Doorsnede NW-ZO toont het stratigrafische model van het Rotliegend over de Groningen regio ([REDACTED]).

De totale dikte van het Rotliegend varieert van ~100 m in het zuid-zuidoosten tot ~300 m in het noord-noordwesten van het Groningen veld. Van oost naar west is de dikte van het Rotliegend relatief uniform. De Ameland en Ten Boer kleisteen zijn afgezet tijdens hoge waterstanden in het centrale zoutwaterbekken van het Zuidelijk Perm Bekken dat ten gevolge van de hoge waterstand ver buiten zijn gewone oevers treedt. Deze soms extreme schommelingen worden gerelateerd aan variaties in het (lokale) klimaat. De Ameland Kleisteen wordt gezien als een aparte lithologische eenheid in het noordelijk deel van het Groningen veld en wordt zowel als correlatief niveau als iso-tijdspakket gezien (Mijnlieff en Geluk, 2011, van Ojik et al., 2011).

Voor de bouw van het statisch model heeft NAM het Rotliegend reservoir in zones onderverdeeld (Figuur 2.8). De verdeling is gebaseerd op logdata van de putten, waarbij vijf intervallen met hoge Gamma Ray (GR) waarden volgens NAM corresponderen met relatief hoge (grond)water niveaus tijdens afzetting. Het stratigrafisch concept dat NAM generiek hanteert is een sequentie-stratigrafisch model waarbij correlatielijnen tijdslijnen representeren. Deze correlatielijnen komen niet noodzakelijkerwijs overeen met lithologische correlatielijnen. De verschillende zones zijn het meest prominent in het noordelijk deel van het Groningen veld. Stratigrafische correlatie van de verschillende zones wordt lastiger naar het zuiden toe want klei gaat lateraal over in zand. NAM maakt gebruik van verschillende benamingen voor de horizons en well-tops. De benaming gebruikt in het [REDACTED] komt niet overeen met die in het Petrel [REDACTED] model (e.g. ROSE\_3T vs

LSS\_2.4\_T). TNO-AGE heeft op basis van NAM's [redacted] Petrel model de horizon naamgeving afgeleid (rechter kolom in Figuur 2.8), die in het vervolg van dit rapport gebruikt zal worden.



Figuur 2.8 Reservoirzone verdeling door NAM, volgens het [redacted] en de corresponderende horizonbenaming uit het Petrel [redacted] model (rechter kolom afgeleid door TNO uit het [redacted] model).

In tegenstelling tot de stratigrafische modelarchitectuur van het statisch model uit 2003 (NAM, 2003) waar NAM continue verbreiding van alle stratigrafische lagen veronderstelde, beschrijft het [redacted] de voorkeur voor een onlap-model voor de Rotliegend afzettingen. TNO-AGE onderschrijft deze onlap-modelarchitectuur waarbij de Rotliegend afzettingen in het zuiden stranden op het onderliggende Carboon. Echter, in het [redacted] model (Figuur 2.9 en Figuur 2.10) is alleen de LSS1.res zone gemodelleerd volgens een onlap-configuratie ("follow top" in Figuur 2.9). Alle overige zones zijn proportioneel gemodelleerd (wat overeenkomt met een wedge configuratie). De seismische doorsnede van noord naar zuid (Figuur 2.11 en Figuur 2.12) illustreert een onlap configuratie van alle Lower Slochteren en Ameland zones. De doorsnede in Figuur 2.11 kruist een aantal putten waarin NAM de verschillende Rotliegend well tops aangeeft. Indien de ROCLA\_HST en ROSE\_3\_T overeenkomen met de lithostratigrafische Ameland kleisteen en bovendien samenvallen in put LRM-1, dan lijkt er een discrepantie aanwezig tussen de well tops en de op de seismische doorsnede geïnterpreteerde "Ameland event with onlap against Top\_DC". De diktegrids op basis van de putzonaties [redacted] komen dan niet overeen met de zonedikte die blijkt uit de "Ameland event with onlap against Top\_DC" in deze seismische doorsnede.

Figuur 2.10 toont een noord-zuid doorsnede van het porositeitsgrid uit het [redacted] statische model. Deze doorsnede toont de onlap van de onderste Lower Slochteren zandsteen (LSS1.res). De daarboven gelegen Lower Slochteren zandsteen (LSS2.res) toont een wedge configuratie waarbij een onrealistische verdunning van reservoirlagen in de zone wordt gemodelleerd.

Layering with 'BCStructural Model Final\_inclTBS/BC\_for\_historymatch'

Make layers

Common settings

Build along: Vertical thickness (TVT)  Horizons with steep slopes

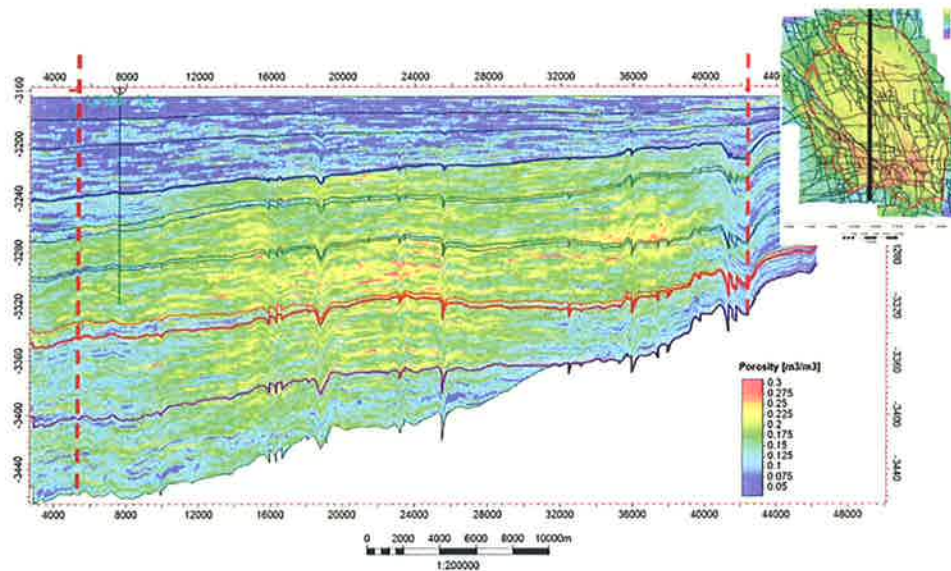
Use minimum cell thickness: 1  Include proportional/fractons, start from: Top

Zone specific settings

Zone division:  Reference surface:  Restore eroded:  Restore base:

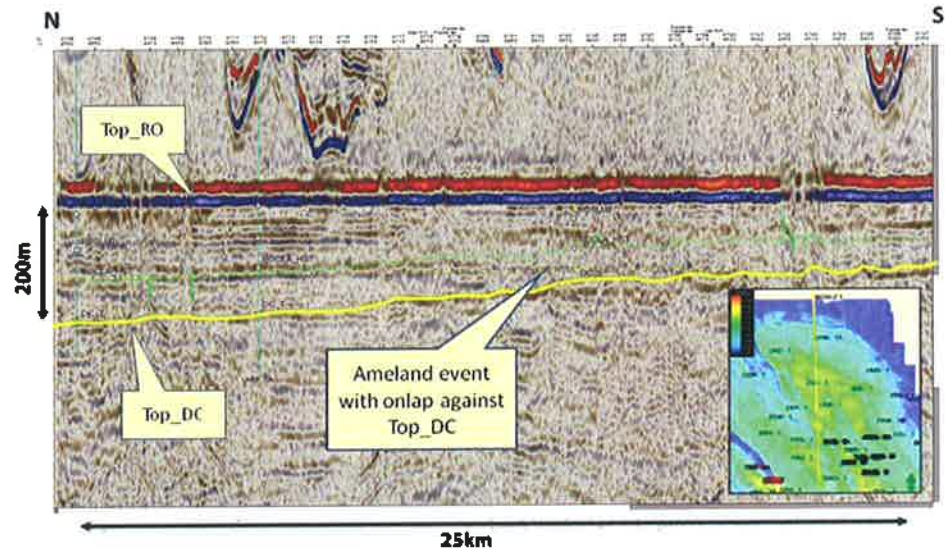
Name	Color	Calculate	Zone division	Reference surface	Restore eroded	Restore base	Status
TBS.3		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
TBS.2		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
TBS.1		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
USS.3.res		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
USS.2.het		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
USS.2.res		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
USS.1.he		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
USS.1.re		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
LSS.2.het		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
LSS.2.res		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
LSS.1.het		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
LSS.1.res		<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Follow top Cell thickness: 2.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done

Figuur 2.9 Laag definities van het [redacted] model, met alleen voor de LSS.1.res zone de onlap configuratie ('follow top').



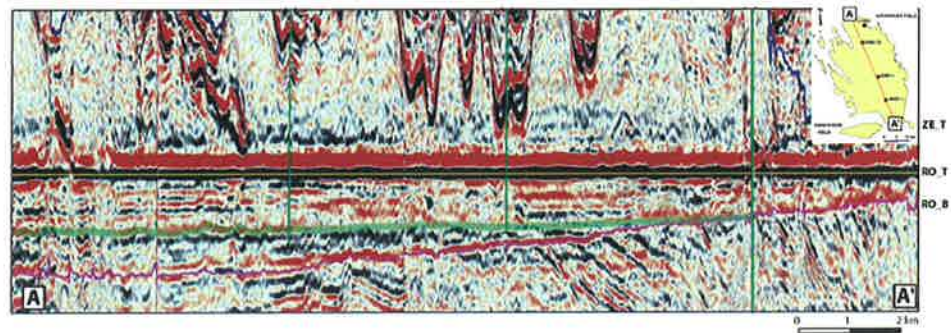
Figuur 2.10 Noord-Zuid doorsnede door het porositeitsgrid en stratigrafie in het [redacted] model (geplat op RO\_T). LSS.1.3\_T (paars) toont de onlap configuratie op het Carboon. De overige horizons zijn volgens het 'wedge'-model gemodelleerd. De rode stippellijn geeft de Groningen veldgrens weer.



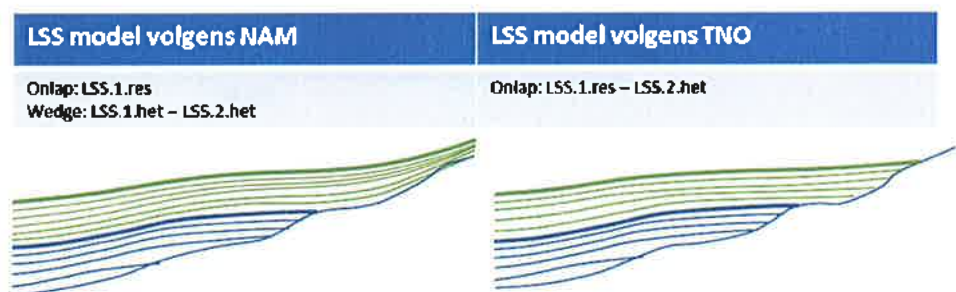


Figuur 2.11 Seismische doorsnede die de onlap toont van de Ameland lithostratigrafische zone op het Carboon ( ). Er lijkt een verschil tussen het putniveau "ROCLA\_HST" en de seismische interpretatie "Ameland event with onlap against Top\_DC".

In discussies met NAM is de koppeling tussen de sequentiestratigrafische well tops en de seismische stratigrafie/reflectoren in het model nader besproken. NAM heeft additionele seismische doorsnedes beschikbaar gesteld (Appendix A.2). In het noordelijk deel van het Groningen veld zijn de seismische reflectors van de Ameland kleisteen en Ten Boer kleisteen duidelijk. Naar het zuiden zijn verschillende interpretaties mogelijk. NAM is het eens met het feit dat naast de seismische reflectoren, ook de well tops naar het zuiden toe minder eenduidig te interpreteren zijn. De verdunning van de Ameland seismische expressie naar het zuiden toe wordt door NAM als wedging effect gezien (NAM, pers. comm.) TNO-AGE geeft de voorkeur aan een onlap configuratie voor alle Lower Slochteren zones en de Ameland kleisteen. Voor de Upper Slochteren reservoirzones is het wedge model voor het studiegebied van het Groningen veld acceptabel. De twee alternatieve interpretaties van de stratigrafische architectuur worden samengevat in Figuur 2.13. Op basis van de seismische doorsnedes in bijvoorbeeld Grötsch et al. (2011) (hier weergegeven in Figuur 2.12), en de door NAM gepresenteerde doorsnedes (Appendix A.2) heeft TNO-AGE de overtuiging dat de onlap positie van de Ameland kleisteen een meer noordelijke ligging heeft.



Figuur 2.12 Seismische doorsnede van het Groningen veld, afgeplat of RO\_T (gele lijn). De onlap van de Ameland kleisteen is weergegeven in groen. De roze lijn geeft de top van het Carboon aan (Saalien unconformity) (Figuur 8b uit Grötsch et al., 2010).



Figuur 2.13 Stratigrafisch model voor alle Lower Slochteren en Ameland kleisteen zones (LSS.1.res t/m LSS.2.het) volgens NAM en TNO-AGE.

#### Implicaties

De basisinput voor het statische model omvat de Top en Basis Rotliegend diepte kaarten en het breukmodel. Op basis van de indeling in zones (en de onderverdeling in lagen van deze zones) wordt het 3D-grid gevormd met celgrootte van 100x100m (celdikte is gemiddeld 1-2m). De maximale hoeveelheid lagen in het model is 205. De toegepaste architectuur van de zones (wedge vs. onlap) heeft invloed op de grootte van de gridcellen en dus ook op de property modelling. TNO-AGE is van mening dat het stratigrafisch model gebruikt in het [REDACTED] Petrel model niet overeenkomt met NAM's beschreven voorkeur voor het onlap model in het bijgeleverde rapport. Het karteren van alle zones boven LSS1.res volgens de wedge architectuur resulteert in het dunner worden van de zones (en bijbehorende lagen) naar het zuiden (geïllustreerd in Figuur 2.10). TNO-AGE's voorkeur gaat uit naar de onlap architectuur voor alle Lower Slochteren en Ameland zones. Op dit moment is het moeilijk om in te schatten wat het effect is van deze sub-optimale strati-grafische architectuur, maar TNO-AGE acht het mogelijk dat de gekozen architectuur de modellering van reservoir eigenschappen in het model beïnvloedt (Paragraaf 2.5).

## 2.5 Porositeitsmodel

Het porositeitsmodel vormt de basis voor de compactieberekeningen. Het is verkregen door een ruimtelijke interpolatie van putmetingen waarmee aan alle cellen binnen het 3D-grid van het statische model een porositeitswaarde is toegekend. Deze compactieberekeningen zijn belangrijke input voor bodemdalingsberekeningen en seismische hazard analyse. In dit hoofdstuk volgt

een beschrijving en evaluatie door TNO-AGE van de porositeitsmodellering op basis van het [REDACTED] en de door NAM verstrekte informatie (NAM, pers. comm.), dit in het licht van de toepassing van het porositeitsmodel als input voor compactieberekeningen en verdere geomechanisch werk. Voor een uitgebreide beschrijving van de modellering van overige reservoirparameters verwijst TNO-AGE naar het [REDACTED].

### 2.5.1 Beschrijving porositeitsmodellering

NAM heeft op basis van density en sonic logs het porositeitsprofiel in de putten bepaald. Hierbij zijn diepte en kleivolume als additionele voorspellende variabelen gebruikt ([REDACTED]).

Daar waar een put een gridcel doorsnijdt, wordt de opgeschaalde porositeit in de gridcel berekend op basis van het gemiddelde van de meetwaarden binnen die cel. In dit 3D opschalingsproces worden alle 365 putten met porositeitswaarden in het Groningen veld gebruikt.

Voor iedere cel in het 3D gridmodel is een porositeitswaarde geschat op basis van een Sequential Gaussian Simulation (SGS) algoritme. Dit is een standaard, op kriging gebaseerde, interpolatiemethodiek die veel gebruikt wordt voor de modellering van gesteente-eigenschappen (porositeit/permeabiliteit) binnen reservoirmodellen. Binnen dit algoritme zijn per reservoirzone trendkaarten van porositeit en een 3D grid met de Netto-bruto verhouding gebruikt om de uitkomst te sturen.

Voor iedere reservoirzone is een kaart van de gemiddelde porositeit gemaakt op basis van een selectie van de putten. Deze kaarten dienen als trendkaarten voor de uiteindelijke Sequential Gaussian Simulatie (SGS) modellering van de 3D porositeitsverdeling in het reservoirmodel. Per reservoirzone zijn gemiddeld 75 putten geselecteerd (het precieze aantal varieert per reservoirzone) op grond van een volledige Rotliegend penetratie en afwezigheid van breukhiaten. Ook is beoordeeld of de logwaarden representatief waren voor het regionale beeld. Derhalve zijn slechts 1-2 putten per productiecluster geselecteerd. Voor elke van de ~75 putten is per reservoirzone een gemiddelde porositeit berekend. Met behulp van 'isochore' interpolatie is van deze (punt)dataset per reservoirzone een 2D kaart van de gemiddelde porositeit gemaakt.

Met behulp van de gemiddelde porositeitsverdeling in de trendkaarten wordt voor de opgeschaalde gridcellen de residuele porositeit bepaald:

$$\text{residuele porositeit}_{\text{putten}} = \text{opgeschaalde porositeit} - (a * \text{porositeits-trend} + b)$$

De factoren a en b zijn zo gekozen zodat er een 'least square' lineaire trend ontstaat binnen de crossplot van de opgeschaalde porositeitswaarden (alle putten) en de gemiddelde porositeitswaarde in het trendgrid. Vervolgens worden m.b.v. het Sequential Gaussian Simulation (SGS) algoritme de waarden voor residuele porositeit aan de overige gridcellen in het 3D model toegekend. Sturing van deze simulatie wordt bereikt door het grid van de netto-bruto verhouding mee te nemen als collocated co-variabele (correlatie coëfficiënt=0,2). De uiteindelijke porositeitswaarde voor iedere gridcel wordt berekend door:

$$\text{Porositeit}_{\text{3Dgrid}} = \text{residuele porositeit}_{\text{SGS}} + (a * \text{porositeits-trend} + b)$$

Met deze methode wordt de uiteindelijke gemiddelde porositeit van de verschillende zones sterk gestuurd door de individuele trendkaarten. NAM heeft in het hier beschreven proces uitsluitend gebruik gemaakt van de put informatie. Er is geen additionele geologische informatie gebruikt.

### 2.5.2 *Discussie modellerproces*

TNO-AGE is van mening dat door het ontbreken van een onzekerheidsanalyse het [REDACTED] porositeitsmodel niet geschikt is voor het verklaren van de geobserveerde anomalieën in de bodemdalingsanalyse. Omdat de compactie wordt afgeleid van het porositeitsmodel heeft het ontbreken van deze onzekerheidsanalyse ook zijn weerslag op de seismische hazardanalyse, aangezien seismisch hazard in NAM (2013d) direct correleert met compactie. TNO-AGE onderschrijft wel de algemene methodiek die NAM toepast om te komen tot een gemiddeld porositeitsmodel, maar heeft een aantal kritische kanttekeningen bij de individuele stappen en aannames binnen deze methodiek. Deze kanttekeningen worden in de volgende paragrafen toegelicht.

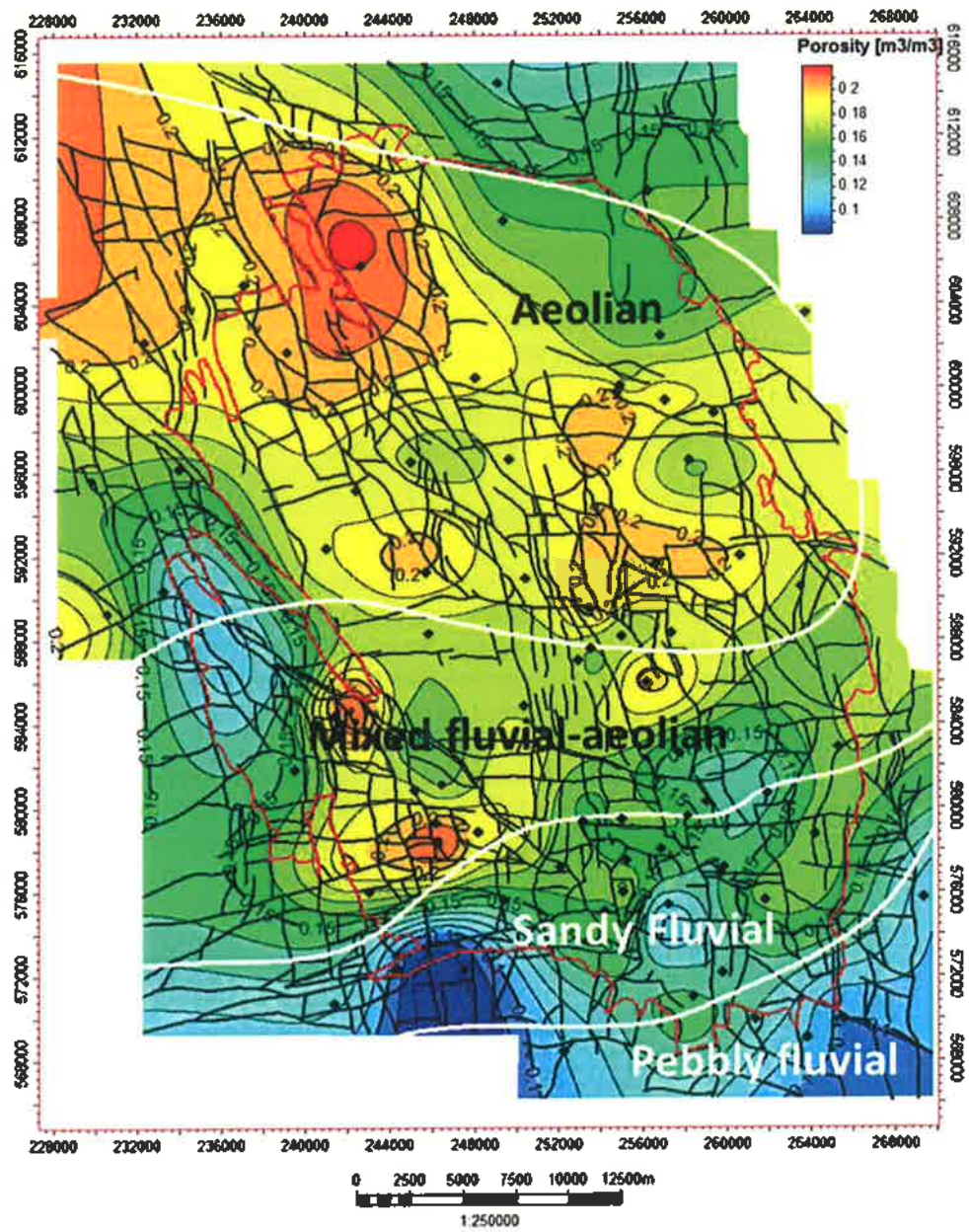
#### 2.5.2.1 *Geologische sturing*

TNO-AGE is van mening dat andere proxies zoals bijvoorbeeld de akoestische impedantie op basis van seismische data (AI-volumes) en/of de faciesverdeling een belangrijke meerwaarde kunnen geven op de porositeitsmodellering en tevens de onzekerheidsbandbreedte in het berekende porositeitsdistributie kunnen reduceren.

In het [REDACTED] beschrijft NAM de faciesverdeling in de verschillende reservoirzones ([REDACTED]). TNO-AGE heeft de trendkaarten van gemiddelde porositeit vergeleken met deze faciesverdeling. Figuur 2.14 toont deze vergelijking voor de USS2res zone. De figuren van de overige reservoirzones zijn te vinden in Appendix A.4. De variaties in porositeit binnen de trendkaarten lijken nu niet overeen te komen met faciesverdeling terwijl hier wel enige correlatie wordt verwacht. TNO-AGE heeft de porositeitsdistributie per faciesklasse voor elke reservoirzone berekend (Appendix A.3). Zoals verwacht is de porositeit van de 'pebbly fluvial' facies slechter dan de 'sandy fluvial' en 'mixed aeolian-fluvial' facies. Opvallend is dat de 'distal fines' facies een hogere porositeit laat zien in de LSS1.res zone. Deze deviatie wijst er op dat er geen overeenstemming is tussen het porositeitsmodel en het faciesmodel.

De vele kernen in het Groningen veld zijn in de loop van de jaren door diverse bedrijven beschreven en hanteren verschillende lithofacies indelingen. Deze lithofacies indelingen zijn tot op heden nog niet vertaald in een uniforme en voor het hele veld consistente lithofacies indeling (NAM, pers. comm.). NAM heeft er derhalve bewust voor gekozen om het Rotliegend reservoirmodel niet onder te verdelen op basis van lithofacies.

Verder begrijpt TNO-AGE van NAM ([REDACTED] en pers. comm.) dat beschikbare AI-volumes zijn afgekeurd wegens een fout in het rekenproces waardoor deze onrealistisch hoge porositeitswaarden voorspelden (NAM, pers. comm.). NAM is bezig met een herberekening van een nieuw AI-volume en is van plan om deze in een vervolgstudie te gebruiken voor de porositeitsmodellering.



Figuur 2.14 Porositeit trendkaart voor USS2res zone met daarop de outlines van de facies-indeling van NAM (data door TNO gedigitaliseerd [redacted]).

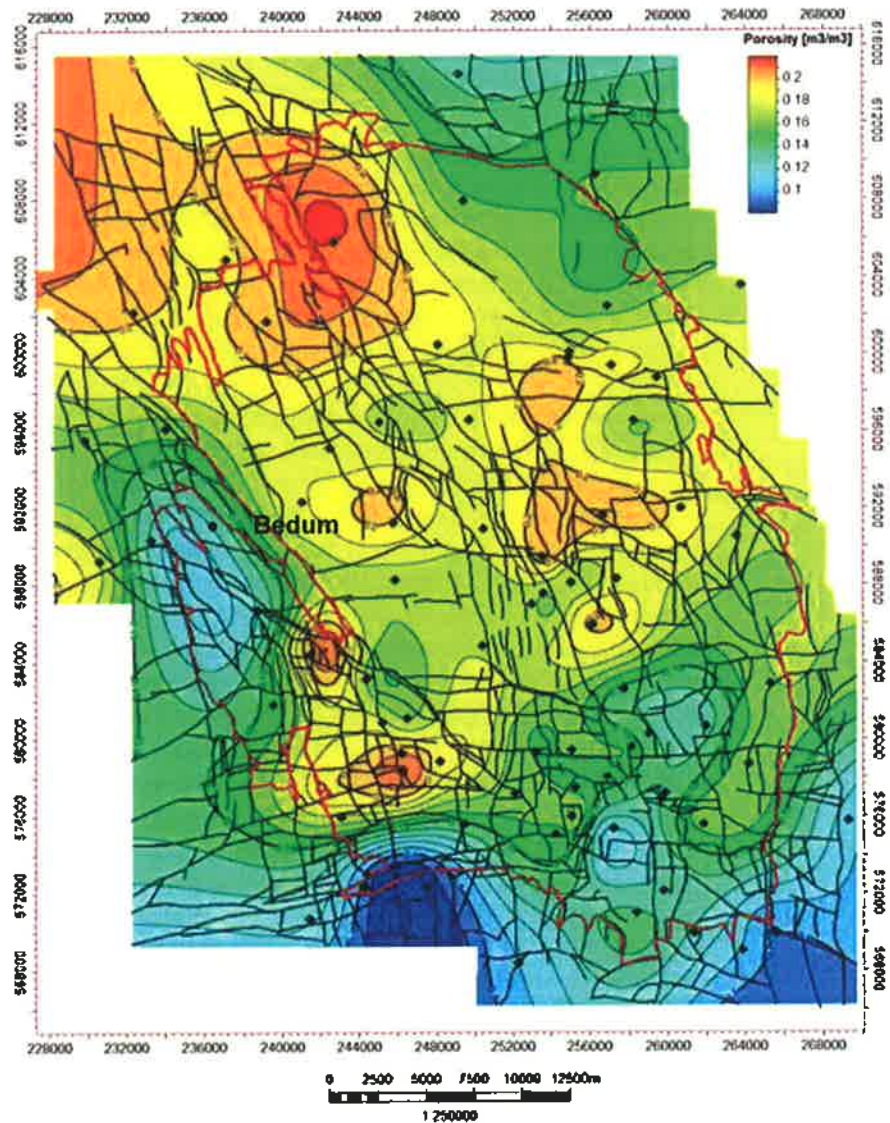
### 2.5.2.2 *Gebruik Netto-Bruto als co-variabele*

Uit de informatie die NAM heeft aangeleverd (█ en pers. comm.) maakt TNO-AGE op dat de SGS interpolatie wordt uitgevoerd op de residuele porositeit (= verschil tussen opgeschaalde putporositeit en trendgemiddelde porositeit) en dat daarbij, op basis van de aanname dat er een correlatie bestaat, het grid met de netto-bruto verhouding wordt meegenomen als collocated co-variabele. TNO-AGE is van mening dat het geologisch en statistisch gezien aannemelijk is dat er een positieve correlatie bestaat tussen (absolute) porositeit en netto-bruto verhouding. TNO-AGE zou eerder verwachten dat er een correlatie bestaat tussen netto-bruto verhouding en absolute porositeit dan tussen netto-bruto verhouding en residuele porositeit. Het dient overigens te worden vermeldt dat met de aangenomen correlatiefactor van slechts 0,2, de netto-bruto verhouding slechts in zeer geringe mate meeweegt in het eindresultaat.

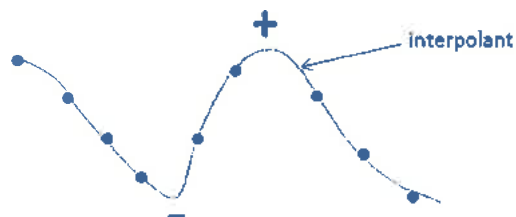
### 2.5.2.3 *Interpolatie van trendkaarten*

NAM heeft de trendkaarten berekend met een *smooth* interpolatie algoritme dat de exacte waarde van de gemiddelde porositeit op de 75 putlocaties honoreert. TNO-AGE is van mening dat de resulterende kaarten daarmee geen regionale trend representeren maar een lokaal/sub-regionaal beeld van de porositeit waarbij duidelijk lokale minima en maxima zichtbaar zijn op de individuele putlocaties.

Verder constateert TNO-AGE dat het door NAM gebruikte *isochore* interpolatie algoritme voor de trendkaarten gebieden creëert met lokale minima en maxima die de bandbreedte van de gemeten waarden in de omliggende putten overschrijdt (Figuur 2.15). Figuur 2.16 visualiseert de over- en onderschatting die op kan treden bij interpolatie. NAM beschouwt de meeste porositeitsvariaties in de omgeving van putten als realistisch en slechts enkele onderschattingen of overschattingen zouden door interpolatie effecten zijn veroorzaakt (█).



Figuur 2.15 Voorbeeld van een porositeit trendkaart voor de USS.2.res zone met het Groningen veld rood omlijnd. Gebruikte putlocaties voor het maken van de trendkaarten zijn weergegeven als zwarte punten. De zeer lage porositeit in het westelijk deel van het veld (bij Bedum) is een voorbeeld van een lokaal minimum waarbij de porositeit in het centrum zelfs lager is dan de porositeit in de dichtstbijzijnde putten.



Figuur 2.16 Visualisatie van mogelijke over- en onderschatting die kan optreden bij interpolatie.

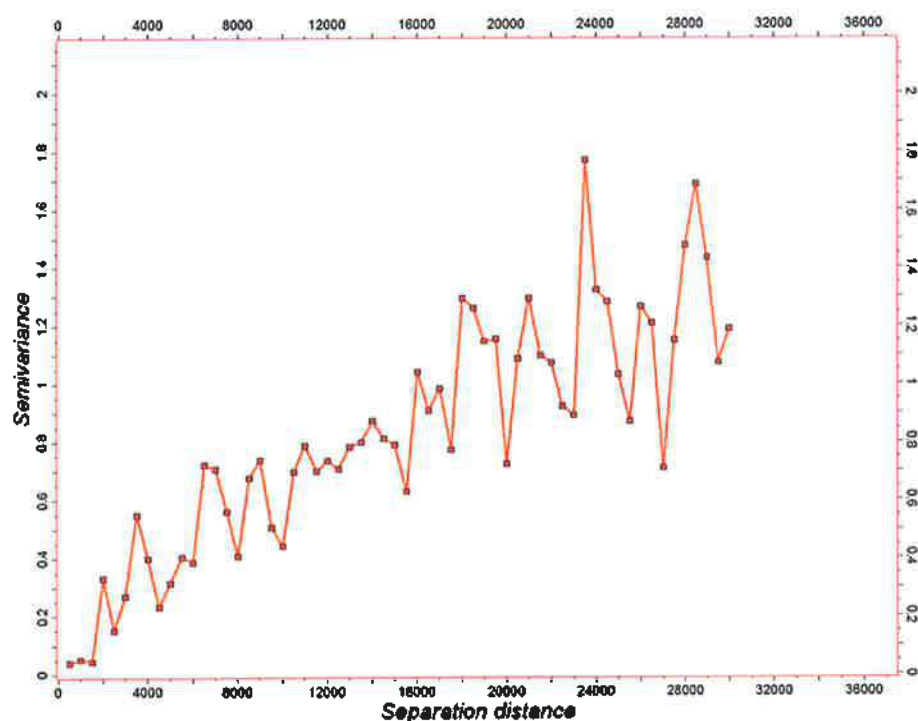
### 2.5.3 Porositeitsmodel vs. discrepantie berekende en geobserveerde bodemdaling

#### 2.5.3.1 Analyse onzekerheidsbandbreedte

Er zijn discrepanties geconstateerd tussen de berekende en geobserveerde bodemdaling (Figuur 5.13). De porositeit is een belangrijke parameter die bepalend is voor de berekende bodemdaling (zie Hoofdstuk 5). TNO-AGE is van mening dat de discrepanties tussen berekende en geobserveerde bodemdaling deels verklaard kunnen worden door de onzekerheidsbandbreedte binnen de berekende porositeitsmodellen in ogenschouw te nemen. Deze onzekerheidsbandbreedte is in het huidige XXXXXXXXXX model van NAM niet onderzocht.

Aangezien de trendkaarten van gemiddelde porositeit veel invloed hebben op het uiteindelijke gemiddelde porositeitsmodel, heeft TNO-AGE er voor gekozen om een indicatie van de onzekerheidsbandbreedte af te leiden uit een vereenvoudigde analyse van de trenddata. Figuur 2.18 laat bijvoorbeeld zien dat de geobserveerde discrepanties veelal samenvallen met de hoge en lage porositeitswaarden in de trendkaart van reservoirzone USS.2.res. Een vergelijkbaar beeld is zichtbaar in de overige reservoirzones. TNO-AGE heeft er in deze studie voor gekozen om slechts één reservoirzone te analyseren (USS.2.res) en stelt het principe van deze aanpak als voorbeeld voor de bepaling van de onzekerheidsbandbreedte in de overige zones. Er is gebruik gemaakt van dezelfde inputdata die ook door NAM is gebruikt (in deze zone 76 putten). In plaats van het door NAM gebruikte *isochore* interpolatie algoritme heeft TNO-AGE meerdere realisaties voor de gemiddelde porositeitswaarden (trendkaarten) berekend met behulp van het Sequential Gaussian Simulation (SGS) algoritme. Iedere realisatie van de gemiddelde porositeit die uit SGS volgt, verschilt van de andere realisaties, maar is statistisch gezien even waarschijnlijk en honoreert bovendien de inputdata. Het gebruikte variogram bepaalt in hoge mate de toename van de onzekerheidsbandbreedte met toenemende afstand tot de putlocaties. Deze toename is vastgelegd in de variogramparameters (*range* en *sill*) die zijn afgeleid van de gemeten waarden in de circa 75 putlocaties. Op basis van deze putdata heeft TNO-AGE gekozen voor een *range* van 18 km (Figuur 2.17). TNO-AGE realiseert zich dat met de gebruikte putwaarden slechts een beperkte variogramanalyse mogelijk is en adviseert om bij vervolgstudies de validiteit van het variogram te onderbouwen met aanvullend onderzoek. Ten einde een indicatie te krijgen van de spreiding van geïnterpoleerde waarden zijn in totaal 50 realisaties voor de trendkaart van USS.2.res berekend. Het gemiddelde van alle 50 trendkaart realisaties is weergegeven in Figuur 2.19. Figuur 2.20 toont de standaarddeviatie die uit deze realisaties volgt. Vooral in het westen van het Groningen veld kan de standaarddeviatie hoog oplopen met waarden tot 2 procentpunt porositeit. Dit impliceert dat er voldoende ruimte is voor kaarten met alternatieve porositeitswaarden die mogelijk de discrepanties tussen berekende en geobserveerde bodemdaling kunnen verklaren.

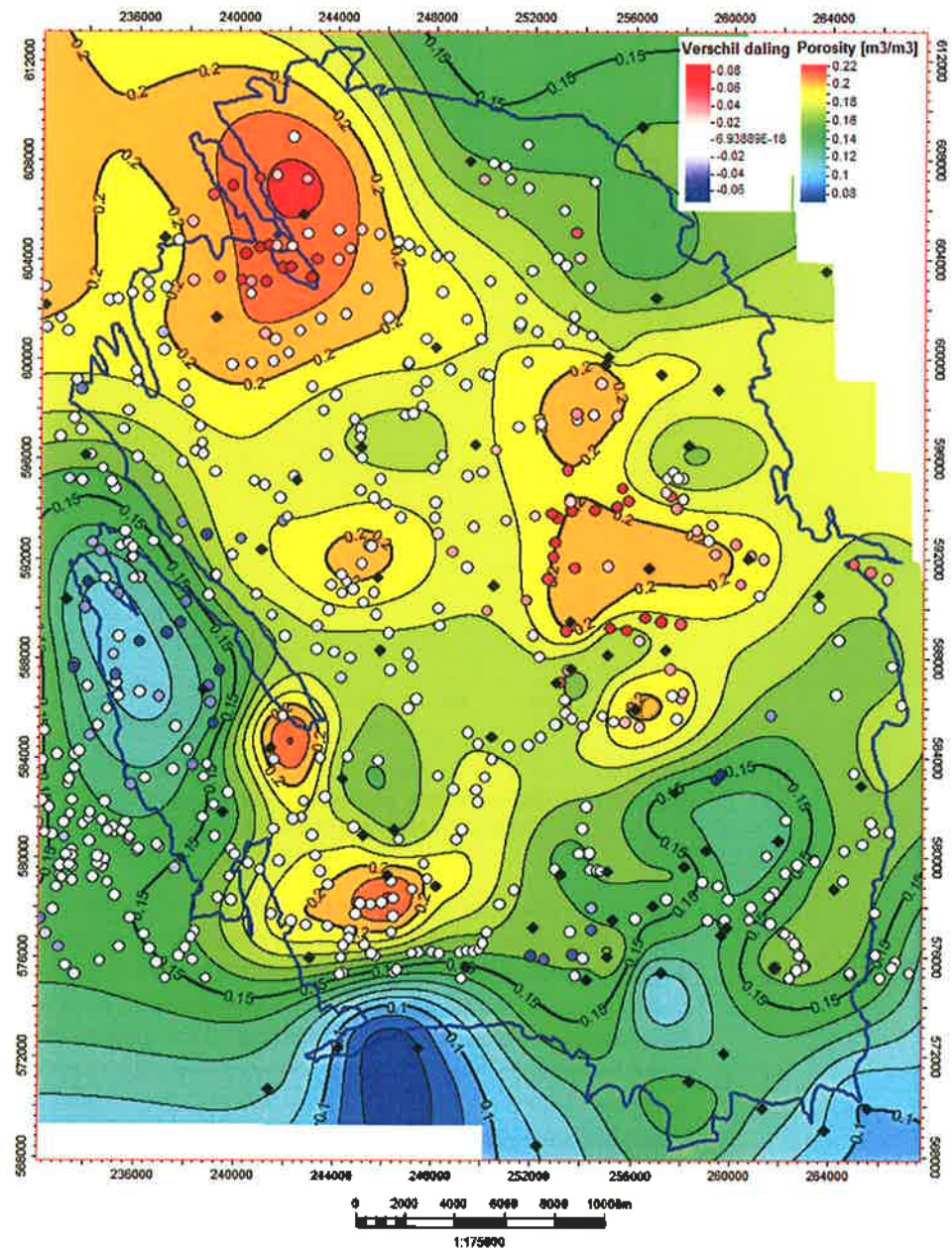




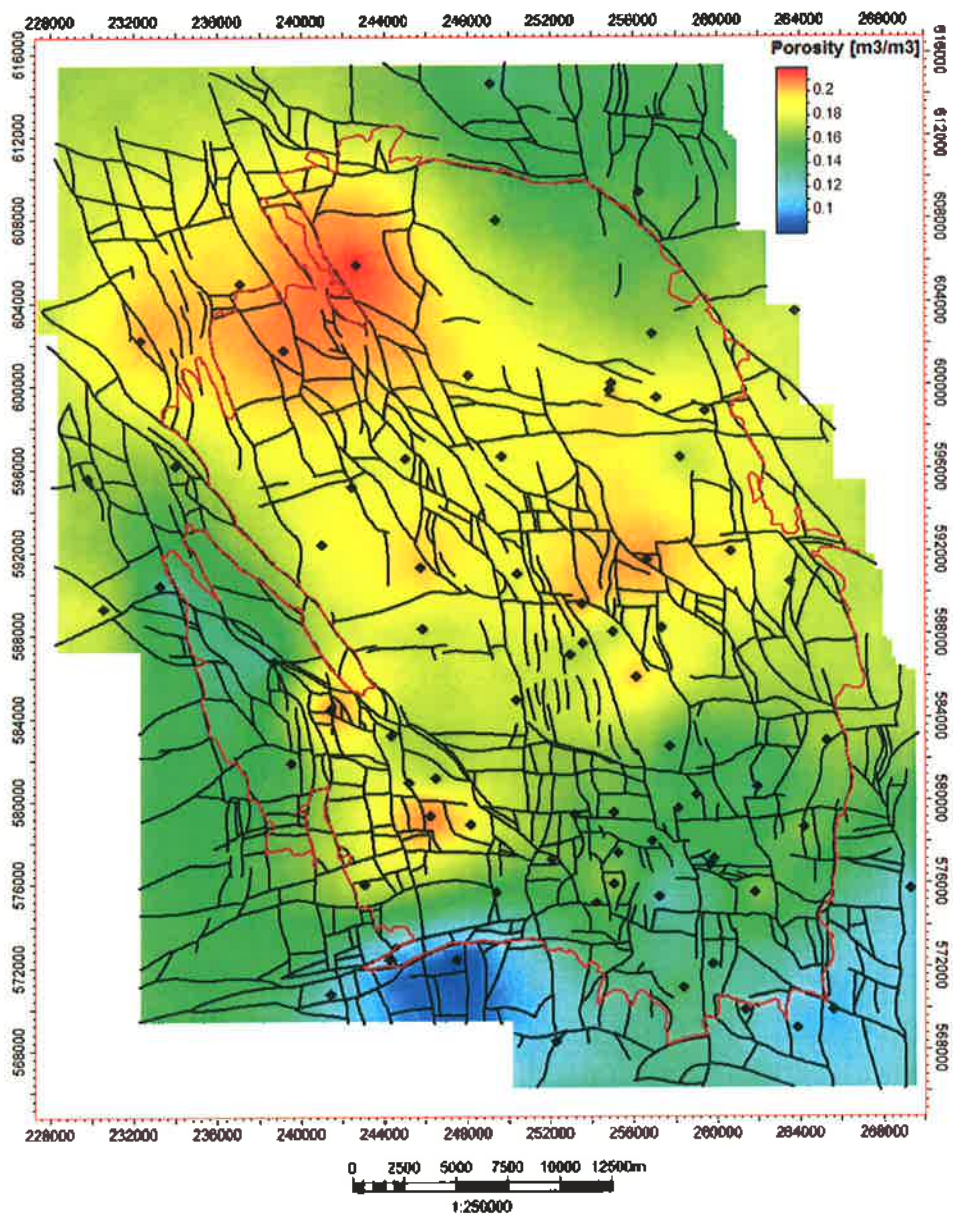
Figuur 2.17 Semivariogram voor putdata gebruikt voor de trendmap voor de middelste Upper Slochteren reservoir zone (USS2.res).

Een bewijs dat deze bandbreedte van belang is, wordt gegeven door de metingen uit de recent door NAM geboorde put nabij Bedum. Uit de metingen van de put volgt een hogere porositeit dan in deze regio door NAM was gemodelleerd (NAM, pers. comm.). Ook de geobserveerde bodemdaling impliceert een hogere porositeit dan berekend volgens het huidige model. Door gebruik te maken van de onzekerheidsbandbreedte binnen de porositeitgrids (gemiddelde porositeit plus of min eenmaal de standaard deviatie), kan de discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling al voor een belangrijk deel worden gereduceerd, of in elk geval worden verklaard.

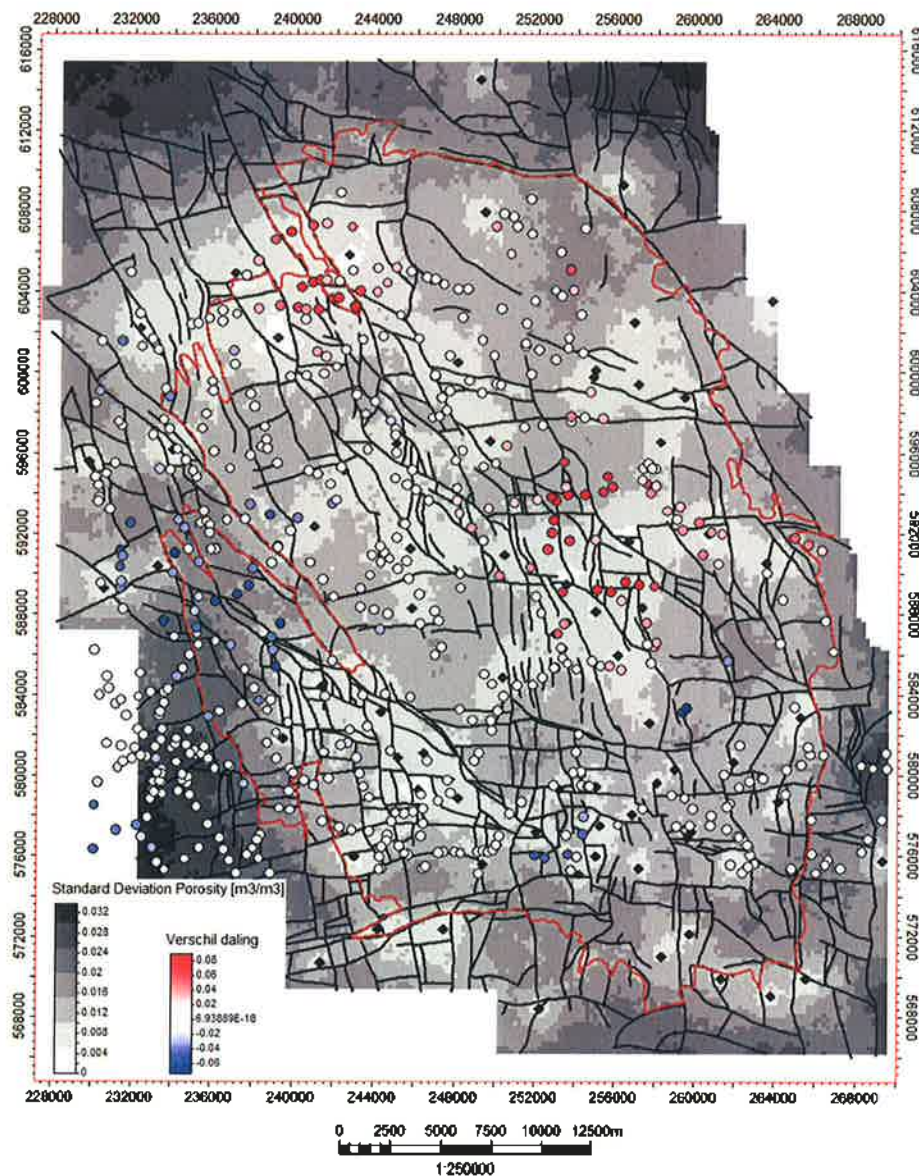
Voor een uitgebreidere analyse en beter onderbouwde kwantificering van de onzekerheidsbandbreedte adviseert TNO-AGE om deze af te leiden uit de 3D gemodelleerde porositeit voor alle reservoirzones.



Figuur 2.18 Porositeit trendkaart voor de USS.2.res zone berekend door NAM. Zwarte ruiten geven de putten weer. De rood-wit-blaauwe cirkels geven het verschil tussen berekende en geobserveerde bodemdaling aan (rood = meer bodemdaling berekend dan geobserveerd).



Figuur 2.19 Gemiddelde trendkaart voor USS.2.res op basis van 50 realisaties berekend door TNO.



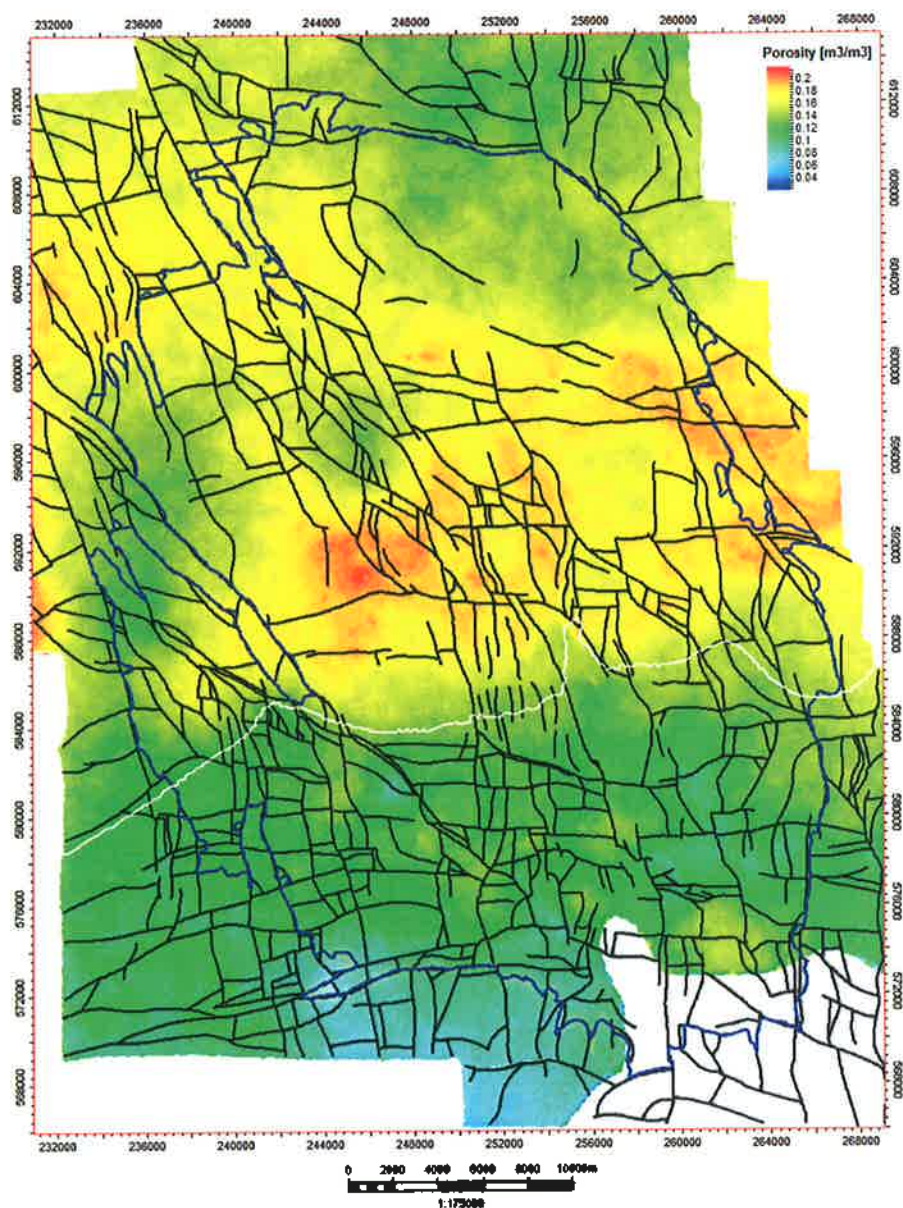
Figuur 2.20 Standaarddeviatie van de door TNO gemaakte trendmap van de USS.2.res zone. De cirkels geven het verschil in berekende en geobserveerde bodemdaling weer (blauw= meer bodemdaling geobserveerd dan berekend).

### 2.5.3.2 Porositeit vs. Breukzones

De discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling nabij Uithuizen in het noorden zou mogelijk verklaard kunnen worden door de grote diepteverschillen in reservoirgesteente langs de breuken in dat gebied. Hier loopt een noord-zuid georiënteerde slenk waarbinnen geen verdere metingen beschikbaar zijn. Het gridding algoritme houdt geen rekening met deze sprongen in diepte, welke mogelijk wel van invloed kunnen zijn op de porositeit van het reservoirgesteente. Er zijn echter te weinig gegevens beschikbaar om dit vermoeden te staven.

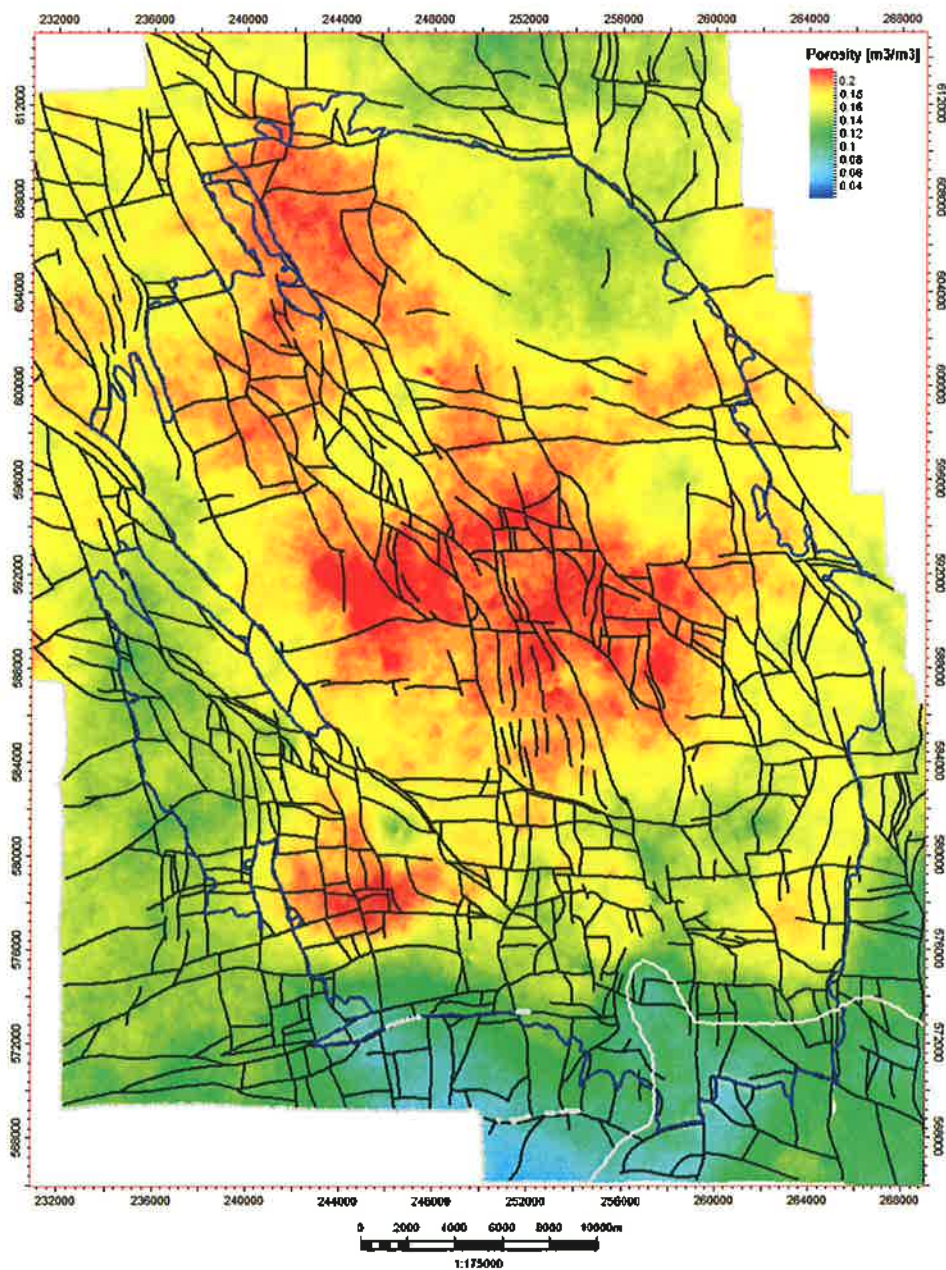
#### 2.5.4 Porositeitsmodel vs. stratigrafisch model

Wanneer TNO-AGE het uiteindelijke porositeitsmodel gebruikt om de gemiddelde porositeit per zone te berekenen, valt op dat het gemiddelde porositeitsgrid van de LSS2.res zone een opmerkelijke verandering van porositeit ten noorden en ten zuiden van de onlap grens van de ondergelegen LSS1.res zone toont (Figuur 2.21). Een vergelijkbare overgang is zichtbaar in de gemiddelde porositeitskaart van de USS1.res zone ten zuiden van de Ameland onlap in Figuur 2.22. Ook de doorsnede van het porositeitsmodel toont deze verminderde porositeit boven het Carboon (Figuur 2.10).



Figuur 2.21 Porositeitsgrid van de LSS2.res zone met de positie van de onlap van de LSS1 zone (wit) op het Carboon.

TNO-AGE heeft het vermoeden dat dit fenomeen mogelijk een artefact is van de toegepaste architectuur van de 3D gridcellen. TNO-AGE zou graag zien dat de achtergrond en oorzaak van dit fenomeen wordt geverifieerd in termen van geologie en/of toegepaste modelmethoden. Indien een gradueel verloop geologisch gezien waarschijnlijker wordt geacht, zou TNO-AGE dit ook tot uiting willen laten komen in de gemiddelde porositeitskaarten.



Figuur 2.22 Porositeitsgrid van de USS1.res zone met de positie van de onlap van de Ameland kleisteen (LSS\_2.4\_T) (grijs) op het Carbon.

Uit het [REDACTED] model blijkt dat variaties in reservoirzone (en laag) diktes voorkomen (zie Hoofdstuk 2.4 en Figuur 2.10). De door NAM gebruikte *wedge*-architectuur van alle zones boven LSS.1.res resulteert in het dunner worden van de lagen (en gridcellen) in het zuiden van het veld. In het zuiden zal de gemiddelde porositeit van een gridcel dus berekend worden over een kortere sectie logwaarden dan in het noorden waardoor uitersten binnen de logwaarden minder sterk worden uitgemiddeld. NAM suggereert dat aanzienlijke verdunning in de LSS.2.res zone zou kunnen leiden tot een scheve porositeitsdistributie (NAM, pers. comm.). TNO-AGE zou graag het verschil in porositeitsdistributie zien van een reservoirzone die zowel in onlap- als *wedge*-architectuur gemodelleerd is, om aan te tonen wat de werkelijke invloed van de architectuur is op de porositeitsmodellering.

## 2.6 Conclusies en aanbevelingen

### 2.6.1 Conclusies

- Het [REDACTED] statische model is gebouwd op basis van de door NAM onderscheiden reservoir zones en de 707 gemodelleerde breuken. Daarnaast zijn nog ~850 additionele breukzones geïnterpreteerd welke niet meegenomen zijn in de geomechanische studies.
- De voorkeur voor een onlap stratigrafisch model voor alle Lower Slochteren zones komt slechts gedeeltelijk tot uiting in het [REDACTED] model (alleen de LSS.1.res zone toont de onlap architectuur).
- Voor de huidige toepassing is het porositeitsmodel van NAM niet adequaat want inzicht in de onzekerheidsbandbreedte ontbreekt. Tevens ontbreekt sturing door seismische en/of geologische parameters zoals bijvoorbeeld akoestische impedantie en/of faciesmodellen.
- TNO-AGE constateert enkele fenomenen in het model die nu niet goed worden verklaard in termen van geologie en/of modellering.
- Het door NAM gepresenteerde porositeitsmodel geeft slechts één realisatie waardoor de onzekerheidsbandbreedte niet inzichtelijk wordt gemaakt.
- De veronderstelde onzekerheidsbandbreedte die samenhangt met de modellering van de porositeit zou volgens TNO-AGE mogelijk de discrepantie in gemeten en berekende bodemdaling binnen gebieden in het westen (Bedum) en centrale deel (Delfzijl) van het Groningen veld kunnen verklaren (zie Hoofdstuk 5.3).

### 2.6.2 Aanbevelingen

Omdat het huidige model met name gemaakt is om de history match te verbeteren en niet specifiek voor bodemdalings- of geomechanische studies adviseert TNO-AGE om:

- Alle in seismiek zichtbare breuken mee te nemen in de geomechanische studie en niet slechts de 707 gemodelleerde breuken uit het [REDACTED] model.

- Onlap architectuur toepassen op alle Lower Slochteren en Ameland zones of aan te tonen dat het gebruik van de wedge architectuur boven de LSS.1.res zone geen effect op de property modelling heeft.
- In vervolgstudies de onzekerheidsbandbreedte mee te nemen in het modelleerproces van de porositeit en deze mee te nemen in de verdere bodemdalingsberekeningen.
- Zo mogelijk in eventuele nieuwe porositeitsmodelberekeningen sturing uit andere parameters mee te nemen waaronder akoestische impedantie en/of faciesmodellen.
- Een aantal opvallende fenomenen in het huidige model toe te lichten in termen van geologie en/of modellering en de eventuele invloed hiervan op de berekende bodemdaling te bepalen.
- Vanuit de berekende bodemdaling een bijbehorende porositeit te berekenen (inverse porositeit). Als deze berekende inverse porositeit binnen de onzekerheidsbandbreedte van het porositeitsmodel valt, is de discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling mogelijk hiermee te verklaren.



### 3 Dynamisch model van de NAM

De beschrijving van het dynamische reservoir model is voornamelijk gebaseerd op het model zoals ontvangen van NAM op 4 november 2013. Verder is onderstaande informatie gebaseerd op [REDACTED], en persoonlijke communicatie met NAM. In Paragraaf 3.1 wordt een beschrijving gegeven van het dynamische model op die punten die kritisch zijn voor de berekening van de compactie en bodemdaling en in Paragraaf 3.2 wordt ingegaan op de belangrijkste onzekerheden van het dynamisch model op diezelfde punten. In Paragraaf 3.3 worden de productie scenario's en resultaten daarvan besproken. Afsluitend worden in Paragraaf 3.4 de conclusies samengevat.

#### 3.1 Evaluatie van het dynamisch model m.b.t. compactie en bodemdaling

De beschrijving van het dynamisch model is beperkt in scope en heeft voornamelijk betrekking op de parameters in het model die van grote invloed zijn op het berekenen van de compactie en bodemdaling: aquifers (Paragraaf 3.1.1), breuken (Paragraaf 3.1.2), het Carboon (Paragraaf 3.1.3) en de correcte voorspelling van de drukmetingen in de history match (Paragraaf 3.1.4).

De volgende onderwerpen worden niet verder besproken omdat de verwachte impact op de compactie en bodemdaling klein is: opschaling en heterogeniteit (er is een zekere opschaling toegepast vanuit het statische model naar het dynamische model; de impact daarvan op de compactieberekening is getest), PVT van het gas en water, relatieve permeabiliteit en capillaire druk, initialisatie en detailsimulatie van de putten (mechanische 'skin' en non-darcy skin, vertical flow performance).

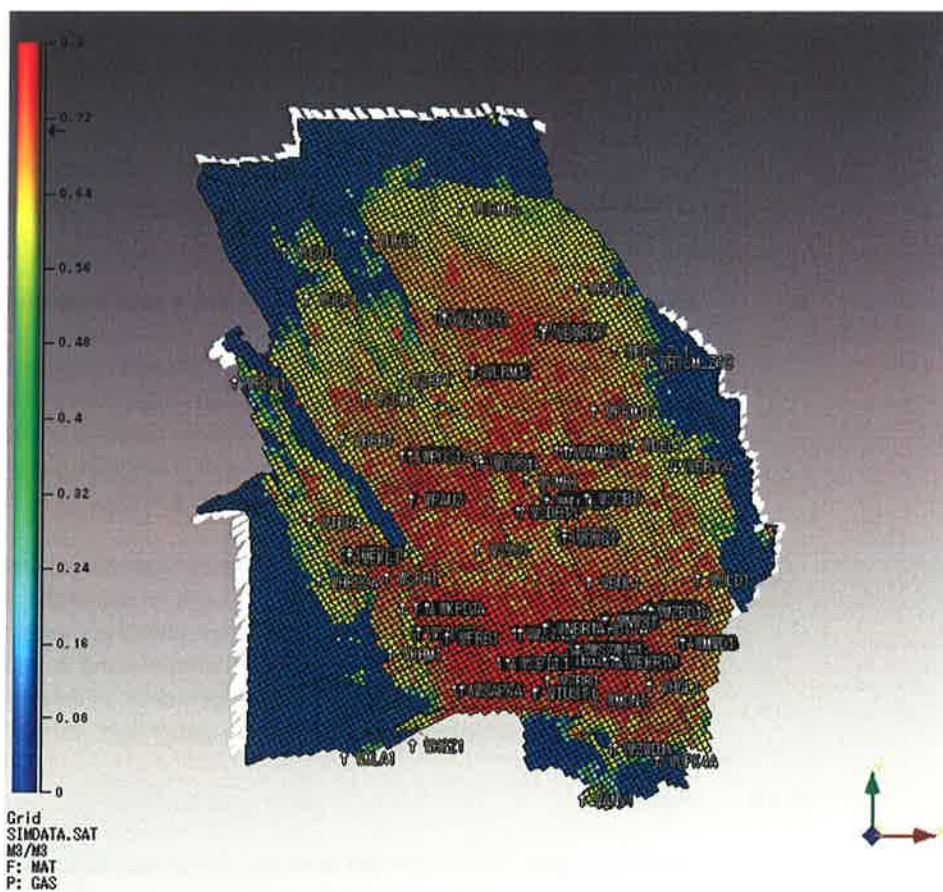
##### 3.1.1 Aquifers

Het Groningen veld is omringd door een aantal aquifers. Van de 10 aquifers die in verbinding staan met het reservoir is er 1 (aan de zuidkant richting Annerveen) uitsluitend expliciet gemodelleerd; de andere 9 hebben ook een aan het numerieke model verbonden analytische aquifer (Figuur 3.1). Vijf aquifers (Bedum, Emshoern, Goldhoorn, Warffum en Kielwindeweer) zijn door NAM inactief gemaakt in het model.

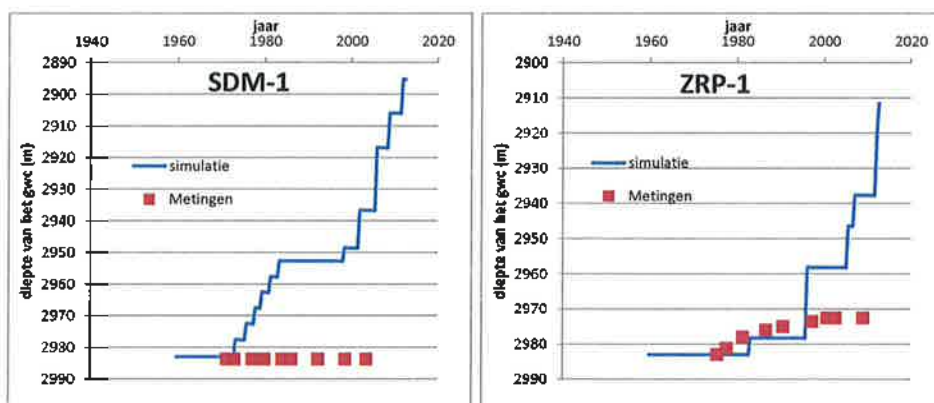
Ook de gasvelden Annerveen, Bedum, Kielwindeweer, Warffum en Oude Pekela worden inactief verondersteld in het model, omdat ze niet of nauwelijks (bijvoorbeeld via watervoerende lagen) in contact staan met het Groningen veld. Het is buiten de scope van dit project om te controleren of deze aannamen correct zijn.

Van de 9 analytische aquifers zijn de initiële schattingen van de eigenschappen aangepast in de history match op basis van de productie data. De NAM heeft vervolgens de aquifers in het noorden (Usquert, Bethlehem en Zeerijp) veel sterker gemaakt om de bodemdaling in het noordwesten te fitten. De gebruikte waarden voor de karakteristieke afmeting (van > 1000km) zijn echter geologisch onmogelijk. Ook zorgen de sterke aquifers voor een onrealistische stijging van het gas-water contact in de hele noordwest hoek van het model (zie ODP-1, ZRP-1 en SDM-1 in Figuur 3.2 en Figuur 3.3, en Figuur 5.16 in Hoofdstuk 5). Voor de locatie van de

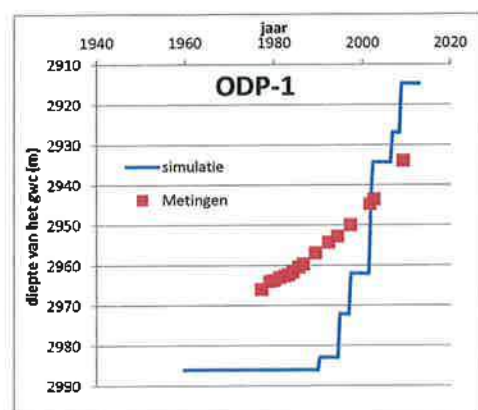
putten zie Appendix B. Aangezien dit observatieputten betreft, geven de metingen een indruk van de algemene stijging van het contact en is het niet het lokale effect van coning. Het effect van de sterke aquifer is een hogere druk – en daarmee een lagere compactie – in de noordwest hoek van het model.



Figuur 3.1 Overzicht van de aquifers rondom het Groningen veld. In wit is aangegeven aan welke randen analytische aquifers gedefinieerd zijn.



Figuur 3.2 Gesimuleerde en gemeten veranderingen in het gas-water contact in SDM-1, en ZRP-1.



Figuur 3.3 Gesimuleerde en gemeten veranderingen in het gas-water contact in ODP-1.

### 3.1.1.1 Gas in aquifer

Uit andere velden in de omgeving is bekend dat op sommige plaatsen gas aanwezig kan zijn onder het gas-water contact (bijvoorbeeld in de Lauwerszee Trog: Nes en Moddergat). De mogelijkheid hiervan in het Groningen veld is, wat betreft de beschikbare documentatie, niet onderzocht. Het effect van gas onder het gas-water contact is het creëren van een schijnbaar sterke aquifer, dus met een veel lagere drukdaling in de aquifer door de hogere effectieve compressibiliteit.

### 3.1.1.2 Permeabiliteit van watervoerende lagen versus gasvoerende lagen

Uit de literatuur is bekend dat in de aanwezigheid van gas, de permeabiliteit in het Rotliegend kan verschillen tussen water en gas gevulde poriën als gevolg van verschillende diagenetische processen (Leveille et al., 1997; Schöner en Gaupp, 2005). Waarschijnlijk heeft dit een beperkte invloed op de drukontwikkeling in het gasveld en daarmee op de history match, maar voor de compactie berekeningen zou het van belang kunnen zijn. De snelheid waarmee de drukdepletie zich voortplant in de aquifer zou anders worden. Er is geen verwijzing gevonden in de beschikbare documentatie of het model waaruit blijkt dat voor het Groningen model is bepaald of dit van belang is.

### 3.1.2 Breuken

De breuken zijn middels een zogenaamde 'stair-step' benadering gesimuleerd. Dat wil zeggen dat niet het daadwerkelijke breukvlak meegenomen is maar dat het breukvlak gediscretiseerd is langs bestaande gridblokken. De berekening van de doorlatendheid van het breukvlak is uitgevoerd op het fjnschalige (geologische) grid middels een toepassing ontwikkeld door Onyeagoro et al. (2007). Bij deze berekening worden de volgende factoren meegenomen:

- Permeabiliteit van het gesteente rond de breuk
- Cataclase
- Shale-gouge ratio
- Dikte van de breukzone (berekend als een functie van de 'fault throw')

De doorlatendheid van de breuken is vervolgens in de history match verder aangepast. In eerste instantie is een aantal tests gedaan met uniforme instellingen voor alle breuken. Hieruit bleek duidelijk dat het scenario met de minst afsluitende breuken het beste algehele resultaat gaf, met name in het centrale deel van het veld. Aan de randen was de fit minder goed. Tijdens de uiteindelijke history match is de doorlatendheid van een beperkt aantal breuken individueel aangepast.

Het model heeft ongeveer 250.000 actieve gridblokken. Hoewel het adequaat is om het algehele drukprofiel te simuleren, is het ontoereikend om het grote aantal breuken in detail te simuleren. De resultaten van een gevoeligheidsanalyse die door NAM is uitgevoerd, laten zien dat een verfijning van het grid rond de breuken geen grote impact op de gesimuleerde productie heeft.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het model geschikt is voor simulatie van de productie en de grootschalige compactie, maar niet geschikt voor een detailanalyse van individuele breuken.

### 3.1.3 *Carboon*

Als ondergrens van het model is de top van het Carboon gekozen. Deze formatie bestaat voornamelijk uit fluviatiele afzettingen en is zeer heterogeen van samenstelling. Het beperkte aantal metingen dat beschikbaar is (alleen in het zuiden van het veld), geeft een zeer variabel beeld van depletie in deze formatie: sommige metingen laten wel depletie zien, anderen helemaal niet. Er is geen depletie waargenomen lager dan 50 m beneden de basis van het Onder Slochteren. Gevoeligheidsanalyses uitgevoerd door NAM gaven een zeer beperkte gevoeligheid van de productie voor het meenemen van deze formatie in het model. Daarom is besloten dit niet mee te nemen in het model. Er zijn, voor zover bekend, echter geen gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om te bepalen of de invloed op de compactie ook te verwaarlozen is. Niet meenemen geeft een onderschatting van de compactie, hoewel dat effect naar verwachting gering is.

### 3.1.4 *History match*

Veruit de belangrijkste typen metingen voor de history match zijn, naast de productiedata zelf, metingen van de druk. Voor het Groningen model zijn met name de SPTG (Static Pressure Temperature Gauge) en RFT metingen gebruikt. Voor de laatste 5 jaar zijn ook zogenaamde Closed-in Tubing Head Pressures gebruikt. Deze kunnen relatief simpel worden omgerekend naar BHP, maar de onzekerheid is wat hoger. De kwaliteit van een meting wordt gecodeerd via een kwaliteitsfactor. Het is echter buiten de scope van dit project om de kwaliteitscontrole van de metingen te controleren.

Om de drukken goed te kunnen simuleren in een situatie waarbij meerdere putten in één gridblok kunnen liggen is gebruikt gemaakt van een zogenaamde interference skin. Verder zijn verschillende shut-in tijden niet expliciet gesimuleerd. De shut-in druk is benaderd door een gemiddelde druk over een range aan gridblokken te berekenen. De range is gebaseerd op een vaste shut-in-tijd van drie dagen. De onnauwkeurigheid van de voorspelling van de meting neemt toe door deze benaderingen, maar de verwachting is dat het geen grote fouten oplevert. De verwachte fout is wel groter voor de metingen in laag permeabele gesteenten (bijvoorbeeld Ten Boer) dan voor hoog permeabele gesteenten (Slochteren).

De history match van de druk was over het algemeen voldoende goed voor de berekening van de compactie: het gros van de drukmetingen is gematched binnen de range van +/- 5 bar. Daarbij moet wel worden opgemerkt, dat naar mate de afstand tot putten met gemeten druk toeneemt, de uniciteit van het berekende drukveld minder groot wordt: drukmetingen kennen geen 'richting'. De drukverdeling wordt in die zin sterke gestuurd door het statische model via de permeabiliteit (die weer een resultante is van de porositeit en poroperm relaties).

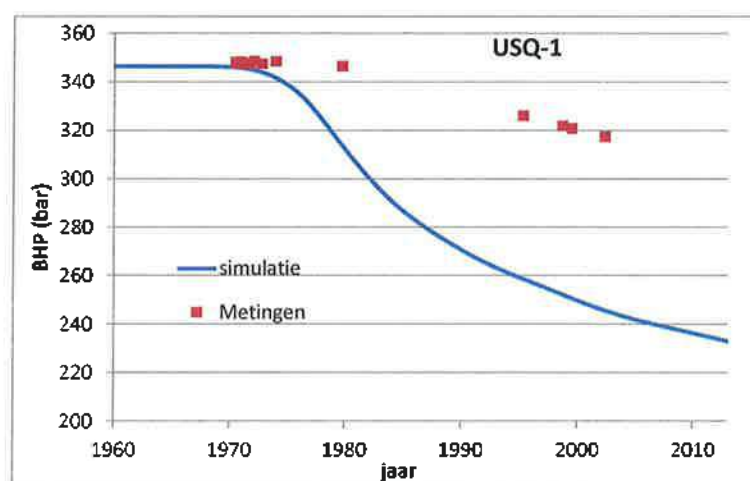
Een overzicht van de 20 slechtst gefitte druk-meetpunten (10 meest overschatte en 10 meest onderschatte) staat in Tabel 3.1 (zie Appendix B voor de locaties). In het begin van de ontwikkeling van het veld (jaren '70) werden de drukken minder goed gefit (fouten tot ~10 bar), met name in het cluster ZVN. Hier werd de initiële drukdaling onderschat. Later in het veldleven worden, met name aan de randen van het model, grotere fouten gevonden. En dan vooral in het noordwesten en zuidwesten.

Tabel 3.1 Overzicht van de slechtst gefitte metingen (samengevat over de hele geschiedenis tot 1-1-2013)

Psimulatie > Pgemeten (dP >0)			Psimulatie < Pgemeten (dP <0)		
Put naam	RMS* totaal (bar)	Aantal punten	Put naam	RMS* totaal (bar)	Aantal punten
ODP-1	17,11	25	USQ-1	35,87	16
ANV-1	10,38	24	MLA-1	10,32	6
ZVN-7	9,57	5	KHM-1	7,65	10
ZVN-5	5,7	19	NWS-3	6,51	3
SZW-4	5,21	1	ZPD-1	6,23	1
ZVN-9	5,19	13	EKL-13	6,05	4
MWD-3	4,97	1	EKR-1	5,97	4
ZND-2A	3,78	1	BRW-4	5,24	1
EKR-204	3,74	1	HGZ-1	5,23	1
EKL-1	3,63	4	TBR-4	4,51	34

\* RMS: Root Mean Squared

Het slechtst gefit is de observatieput USQ-1: de onderschatting van de gemeten druk neemt toe tot 70 bar (Figuur 3.4). De nabijgelegen put ODP-1 laat juist een toenemende overschatting van de druk zien. Dit suggereert een overschatting van de connectiviteit tussen de beide putten. Gezien het grote drukverschil tussen deze twee nabijgelegen putten, ligt er waarschijnlijk een laag-permeabele breuk tussen. De volgende groep slecht gefitte metingen (ANV-1, MLA-1 en KHM-1) liggen alle in het uiterste zuidwesten (ANV-1 in zuiden en MLA-1 en KHM-1 in het zuidwesten).



Figuur 3.4 History match van de druk in observatieput USQ-01 met gemeten en gesimuleerde drukken.

#### 3.1.4.1 Grote aanpassingen in de history match

Voor het verkrijgen van een goede fit van de gemodelleerde druk aan de data, waren grote aanpassingen in het statisch model nodig bij de slecht doorlatende lagen (zogenaamde heterolithics) en met name de Ameland kleisteen. Voor deze laag werd over het gehele veld een vermenigvuldigingsfactor van  $1,5 \cdot 10^{-8}$  voor de verticale permeabiliteit gebruikt. De noodzaak voor een dermate kleine vermenigvuldigingsfactor werd toegeschreven aan gebrekkige poro-perm relaties voor die slecht doorlatende lagen. Doordat het aantal monsters buiten het reservoir gesteente (dus in de minder doorlatende lagen) waarop deze relaties gebaseerd zijn zeer gering is, is dit blijkbaar niet goed weergegeven. Het gebruik van een constante vermenigvuldigingsfactor laat echter geen ruimte om de ruimtelijke variatie en verspreiding van de Ameland kleisteen, zoals deze is beschreven in Paragraaf 2.4, goed weer te geven.

#### 3.1.4.2 Loppersum

Het gebied rond Loppersum is in meer detail bekeken vanwege de seismische activiteit in dit gebied. Een overzicht van de mismatches in reservoirdruk wordt gegeven in Appendix B. De twee meest nabijgelegen putten ZRP-1 en SDM-1 laten beiden een afwijking zien tussen berekende en gemeten druk van minder dan 5 bar.

#### 3.1.4.3 Delfzijl

Het gebied rond Delfzijl is van belang vanwege een relatief grote discrepantie tussen geobserveerde en berekende bodemdaling (zie Hoofdstuk 5). Er zijn in dit gebied echter geen aanwijzingen gevonden voor een grote discrepantie in de gemeten en berekende druk die de discrepantie tussen geobserveerde en berekende bodemdaling zou kunnen verklaren. Het aantal metingen is overigens zeer beperkt in dit gebied.

#### 3.1.4.4 Match aan andere typen metingen

Een andere type meting die normaliter belangrijke informatie levert, is de waterproductie. Met uitzondering van EKL-13, wordt echter nergens in het veld formatie water geproduceerd. In het model wordt de water productie in EKL-13 overigens overschat. In de afwezigheid van water productie is de stijging van het gas-water contact gebruikt als kalibratie. Dit soort stijgingen worden gerapporteerd op basis van PNL (Pulsed Neutron Log) data in onder andere ODP-1, ZWD-2a en rond Bierum (Van der Graaf, 2003). Het is niet duidelijk hoe deze data zijn meegenomen in de history match. In het model lijkt op grotere schaal een stijging van het gas-water contact gesimuleerd te worden dan in de metingen naar voren komt, met name in de noordwest hoek (bijvoorbeeld in ZRP-1 en SDM-1) (zie ook Paragraaf 3.1.1).

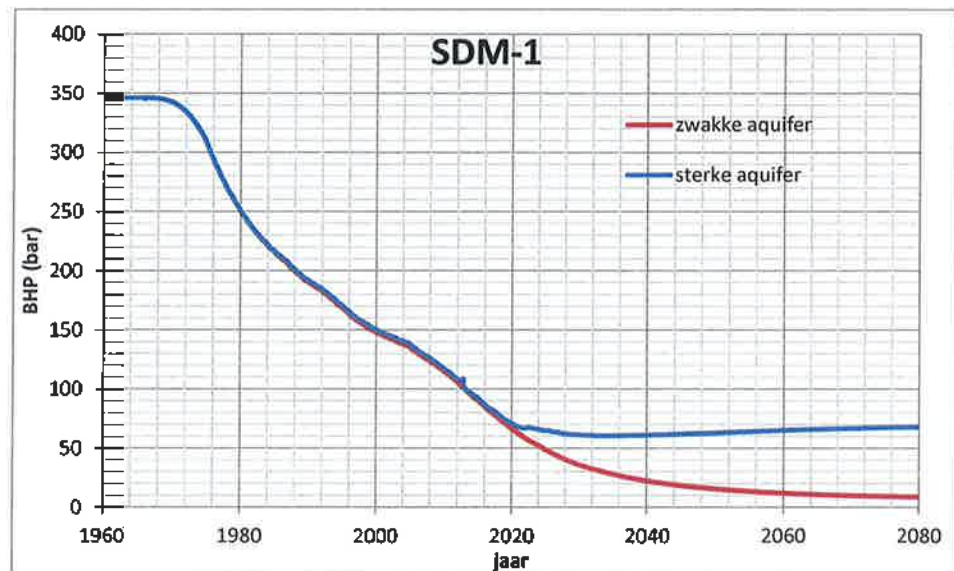
### 3.2 Onzekerheidsanalyse dynamisch model m.b.t. modelleren van compactie

De belangrijkste onzekerheid in het dynamische model vormen zeer waarschijnlijk de aquifers, zoals ook reeds door NAM aangegeven (NAM, 2013d). Doordat het aantal metingen in de aquifers beperkt is en de invloed van waterdruk op de gasdruk klein is, is de onzekerheid in het gedrag van de aquifers groot. Aan de andere kant is de impact op de compactie en daarmee de bodemdaling juist groot in die gebieden waar bodem- of laterale aquifers voorkomen.

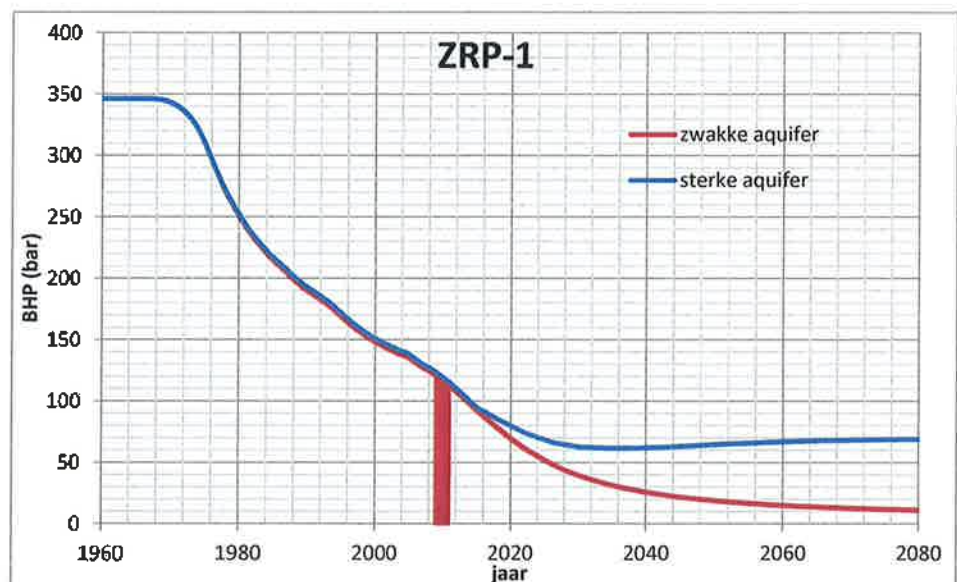
Een additionele onzekerheid is het gebruik van analytische aquifers in het model. De drukkaling in deze gebieden wordt namelijk niet bij de compactie berekeningen meegenomen hetgeen aan de randen in een consequente onderschatting van de compactie resulteert. De gesimuleerde instroom van de analytische aquifers in het model is  $4,8 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  over de periode tot 1-1-2013. Ter referentie, als deze hoeveelheid water onttrokken zou worden aan een aquifer van 60 bij 60 km van 300 m dik (totaal volume  $1,1 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ ) zou dat een drukkaling in de hele aquifer veroorzaken van zo'n 50 bar. Ter vergelijking: het totale bulk volume van het Groningen model is  $0,32 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ . Over de totale periode tot 1-1-2080 wordt een aquifer influx in het model gebied verwacht van  $1,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  (marktvaart scenario).

Van de analytisch aquifers hebben de aquifers in het noordwesten, die aangepast waren om de bodemdaling te matchen, de grootste impact. Deze impact kan afgeschat worden door een vergelijking van twee modellen, namelijk met een zwakkere en met een sterkere aquifer. NAM refereert hieraan als 'weak' (G2) en 'moderate' (G1) aquifer (NAM, 2013d). Het basismodel dat hier besproken is, bevat de 'moderate' aquifer. In het vervolg zal de terminologie zwakke en sterke aquifer gebruikt worden. Het model met de zwakke aquifer heeft een vergelijkbare match met de drukdata, maar een betere match aan de metingen van de veranderingen in het gas-water contact.

Voor de zwakke aquifer is de totale cumulatieve aquifer instroom al beduidend kleiner:  $0,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  in plaats van  $1,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . In Figuur 3.5 en Figuur 3.6 wordt de drukontwikkeling in SDM-1 en ZRP-1 gegeven. Vanaf 2016 in ZRP-1 en vanaf 2020 in SDM-1 begint het verschil duidelijk zichtbaar te worden. In 2080 is het drukverschil in de orde van 60 bar. In de nabijheid van de aquifer zelf wordt het drukverschil aanzienlijk groter. In ODP-1 loopt het drukverschil in 2080 op tot 120 bar.



Figuur 3.5 Ontwikkeling van de druk in SDM-1 tot 2080 voor een zwakke en een sterke aquifer.



Figuur 3.6 Ontwikkeling van de druk in ZRP-1 tot 2080 voor een zwakke en een sterke aquifer.

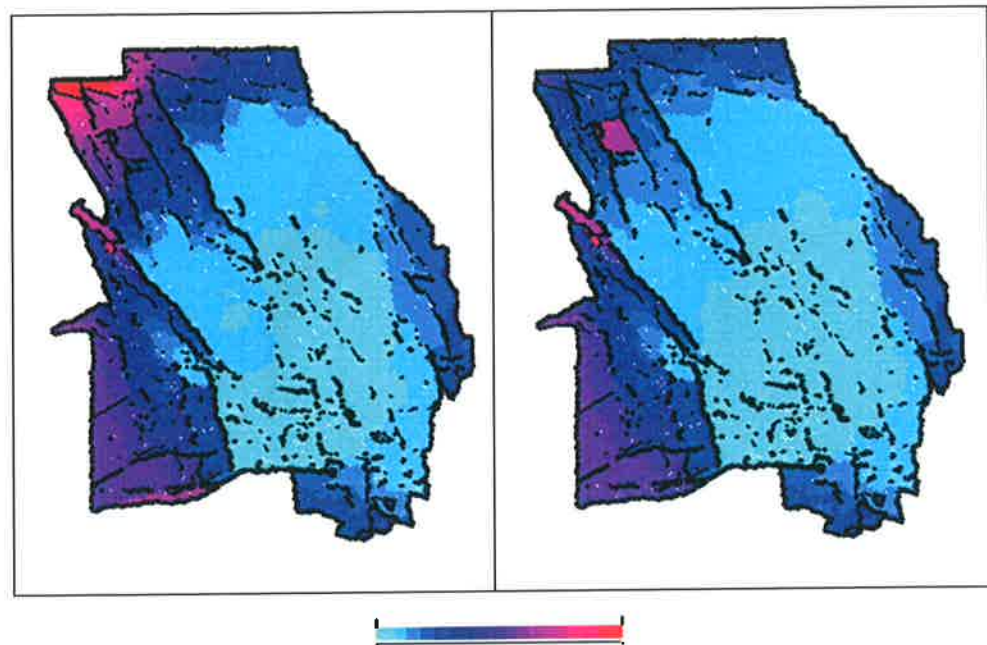
Om een ruimtelijk beeld te krijgen van de impact van deze aquifer zijn in Figuur 3.7 t/m Figuur 3.9 twee dwarsdoorsnedes en 1 kaart van de druk op 31-12-2012 (einde van de history match) gegeven. Het drukverschil wordt gepresenteerd in Figuur 5.16 in Hoofdstuk 5.

Een andere onzekerheid is het Carboon. Hoewel dit weinig effect heeft op de productie, zou het effect op de compactie mogelijk wat groter kunnen zijn. Ook de ruimtelijke variatie in bodemdaling zou door het Carboon beïnvloed kunnen worden, aangezien Carboon zanden vooral in het zuidelijk deel van het veld in contact staat met de Slochteren zandsteen.

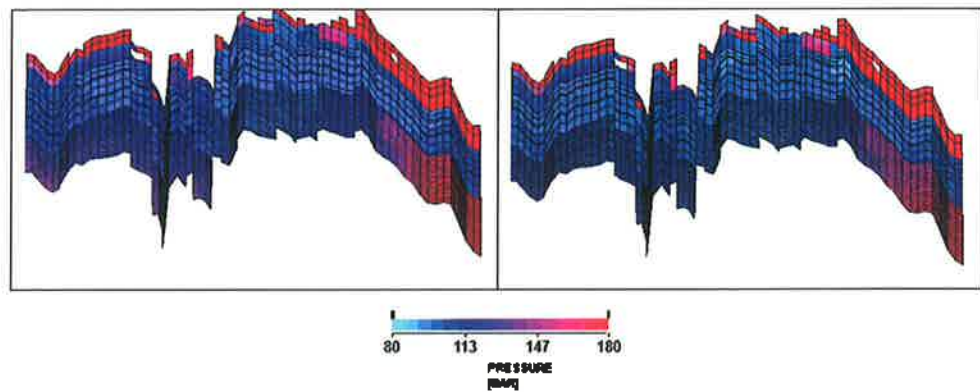


Als er sprake is van gas onder het gas-water contact of van een lagere permeabiliteit in de water zone, zou dit een overschatting van de compactie veroorzaken. Dit zou dus een tegengesteld effect hebben t.o.v. de vorige twee onzekerheden. In het geval van de aanwezigheid van gas, zou de effectieve compressibiliteit in de waterzone groter zijn en daarmee de drukdaling kleiner dan verwacht.

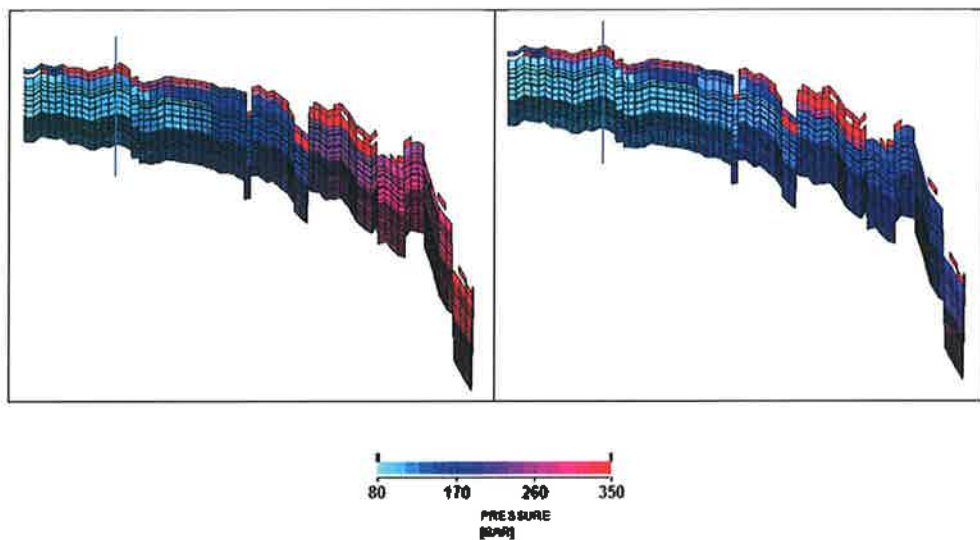
De onzekerheid in de doorlatendheid van breuken heeft waarschijnlijk vooral een lokaal effect aan de randen van het model. In het centrale deel van het veld zijn de breuken, met zeer grote waarschijnlijkheid, allemaal goed doorlatend. Een voorbeeld waar de onzekerheid in de doorlatendheid van breuken lokaal veel effect kan hebben is USQ-1. De drukdaling in deze put wordt niet alleen beïnvloed door de nabijgelegen aquifer, maar ook door de doorlatendheid van de omliggende breuken, aangezien de put in een klein, afgesloten breukblok ligt.



Figuur 3.7 Overzicht van de druk op 31-12-2012 in laag 4 voor het scenario met een sterke (links) en een zwakke aquifer (rechts).



Figuur 3.8 Oost-west dwarsdoorsnede ter hoogte van SDM-1 en ZRP-1 van de druk op 31-12-2012 zoals ook door NAM gegeven van de sterke aquifer (links) en de zwakke aquifer (rechts).



Figuur 3.9 Noord-zuid dwarsdoorsnede door SDM-1 in de noordelijke helft van het model van het scenario met de sterke aquifer (links) en de zwakke aquifer (rechts). De getoonde variabele is druk op 31-12-2012. De blauwe lijn geeft de positie van de oost-west dwarsdoorsnede in Figuur 3.8.

### 3.3 Dynamische scenario's

Een overzicht van scenario's die gerund zijn met het dynamische model wordt gegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Overzicht van de scenario's voor het dynamische model (bcm = mrd Nm<sup>3</sup>).

Scenario naam	Beschrijving
Marktvraag	Productie volgt de marktvraag (versimpeld); ongewijzigd scenario zoals door NAM aangeleverd
40 bcm	Constance vraag van 40 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
30 bcm	Constance vraag van 30 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
20 bcm	Constance vraag van 20 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
10 bcm	Constance vraag van 10 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
0 bcm	Productiestop vanaf 1-1-2014
30 bcm A1	Productie verplaatst zich geleidelijk van het noorden naar het zuiden bij een 30bcm veldproductie
30 bcm A2	Productie wordt gelijkelijk verdeeld over alle clusters in combinatie met het 30bcm scenario.
30 bcm A3	Stop productie in de cluster in de buurt van Loppersum als de druk daar beneden 80 bar (POS, LRM en ZND), resp. 40 bar (PAU en OVS) komt per 1-1-2014
30 bcm A4	Stop alle productie in de clusters POS, LRM, ZND, PAU en OVS per 1-1-2014

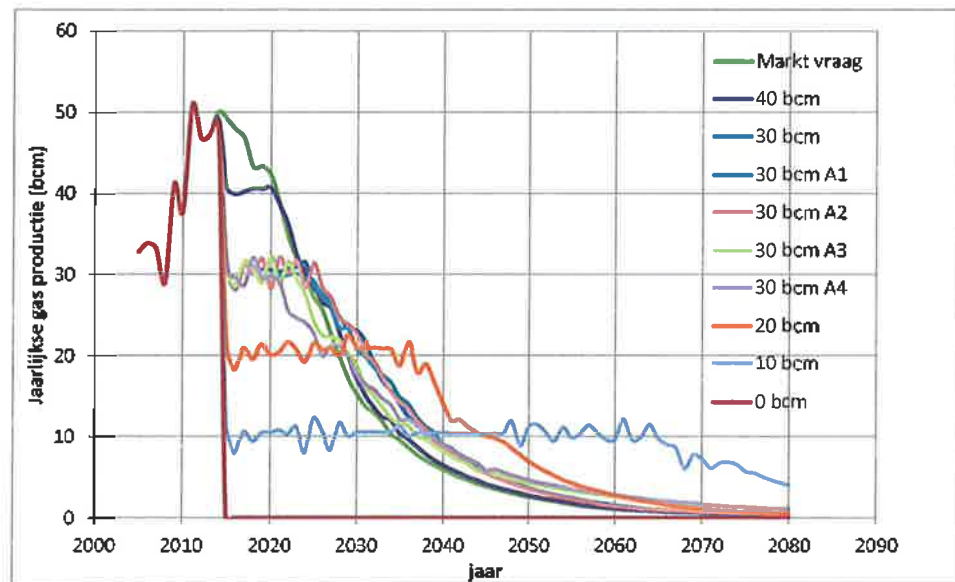
Opmerkingen:

- Alle simulaties zijn gedaan met een fout in de water injectie (NAM, pers. comm.). Op het moment dat de fout hersteld kon worden, was het te laat om alle scenario's opnieuw te runnen. NAM heeft in haar eigen scenario's aangenomen dat de water injectie nul is. Het totale verschil is  $3,4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ . Dit verschil is lokaal rond Borgsweer zeer groot (>100 bar drukverschil), maar regionaal nauwelijks merkbaar (zie ook Figuur 5.25).
- Alle scenario's (behalve het marktvraag scenario) zijn gedaan met een vlakke verdeling van de vraag over het jaar (dus niet meer vraag in winter dan zomer) en met ondergrondse gasopslag. De jaarlijkse 'swing' die zichtbaar is in de figuren wordt door deze opslag veroorzaakt.
- Alle scenario's zijn gerund met het versimpelde scenario zoals ontvangen van de NAM. Er zijn geen andere aanpassingen gedaan dan die beschreven zijn in Tabel 3.2, bijvoorbeeld aan het 'renovatie' programma of de ondergrondse gas opslag.

Tabel 3.3 geeft een overzicht van de cumulatieve productie over de periode 1-1-2014 tot 1-1-2080 van de verschillende scenario's. Voor een aantal scenario's is de cumulatieve productie duidelijk lager: 10 bcm, 30 bcm A3 en 30 bcm A4 (bcm = billion cubic meter; dit representeert het volume produceerbaar gas bij atmosferische druk). Hierdoor valt ook de uiteindelijke compactie lager uit. De jaarlijkse productie staat in Figuur 3.10. Het effect van de verschillende scenario's is bekeken voor 3 putten: SDM-1 (een observatie put in het Loppersum gebied), ZND-10 (meest noordelijke cluster) en ZVN-10 (cluster in zuidelijke deel van Groningen) (zie Figuur 3.11 t/m Figuur 3.13). Deze 2 clusters waren ook gekozen door NAM als illustratie.

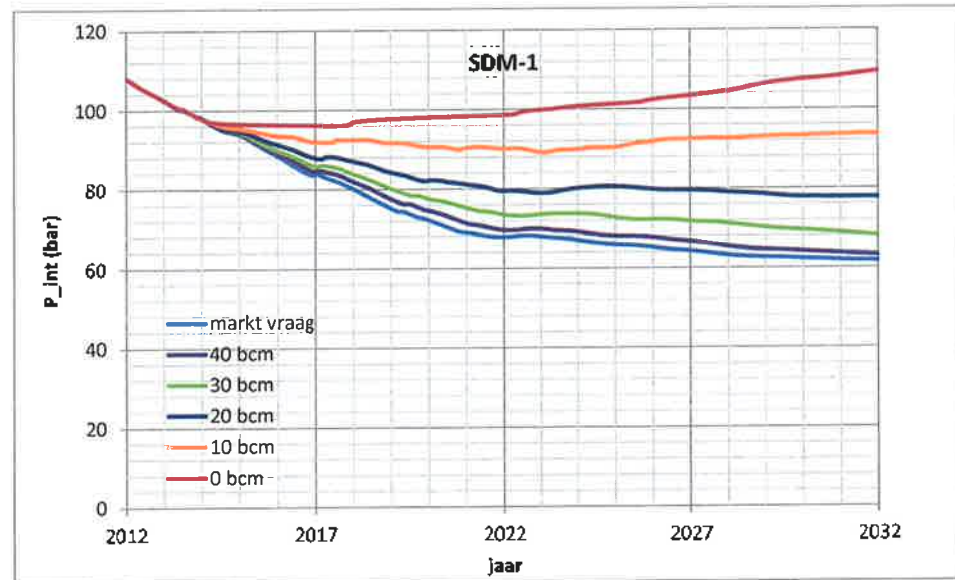
Tabel 3.3 Overzicht van de afname in gas productie voor de verschillende scenario's voor de periode 1-1-2014 tot 1-1-2080.

Scenario	Cum. gas productie van 1-1-2014 tot 1-1-2080 (mrd Nm <sup>3</sup> )	% afname t.o.v. productie 'marktvraag' scenario
Marktvraag	695	
40bcm	694	-0,09
30bcm	693	-0,35
20bcm	685	-1,41
10bcm	624	-10,23
0bcm	0	-100
30bcm A1	692	-0,36
30bcm A2	694	-0,18
30bcm A3	667	-4,05
30bcm A4	663	-4,60

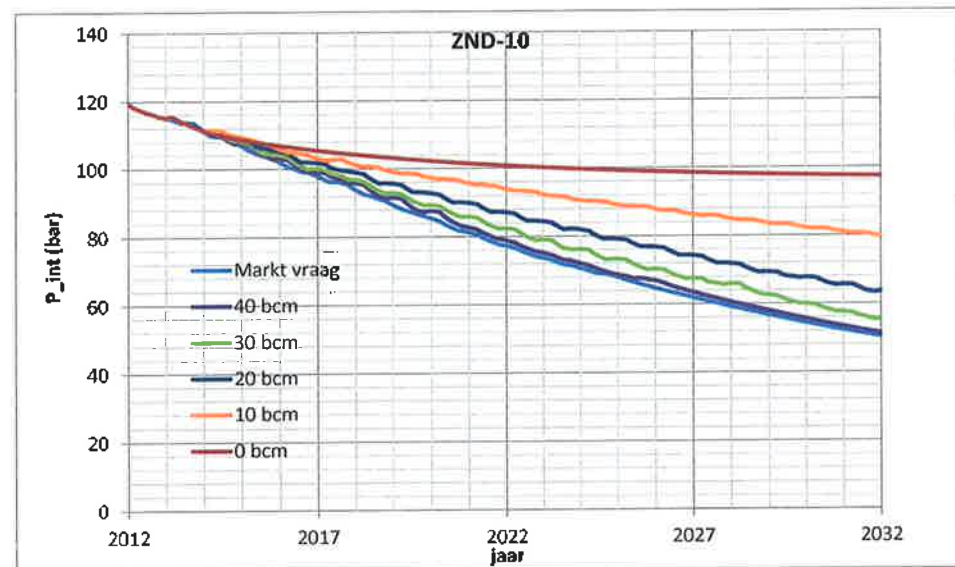


Figuur 3.10 Overzicht van de jaarlijkse productie voor alle gerunde scenario's.

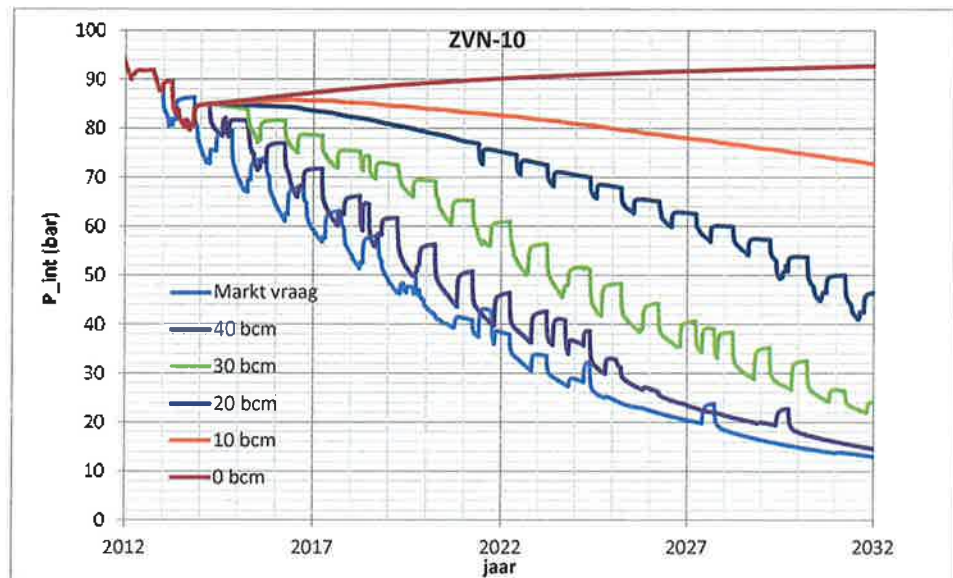
Voor de scenario's met afnemende maximale productie (Figuur 3.11 t/m Figuur 3.13), is een gestage toename in de druk te zien in alle drie de putten. Het 40 bcm scenario geeft zeer vergelijkbare resultaten als het marktvraag scenario. Voor het scenario waar de productie per 1-1-2014 gestopt wordt neemt de druk in SDM-1 en ZVN-10 snel toe. Voor ZND-10 blijft de druk nog dalen, waarschijnlijk door uitwisseling met andere, sterker gedepleteerde regio's.



Figuur 3.11 Druk in het grid blok van het eerste interval van put SDM-1 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.

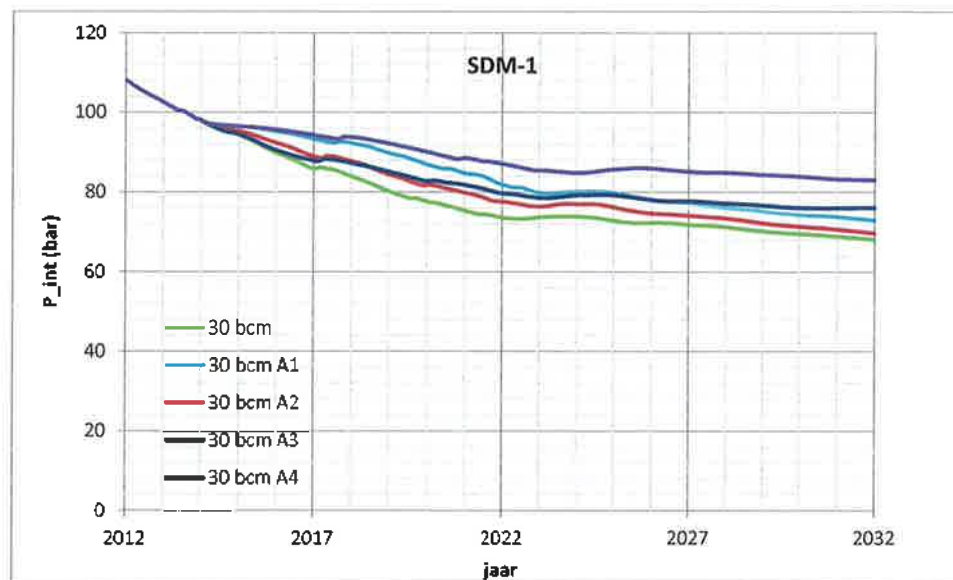


Figuur 3.12 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZND-10 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.

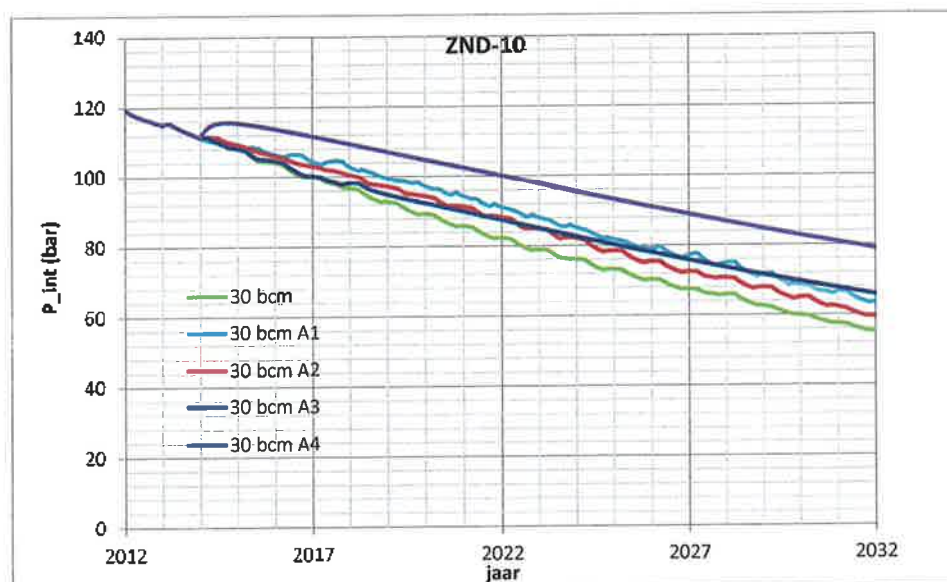


Figuur 3.13 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZVN-10 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.

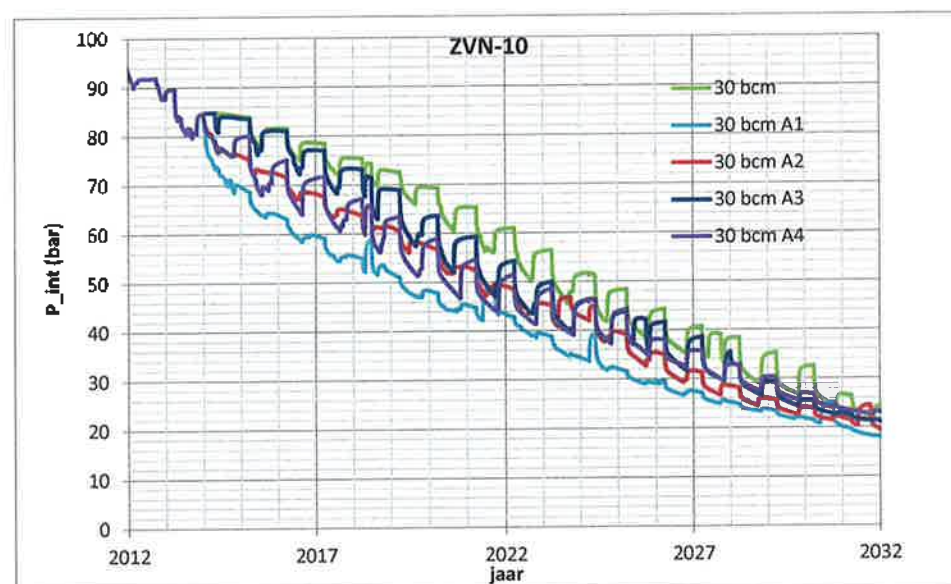
De Figuren 3.14 t/m 3.16 laten het drukverloop zien voor de productie scenario's met een verschillende filosofie over de verdeling van de productie over de verschillende clusters. De scenario's A1 (vertraag productie rond Loppersum zoveel mogelijk) en A4 (geen productie in de clusters rond Loppersum) hebben in eerste instantie de sterkste verhoging van de druk in SDM-1 tot gevolg. Voor scenario A1 verdwijnt dit voordeel echter weer op het moment dat de andere clusters in het veld de gevraagde productie niet meer kunnen leveren. Op dat moment gaan de clusters rond Loppersum ook weer volledig produceren en daalt de druk alsnog. Het scenario A3 (minimale druk van 80 bar) heeft in het begin weinig effect, maar zorgt in een latere fase voor een stabilisering van de druk in SDM-1.



Figuur 3.14 Druk in het grid blok van het eerste interval van observatie put SDM-1 voor 6 scenario's met vaste jaarlijkse maximum productie van 30 bcm en verschillende productie strategieën (zie Tabel 3.2).



Figuur 3.15 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZND-10 voor 6 scenario's met vaste jaarlijkse maximum productie van 30 bcm en verschillende productie strategieën (zie Tabel 3.2).



Figuur 3.16 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZVN-10 voor 6 scenario's met vaste jaarlijkse maximum productie van 30 bcm en verschillende productie strategieën (zie Tabel 3.2).

Het is ook mogelijk om de impact van veranderingen in de productie op een andere manier weer te geven. In Tabel 3.4 staat een overzicht van de drukdaling in SDM-1 over de periode 1-1-2014 tot 1-1-2018 en de productie in de vijf clusters rond Loppersum (LRM, OVS, PAU, POS en ZND) in dezelfde periode. In deze tabel, zijn een aantal scenario's toegevoegd ten opzichte van de eerder gedefinieerde scenario's in Tabel 3.2.

Uit de informatie in Tabel 3.4 blijkt dat het zeer moeilijk is om uit de clusters rond Loppersum te produceren in de komende jaren, als een drukdaling van maximaal 4 tot 5 bar in de komende 4 jaar acceptabel is. Al bij het 30 bcm A4 scenario waarin alle productie in de vijf clusters rond Loppersum stilgelegd wordt, is de drukdaling in SDM-1 na vier jaar (periode 1-1-2014 tot 1-1-2018) al meer dan 4 bar. Voor het 30 bcm A1 scenario (waar heel weinig uit de clusters rond Loppersum geproduceerd wordt, namelijk 8 bcm) is de drukdaling over die periode al bijna 6 bar in SDM-1. Alleen voor het 20 bcm scenario blijft de drukdaling in SDM-1 beperkt: 3,9 voor het A1 scenario en 3,2 voor het A4 scenario.

Om aan de marktvraag te kunnen voldoen de komende vier jaar, is zelfs bij een sterke nadruk op de productie uit het zuiden (scenario A1), een aanzienlijke productie uit de clusters rond Loppersum noodzakelijk, namelijk 36 bcm over de periode van 4 jaar van 1-1-2014 tot 1-1-2018, wat overkomt met 62% van de productie bij de huidige productie filosofie. De drukdaling in SDM-1 zou dan in de periode 1-1-2014 tot 1-1-2018 uitkomen op 12,3 bar, vergeleken met 17,9 bar voor de huidige productie filosofie. De productie filosofie om de productie naar het zuiden te verplaatsen (A1) is veel effectiever als de maximum jaarlijkse productie 30 bcm is. De productie over de periode 1-1-2014 tot 1-1-2018 neemt in dat geval af van 50 bcm naar 8 bcm (16%) en de drukdaling in SDM-1 van 14,1 naar 5,7 bar.

Tabel 3.4 Overzicht van de drukdaling en productie rond Loppersum. Productie is de cumulatieve productie van de clusters LRM, PAU, POS, OVS en ZND over de periode 2014 t/m 2017.

	Druk in SDM-1 op 1-1-2014	Druk in SDM-1 op 1-1-2018	Vershil	Productie van 2014-2018
	bar	bar	bar	Mrd Nm <sup>3</sup>
Marktvraag	98,2	80,3	17,9	58,0
Marktvraag A1*	98,2	85,9	12,3	35,7
40 bcm	98,0	82,1	16,0	53,7
40 bcm A1	98,0	88,4	9,7	21,2
30 bcm	98,0	83,9	14,1	50,0
30 bcm A1	98,0	92,3	5,7	8,0
30 bcm A4	98,0	93,8	4,3	0,0
20 bcm	98,0	87,1	11,0	40,0
20 bcm A1	98,0	94,1	3,9	3,1
20 bcm A4	98,0	94,9	3,2	0,0

\* De cumulatieve gasproductie voor dit scenario was 2,2% lager dan voor het marktvraag scenario over de periode 2014 t/m 2017.



### 3.4 Samenvatting en conclusies

Uit de review en onzekerheidsanalyse van het model blijkt het volgende:

- De belangrijkste onzekerheid wordt gevormd door de aquifers, zowel degene die numeriek zijn gesimuleerd als de analytische aquifers.
- Het gebied met de grootste onzekerheid is de noordwest hoek van het model, waar een analytische aquifer op basis van bodemdalingsmetingen sterk is aangepast. Deze aanpassing heeft een sterke stijging in de druk tot gevolg. Deze drukstijging breidt zich met de tijd uit en op basis van het huidige model wordt een effect verwacht in het Loppersum gebied vanaf 2016/20. In 2080, zou deze sterke aquifer een drukstijging in het Loppersum gebied van meer dan 50 bar veroorzaken.
- Het gebruik van analytische aquifers resulteert in een consistente onderschatting van de compactie aan de randen van het model waar aquifers gedefinieerd zijn.
- De weergave van de breuken is onvoldoende nauwkeurig om uitspraken te doen over individuele breuken en de drukverschillen lokaal rond een breuk.
- Het onderliggende Carboon is niet meegenomen in dit model. Hoewel de verwachte impact of de productie zeer gering is, is dit niet noodzakelijkerwijs ook het geval voor de compactie. Er zijn geen gevoeligheidsanalyses gedaan om dit te testen.

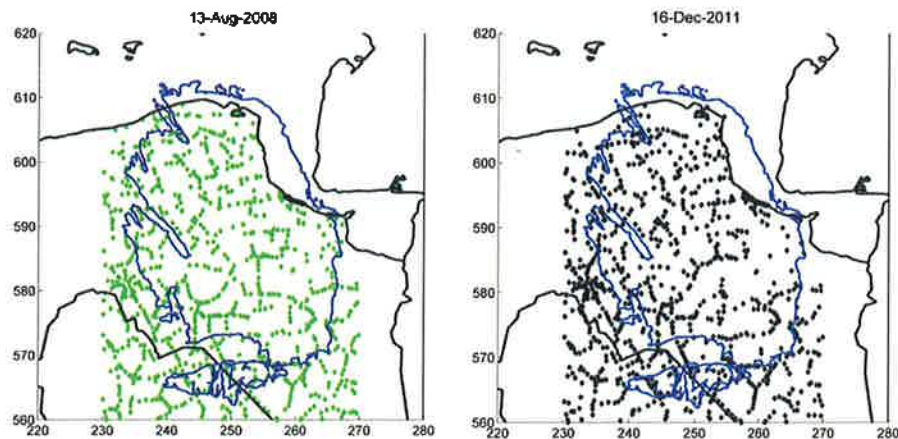
Uit de gerunde scenario's kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het is alleen mogelijk om de drukdaling in het Loppersum gebied te beperken tot 5 bar of lager, met het 30 bcm scenario in combinatie met verplaatsen van de productie naar het zuidelijk deel van het veld alsook het 20 bcm scenario en het 20 bcm scenario met verplaatsen productie naar zuiden van veld.
- Als het marktvraag scenario wordt aangehouden is een aanzienlijke daling van de druk (> 15 bar) in het Loppersum gebied onvermijdelijk. Alternatief A1 gaf een daling van 12,3 bar, maar kon de gevraagde productie niet leveren (2,2% minder).

## 4 Bodemdalingsmetingen

### 4.1 Differentiëestaat NAM

De bodemdalingsmetingen bestaan uit peilmerkmetingen en PS-InSAR metingen in de vorm van een differentiëestaat. Hierin zijn de hoogteverschillen opgenomen per peilmerk voor elke meetcampagne. Deze differentiëestaat is ter beschikking gesteld door NAM. Hierin zit de data van de primaire meetcampagnes van 1964, 1972, 1975, 1985, 1987, 1990, 1991, 1993, 1997, 1998, 2003 en 2008. Het aantal aangemeten peilmerken varieert per campagne van 181 tot 1168 peilmerken. De meest recente campagne is gegeven in Figuur 4.1, de campagnes van voorgaande jaren zijn terug te vinden in Appendix C.1. Daarnaast zijn PS-InSAR datapunten gebruikt van 1993-2011. Het aantal PS-InSAR punten die in de differentiëestaat meegenomen zijn varieert tussen 0 en 1134 metingen. Ook van deze data is de meest recente campagne gegeven in Figuur 4.1, de campagnes van voorgaande jaren zijn te vinden in Appendix C.2.



Figuur 4.1 Bodemdalingsmetingen beschikbaar in de differentiëestaat. Links: primaire meetcampagne van de peilmerken in 2008, rechts: InSAR metingen voor 16 december 2011.

### 4.2 Analyse voor stabiele peilmerken

Het primaire waterpassing netwerk wordt beheerd door Rijkswaterstaat en regelmatig (ten minste één keer in de vier jaar) opgemeten. Om deze waterpassingen te kunnen gebruiken voor compactie dat wordt veroorzaakt door depletie van een gasveld, is ten eerste de fundering belangrijk. In het geval van een fundering op het Pleistoceen zal het peilmerk bodemdaling van een oorzaak in de diepe(re) ondergrond laten zien. Peilmerken die ondiep gefundeerd zijn, laten vooral bodemdaling zien veroorzaakt door ondiepere effecten zoals inklinking van klei of veen en aanpassingen aan de grondwaterstand. Door verschillende oorzaken, bijvoorbeeld aanpassing in dijkhoogten of verandering van peilmerknaam, kan een peilmerk onstabiel gedrag vertonen in de tijd. Deze onstabiele peilmerken kunnen de analyse voor compactie en bodemdaling negatief beïnvloeden. In deze paragraaf is een analyse toegepast om te bepalen welke

peilmerken stabiel gedrag vertonen in de tijd. Deze analyse berust op de methode van Caro Cuenca et al. (2011).

Deze analyse beschrijft een ruimtelijke en temporele test voor stabiliteit. De temporele analyse wordt uitgevoerd met behulp van een Overall Model Test (OMT) en beschrijft voor elk individueel peilmerk de afwijking van een lineaire bodemdalingssnelheid, welke wordt gezien als een indicatie van instabiliteit. De ruimtelijke analyse is uitgevoerd met behulp van een t-test (Student test) en vergeleek oorspronkelijk (in Caro Cuenca et al., 2011) de bodemdalingssnelheid per peilmerk met de geïnterpoleerde kaart van de bodemdalingssnelheid in de studie van Caro Cuenca et al. (2011). Deze bodemdalingssnelheidskaart was gebaseerd op snelheden gemeten in die ondergrondse peilmerken, die als zeer stabiel worden beschouwd (gefundeerd op het Pleistoceen). De ruimtelijke analyse alsook de statistische test is in dit onderzoek verbeterd. De t-test voor de ruimtelijke analyse wordt in dit onderzoek toegepast door snelheden gemeten in individuele peilmerken te vergelijken met de snelheidskaart van Caro Cuenca (2012) die bepaald is met InSAR, GPS en gravimetrie. Hierbij wordt aangenomen dat grote variaties in bodemdalingssnelheid indicaties zijn van instabiliteit.

#### 4.2.1 *Temporele analyse (1989 tot 2011)*

Voor de analyse in het tijdvak van 1989 tot 2011 worden de peilmerkhoogten ten opzichte van NAP gebruikt uit de originele data van Rijkswaterstaat. Hierbij wordt eerst zeker gesteld dat de peilmerkhoogten ten opzichte van hetzelfde NAP peil gegeven zijn.

Voor de temporele analyse wordt de bodemdalingssnelheid van elk peilmerk in de tijd afgeleid. De 'Overall model test (OMT)' wordt uit de residuals gehaald na correctie voor deze bodemdalingssnelheid. De OMT wordt gedefinieerd als de ratio tussen de variantie van de residuals en de variantie van de originele data van Rijkswaterstaat. De variantie van de originele data van Rijkswaterstaat is  $9 \text{ mm}^2$ . Als de OMT gelijk is aan twee betekent dit dat de gemeten dispersie van de peilmerkhoogten twee keer de verwachte dispersie van de peilmerkhoogten is. Hoge waarden voor OMT kunnen worden verkregen door:

1. Slechte metingen
2. Lokale instabiliteit van het peilmerk
3. Niet-lineaire effecten

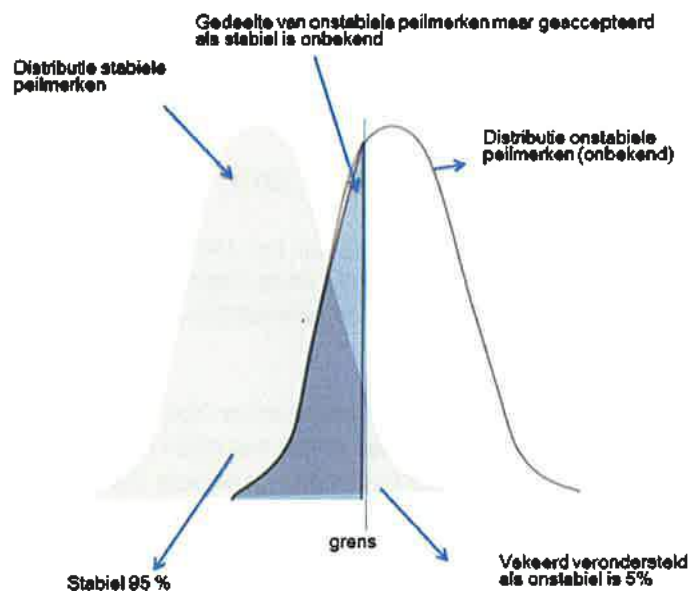
Het derde geval zou optreden als gaswinning in het midden van het bekeken interval zou liggen. Dit zou zorgen voor niet-lineaire effecten.

#### 4.2.2 *Ruimtelijke analyse*

Om de ruimtelijke peilmerkstabiliteit te analyseren wordt de snelheid van de peilmerken vergeleken met naburige peilmerken. In deze analyse wordt de bodemdalingssnelheid van een peilmerk  $\hat{v}_{iev}$  vergeleken met de bodemdalingssnelheid  $v_{map}$  verkregen voor dezelfde locatie in de landelijke analyse. Voor deze landelijke analyse (Caro Cuenca, 2012) werd gebruik gemaakt van alle beschikbare bodemdalingsdata (InSAR, GPS en gravimetrie). Deze vergelijking wordt gedaan met de Student t-test, welke gedefinieerd is als:

$$t = \frac{\hat{v}_{lev} - v_{map}}{\sqrt{(\hat{\sigma}_{lev}^2 + \sigma_{map}^2)}}$$

Waar  $\hat{\sigma}_{lev}^2$  de variantie is van de geschatte bodemdalingsnelheid van het peilmerk en  $\sigma_{map}^2$  de variantie van  $v_{map}$ . Een kritische waarde kan verkregen worden gebaseerd op een gewenst niveau van significantie, bijvoorbeeld 5%. Aangezien de Student's distributie een dubbele staart heeft moet de kritische waarde gelijk gedistribueerd zijn aan beide kanten van de verdeling. Als  $t$  groter is dan de kritische waarde dan is het verschil tussen beide gemiddelden te groot en verschilt de bodemdalingsnelheid van het peilmerk meer dan verwacht. In dit geval wordt het peilmerk als instabiel veronderstelt. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4.2.



Figuur 4.2. Illustratie van de Student's t-test

In deze analyse wordt aangenomen dat hoge waarden van test  $t$  veroorzaakt worden door instabiliteit van het peilmerk. Dit is echter niet noodzakelijk waar. Het niet kunnen voldoen aan deze test kan ook worden veroorzaakt door:

1. Een peilmerk met een niet-lineaire beweging. De snelheidskaart van heel Nederland gebaseerd op InSAR, GPS en peilmerken geeft een gemiddelde snelheid over de periode 1992 tot 2010. Een peilmerk met een sterke versnellende beweging kan hierdoor als onstabiel worden gekenmerkt terwijl dit niet het geval is.
2. Fouten in de snelheidskaart.
3. Fouten in de peilmerkmetingen.

Rijkswaterstaat geeft zelf ook een classificering aan in de peilmerken m.b.t. stabiliteit. Deze wordt gegeven door:

1. Ondergronds peilmerk van 1<sup>ste</sup> orde of 2<sup>de</sup> orde netwerk.
2. Peilmerk op een muur van een gebouw. Hierbij wordt aangegeven of deze stabiel is (niet altijd accuraat).
3. Onbekend, als een peilmerk niet aan de twee bovenstaande klassen voldoet.

De analyse van stabiele peilmerken is voor verschillende betrouwbaarheidslimieten uitgevoerd (Figuur 4.2). Een voorbeeld met een 99% betrouwbaarheidslimiet is gegeven in Figuur 4.3. Deze figuur toont aan dat boven het Groningen gasveld enkele peilmerken onstabiel zijn (binnen de 99% betrouwbaarheidslimiet).



Figuur 4.3 Peilmerken in de provincie Groningen. Rood zijn onstabiele peilmerken met een 99% betrouwbaarheidslimiet.

De Rijkswaterstaat data heeft meer peilmerken dan de NAM data (Tabel 4.1). Dit wordt veroorzaakt doordat Rijkswaterstaat meer meetcampagnes meeneemt, met andere meetpunten dan in de NAM differentiestaat. Veel van de epochen in de Rijkswaterstaat data zijn kleine waterpassingen (secondair) die beperkt informatie opleveren voor het Groningen gasveld. Deze zijn dan ook niet meegenomen in de NAM differentiestaat. Opmerkelijk is echter dat de primaire waterpassingen van 1978 en 1981 wel zijn opgemeten over het Groningen veld maar niet zijn meegenomen in de NAM differentiestaat.

Tabel 4.1 Aantal peilmerken in de datasets.

	# peilmerken in Groningen	# peilmerken aanwezig in beide datasets
Rijkswaterstaat	2042	1304
NAM	1317	1304

Voor de analyse in Hoofdstuk 5 zijn de onstabiele peilmerken (met de 99% betrouwbaarheidslimiet bepaald) van de NAM differentiestaat buiten beschouwing gelaten. Dit zijn 60 peilmerken van de 1304 gedeelde peilmerken. De overige 1244 peilmerken zijn meegenomen in de analyse voor compactie en bodemdaling (Hoofdstuk 5) ten gevolge van de gaswinning in Groningen.

### 4.3 Conclusies en aanbevelingen

#### 4.3.1 Conclusies

Voor de bodemdalingsdata kan het volgende geconcludeerd worden uit deze paragrafen:

- De gebruikte differentiestaat bevat de primaire meetcampagnes van 1964, 1972, 1975, 1985, 1987, 1990, 1991, 1993, 1997, 1998, 2003 en 2008.
- De primaire waterpassingen van 1978 en 1981 zijn niet meegenomen in de NAM differentiestaat.
- Het aantal aangemeten peilmerken in de differentiestaat varieert per meetcampagne tussen de 181 en 1168.
- Het aantal InSAR punten in de differentiestaat varieert per meting tussen de 0 en 1134 metingen.
- Van de 1304 peilmerken die overeenkomen in de NAM differentiestaat en de Rijkswaterstaat data zijn 60 peilmerken niet stabiel met een betrouwbaarheid van 99%. Deze peilmerken zijn niet meegenomen in de compactiemodellering van Hoofdstuk 5.

#### 4.3.2 Aanbevelingen

TNO-AGE beveelt op basis van deze bevindingen aan dat:

- De primaire waterpassingen van 1978 en 1981 worden meegenomen in de differentiestaat.
- De compactiemodellering alleen bodemdalingsmetingen gebruikt van de stabiele peilmerken (99% betrouwbaarheid).

## 5 Compactie modellering

In dit hoofdstuk worden de compactie- en bodemdalingsmodellering beschreven. De indeling van dit hoofdstuk is als volgt. Eerst worden de gebruikte compactiemodellen beschreven met hun invoerparameters in Paragraaf 5.2. De gebruikte compactiemodellen zijn het RTCM model in isotachenformulering, het gelineariseerde isotachenmodel en het Time-Decay model. Het gedrag van de modellen wordt kort beschreven in Paragraaf 5.3. Paragraaf 5.4 beschrijft de Red Flag methode, die is toegepast om verschillen tussen modeluitkomsten en metingen op peilmerken te analyseren. De berekende bodemdaling met het compactiemodel met best passende sets parameters volgens Red Flag wordt weergegeven samen met gemeten daling in Paragraaf 5.5. De bodemdalingsprognose voor 2050 op basis van het marktvraag scenario wordt gegeven in Paragraaf 5.6. De compactie voor de verschillende productiescenario's (beschreven in Hoofdstuk 3) wordt gegeven in Paragraaf 5.7.

### 5.1 Inleiding

In de standaard geomechanische ((semi-)analytische) modelleermethoden (Geertsma, 1973) wordt uitgegaan van een instantane vertaling van drukkaling door gasproductie naar reservoircompactie en bodemdaling aan het aardoppervlak. De vorm van de optredende bodemdaling wordt daarbij bepaald door de diepte en de uitgestrektheid van het gasreservoir, en door de elastische eigenschappen van het reservoir en van de lagen boven en onder het gasreservoir. Deze standaard methoden geven echter geen bevredigende passing voor de bodemdaling zoals gemeten boven Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier en Groningen (Muntendam-Bos et al., 2012). De uit de gemeten hoogten afgeleide daling bij de peilmerken laat in de beginfase van de productie een zekere vertraging zien van de bodemdaling ten opzichte van de drukkaling.

Dit gedrag werd aanvankelijk door de NAM gemodelleerd met een bilineair compactiemodel voor het reservoirgesteente (NAM, 2010). Dit model beschrijft echter geen doorgaande bodemdaling zoals geobserveerd bijvoorbeeld boven het Ameland veld. Sinds 2011 gebruikt de NAM het Time-Decay model voor de beschrijving van de vertraagde en doorgaande bodemdaling (NAM, 2011a,b). De basis van het Time-Decay model is een vertraging ten gevolge van drukdiffusie in het reservoir gesteente (Mossop, 2012).

Laboratorium experimenten tonen aan dat de compactie van reservoirgesteente afhangt van de belastingsnelheid (De Waal, 1986). Hoe sneller de belasting is, hoe stijver de initiële respons van het gesteente. Daarnaast wordt bij constant blijvende belasting doorgaande compactie waargenomen (kruip). Dit verschijnsel biedt een alternatieve verklaring voor het vertraagd op gang komen van de bodemdaling en de doorgaande bodemdaling na het stoppen van gasproductie. Bij aanvang van de gasproductie vindt een verandering van belastingsnelheid plaats van de geologische snelheid (het toenemende gewicht door afzetting van lagen boven het reservoir over lange tijd) naar de belastingsnelheid gegeven door de drukdepletie.

Het Rate Type Compaction Model is door De Waal (1986) ontwikkeld om dit gedrag te beschrijven, maar in zijn oorspronkelijke vorm is dit model beperkt tot het beschrijven van het gedrag bij een constante belastingsnelheid. Het model kan geen transitie beschrijven tussen twee verschillende belastingsnelheden (De Waal, 1986). Om het model toepasbaar te maken voor bodemdalingsstudies heeft TNO-AGE een aangepaste formulering van het Rate Type Compaction Model ontwikkeld gebaseerd op het isotachenconcept (Pruiksma et al., 2013). Isotachen zijn lijnen van constante belastingsnelheid in het spanning-rek diagram. Iedere belastingsnelheid heeft een unieke lijn die bereikt wordt na verloop van tijd bij belasting van een gesteentemonster met de snelheid behorende bij die lijn. Het isotachenconcept verenigt op een consistente manier het compactiegedrag bij veranderingen in belastingsnelheid met het compactiegedrag bij constant blijvende belasting (kruip). In feite worden deze twee verschijnselen met elkaar verbonden en is het gedrag bij wisselingen in belastingsnelheid een direct gevolg van het kruipgedrag. Dit isotachenconcept is afkomstig uit de geotechniek en heeft een ontwikkeling doorgemaakt van de eerste observaties van kruip in slappe klei lagen door Keveling Buisman (1936) tot en met de vorm van het model, die tegenwoordig wordt gebruikt (Den Haan, 1994). Het isotachenmodel wordt in de geotechniek met succes toegepast in bijvoorbeeld de berekening van zettingen (Den Haan, 2003).

In (Pruiksma et al., 2013) zijn vier compactiemodellen geanalyseerd, beschreven in een overkoepelende formulering van het isotachenconcept. Deze modellen zijn: 1) het oorspronkelijke isotachenmodel gebruikt in de geotechniek voor slappe grond, 2) een spannings-gelineariseerd isotachenmodel, 3) het Standard Linear Solid (SLS) model en 4) de isotachen formulering van het Rate Type Compactie Model (RTCM).

Van de vier modellen beschrijft het RTCM het beste de experimenten op zandsteen kernen uitgevoerd bij meerdere belastingsnelheden door De Waal (1986). Het gelineariseerde isotachenmodel geeft een redelijke beschrijving en kan soms de voorkeur hebben vanwege de numerieke stabiliteit. Het geotechnische isotachenmodel kan de experimenten op zandsteen niet goed beschrijven vanwege het verband tussen rek en de logaritme van spanning. Dit logaritmisch gedrag is geobserveerd in veen en slappe klei, maar experimenten op zandsteen kernen laten – althans binnen het bereik van de meetcondities – een lineair verband zien tussen rek en spanning voor de isotachen. Het SLS model (en de speciale versie daarvan, het Time-Decay model) beschrijven de laboratoriumexperimenten op zandsteen niet goed. Experimenten uitgevoerd door Dewers en Hajash (1995) laten zien dat kruip in zandsteen logaritmisch is in de tijd. Dit logaritmische gedrag is inherent aan het RTCM en het spannings-gelineariseerde isotachenmodel, maar het Time-Decay model kent een andere afhankelijkheid (Pruiksma et al., 2013).

Het is niet *a priori* te stellen dat het op labschaal geijkte RTCM model ook zonder meer op veldschaal geldig is. Er kunnen opschaaleffecten zijn en daarnaast kunnen andere processen bijdragen aan het geobserveerde vertraagd op gang komen van de bodemdaling en doorgaande bodemdaling. De analyse in (Pruiksma et al., 2013) is gebaseerd op experimenten op zandsteenkernen op laboratorium-schaal met variatie van een factor duizend in belastingsnelheid. Het RTCM beschrijft accuraat het gedrag op lab schaal. Echter, de laagste belastingsnelheid in het lab (0,62 bar/uur) in de experimenten van De Waal (1986) is ongeveer duizend keer hoger dan de drukdepletiesnelheid onder veldcondities (circa 5 bar/jaar) en vele ordes van grootte sneller dan de geologische belastingsnelheden. Het is onbekend of de

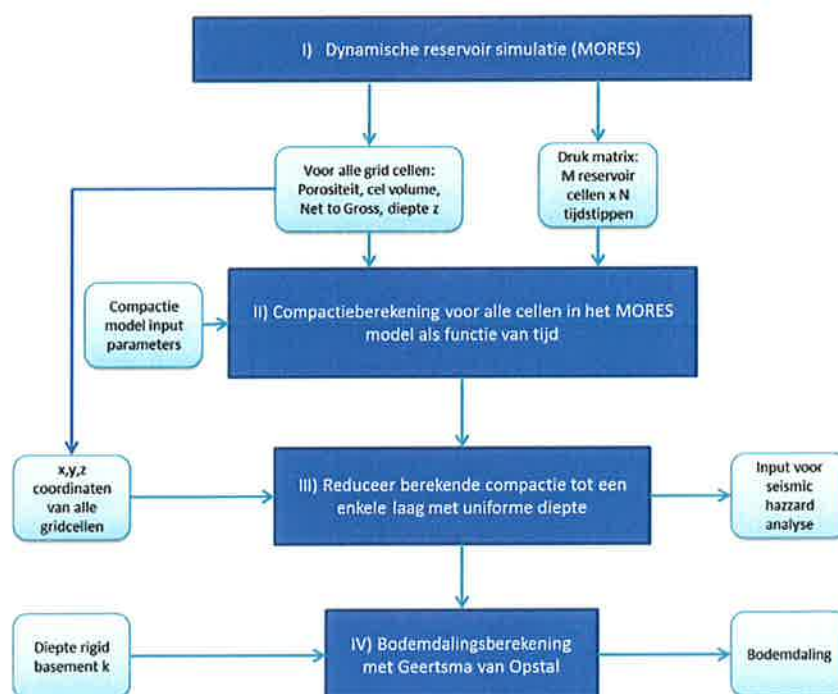


geobserveerde trend onder lab condities geëxtrapeerd mag worden naar veldschaal.

In dit rapport worden hierna drie modellen beschouwd: het RTCM model in isotachenformulering, het gelineariseerde isotachenmodel en het Time-Decay model. De modellen worden kort beschreven in Paragraaf 5.2. Voor details wordt verwezen naar (Pruiksma et al., 2013).

### 5.1.1 Geomechanisch modelinstrumentarium

Compactiemodellering vormt een deel van het modelinstrumentarium voor de berekening van de bodemdaling. Figuur 5.1 toont alle delen van dit modelinstrumentarium in donkerblauw, met in lichtblauw de invoer en uitvoer, zowel voor de bodemdaling als voor de seismische hazard analyse (Hoofdstuk 7).



Figuur 5.1 Geomechanisch modelinstrumentarium, met in lichtblauw de invoer en uitvoer.

Het modelinstrumentarium bestaat uit 4 modules:

- 1) Dynamische reservoir simulatie voor de bepaling van de drukverdeling in het reservoir in ruimte en tijd ten gevolge van de gasproductie;
- 2) Berekening van de compactie ten gevolge van de daling van de gasdruk als functie van tijd in iedere gridcel van het reservoir model.
- 3) Een opschaling van de compactie waarbij voor iedere verticale kolom in het reservoir de cumulatieve compactie wordt berekend als functie van tijd, door sommatie van de resultaten uit module 2. Tevens wordt een gemiddelde diepte bepaald van het reservoir gebruikt in module 3.
- 4) De bodemdaling als respons op de compactie van het reservoirgesteente met het model van Van Opstal (1974).

Het dynamisch reservoir model (module 1) is beschreven in Hoofdstuk 3. De verdeling van de reservoirdruk in ruimte en tijd is daar berekend met een model, dat is gekalibreerd aan de gemeten gasproductie en drukken in putten. Zie Paragraaf 3.1.4 voor meer informatie over deze kalibratieprocedure.

De output van dit door NAM gekalibreerde reservoirmodel is gebruikt als input voor de volgende modules in de berekening voor de kalibratie van de compactiemodellen aan de bodemdaling tot eind 2011. Voor de prognose van toekomstige bodemdaling en compactie zijn varianten voor verschillende productiescenario's doorgerekend met als startpunt het door NAM gekalibreerde reservoirmodel, zie Paragraaf 3.3.

In module 2 vindt de feitelijke compactieberekening plaats voor alle gridcellen in het reservoirmodel. Module 2 bevat alle drie hierboven genoemde compactiemodellen: het Time-Decay model, het gelineariseerde isotachenmodel en het Rate Type Compaction Model in isotachen formulering. Module 2 bevat een switch voor het te gebruiken model, samen met de benodigde parameters voor dat model. De gasdrukdepletie in iedere gridcel als functie van de tijd is bekend uit module 1 en dient als invoer voor het compactiemodel, samen met de porositeit, gridcel volume, volume netto-bruto verhouding en de diepte van de gridcel. Deze diepte wordt alleen gebruikt in het RTCM voor het bepalen van de initiële spanningstoestand. De compactiemodellen en hun parameters worden kort beschreven in Paragraaf 5.2.

In module 3 vindt een opschaling plaats. Hierbij wordt de totale compactie in iedere verticale kolom van het reservoirmodel berekend op basis van de compactie uit module 2 en de gegevens van het grid (x, y, z coördinaten van de cellen). Dit is nodig om het rekenproces te versnellen. In plaats van 246128 gridcellen in het hele model bevat het gereduceerde grid slechts 9070 kolommen (x,y punten). Hiermee kan de bodemdalingsberekening sneller uitgevoerd worden, terwijl dit dezelfde resultaten geeft. Het volledige model had 50 uur rekentijd nodig en het gereduceerde model slechts 2 seconden. De totale compactie in de reservoirkolommen wordt uitgevoerd en dient als input voor de seismische hazard analyse.

In module 4 wordt de bodemdaling berekend op basis van de opgeschaalde compactie volgend uit module 3. Voor de berekening is gebruik gemaakt van de methode beschreven in (Geertsma, 1973; Van Opstal, 1974). Deze methode is eerder toegepast voor de berekening van de bodemdaling voor de Waddenzee gaswinning (Muntendam-Bos et al., 2012).

#### 5.1.2 *Gevolgde aanpak voor de kalibratie met gemeten bodemdaling, bodemdalingsprognose en input voor de seismische hazard analyse*

Het hierboven beschreven modelinstrumentarium is gebruikt voor de kalibratie van de compactiemodellen aan de gemeten bodemdaling. De compactiemodellen en input parameters zijn gevarieerd en daarmee is de bodemdaling ter plaatse van de peilmerken berekend. Deze bodemdaling is vergeleken met de gemeten daling uit de door NAM aangeleverde differentiestaat. Bij dit vergelijk zijn alleen de stabiele punten meegenomen uit de analyse bij het 99% betrouwbaarheidsinterval (Hoofdstuk 4). Met de methode "Red Flag" (Nepveu et al., 2010) is bij ieder van de drie compactiemodellen bepaald voor welke set parameters de berekende

bodemdaling het best (uitgedrukt in een waarschijnlijkheid) overeenkomt met de gemeten bodemdaling. Vervolgens zijn met de Red Flag methode de drie compactiemodellen onderling vergeleken met hun set beste invoerparameters.

Uit de Red Flag analyse volgde dat het Rate Type Compactie Model de gemeten bodemdaling het beste beschrijft. Met dit model is vervolgens de prognose voor de bodemdaling in 2025 en 2050 gemaakt.

Voor alle drie de compactiemodellen is de totale compactie in de tijd bepaald voor de diverse productiescenario's. Deze compactie dient als invoer voor de seismic hazard analyse. Verschillen en overeenkomsten tussen de modellen worden beschreven.

## 5.2 Constitutieve modellen voor compactie

Drie modellen zijn gebruikt in dit rapport: 1) het Time-Decay model, 2) Het RTCM model in isotachen formulering en 3) het gelineariseerde isotachenmodel. In Pruiksmā et al. (2013) is afgeleid dat deze modellen allen beschreven kunnen worden in een overkoepelende formulering volgens het isotachenconcept. Deze formulering bestaat uit drie vergelijkingen. De eerste beschrijft een instantane vervorming, gegeven door de directe rek  $\varepsilon_d$  (ook wel elastische rek genoemd) die een functie is van alleen de verticale effectieve spanning  $\sigma'$ :

$$\varepsilon_d = f(\sigma') \quad (1)$$

De tweede vergelijking is een uitdrukking voor de seculiere reksnelheid,  $\dot{\varepsilon}_s$  (ook wel kruptrek genoemd) die een functie is van de effectieve spanning en de totale rek  $\varepsilon$ :

$$\dot{\varepsilon}_s = g(\sigma', \varepsilon) \quad (2)$$

De derde vergelijking is de totale rek die een som is van de directe en seculiere rek:

$$\varepsilon = \varepsilon_d + \varepsilon_s \quad (3)$$

De specifieke functies  $f$  en  $g$  beschrijven het materiaalgedrag. In reservoir depletie volgt de effectieve spanning  $\sigma'(t)$  uit de gasdruk uit de dynamische reservoirberekeningen en de in situ beginspanning, en is bekend. Dan is de directe rek  $\varepsilon_d$  bekend. Bij begin van depletie worden de rekken nul gesteld; dan is op dat tijdstip de seculiere reksnelheid,  $\dot{\varepsilon}_s$  bekend uit de functie  $g$ . Door tijdsintegratie over een korte tijd volgt de rek  $\varepsilon_s$  en de totale rek  $\varepsilon$ . Met  $g$  en de bekende spanning op dat moment volgt dan weer de seculiere reksnelheid en zo verder.

Uit  $\dot{\varepsilon}_s = g(\sigma', \varepsilon)$  kan men afleiden of dat er bepaalde combinaties van  $\sigma', \varepsilon$  bestaan waarvoor de seculiere reksnelheid constant is. Deze combinaties zijn voor de beschouwde modellen rechte lijnen in het  $\sigma', \varepsilon$  diagram. Deze lijnen worden isotachen genoemd. Hieronder worden de modellen kort beschreven. Voor meer details wordt verwezen naar Pruiksmā et al. (2013).

### 5.2.1 Time-Decay model

Het Time-Decay model wordt door NAM gegeven als een tijdsconvolutie ( $*_t$ )

$$\varepsilon(t) = c_m \Delta P(t) *_t \frac{e^{-t/\tau}}{\tau}$$

met  $\varepsilon$  de rek,  $c_m$  de compactiecoëfficiënt,  $\Delta P(t)$  de drukdepletie als functie van tijd en  $\tau$  een tijdsconstante. In het model zijn  $c_m$  en  $\Delta P(t)$  en daarmee  $\varepsilon(t)$  per reservoir gridcel verschillend. De tijdsconstante  $\tau$  is een vaste parameter voor het hele reservoir.

Dit model is mathematisch equivalent met een (rheologisch) parallel veer-demper model. Zo'n veer-demper model heeft de volgende vergelijking

$$\dot{\varepsilon} = \frac{c_m}{\tau} (\sigma' - \sigma'_{ref}) - \frac{\varepsilon}{\tau} = g(\sigma', \varepsilon)$$

waarmee de  $g$  functie vastligt. Het Time-Decay model heeft geen instantane component en de functie  $f = 0$ . Daarom geldt  $\varepsilon = \varepsilon_s$ . Als  $\dot{\varepsilon}$  constant genomen wordt, dan volgt een lineair verband tussen  $\sigma'$  en  $\varepsilon$ . De isotachen zijn dus rechte lijnen met helling  $c_m$ .

### 5.2.2 Het spannings-gelineariseerde isotachenmodel

Het oorspronkelijke isotachenmodel ontwikkeld voor slappe klei in de geotechniek heeft een logaritmische spanning rek relatie. Om een betere beschrijving van het gedrag van zandsteen op laboratoriumschaal te krijgen, dat een lineair verband laat zien tussen spanning en rek (De Waal, 1986), is een nieuw isotachenmodel ontwikkeld waarbij de spanningsafhankelijke term in het oorspronkelijke isotachenmodel gelineariseerd is. Dit model heeft de volgende specifieke  $f$  en  $g$  functies:

$$\varepsilon_d = f(\sigma') = c_{m,a}(\sigma' - \sigma'_{ref})$$

$$\dot{\varepsilon}_s = g(\sigma', \varepsilon_s) = \dot{\varepsilon}_{s,ref} e^{-\frac{\varepsilon - c_m(\sigma' - \sigma'_{ref})}{c}}$$

Hier is  $\sigma'_{ref}$  een referentie spanning (de in situ effectieve spanning voor gasdepletie in de desbetreffende reservoircel) en  $c_{m,a}$  de instantane compactiecoëfficiënt. In de onderste vergelijking is  $c_m$  de totale compactiecoëfficiënt, bestaande uit  $c_m = c_{m,a} + c_{m,b}$  met  $c_{m,b}$  de compactiecoëfficiënt voor het kruip deel.  $\dot{\varepsilon}_{s,ref}$  is de referentie kruipsnelheid, de geologische kruipsnelheid en  $c$  de dimensieloze kruip parameter.

Voor constante seculiere reksnelheid  $\dot{\varepsilon}_s$  is  $\varepsilon - c_m(\sigma' - \sigma'_{ref})$  constant en de isotachen zijn rechte lijnen in het  $\sigma', \varepsilon$  diagram met helling  $c_m$ .

### 5.2.3 Het Rate Type Compactie Model in isotachen formulering

De isotachen formulering van het Rate Type Compactie Model (RTCM) is een aanpassing van het oorspronkelijke RTCM model van De Waal (1986). In het vervolg van dit rapport wordt met het RTCM deze aangepaste vorm bedoeld. Deze aanpassing bestaat uit het toevoegen van een directe rek term  $\varepsilon_d = f(\sigma')$  die in het oorspronkelijk model niet meegenomen wordt, daar is  $\varepsilon_d = 0$ . Daarnaast is met het isotachen concept een exacte oplossing van de RTCM differentiaalvergelijking (De Waal, 1986) gevonden (Pruiksma et al., 2013) die de met de belastingsnelheid variërende compactiecoëfficiënt exact meeneemt. Daarin is ook de empirische relatie tussen de isotachen exact verwerkt. De vergelijkingen voor het RTCM isotachenmodel zijn:

$$\varepsilon_d = f(\sigma') = c_{m,a}(\sigma' - \sigma'_{ref})$$

$$\dot{\varepsilon}_s = g(\sigma', \varepsilon_s) = \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\sigma'} - c_{m,a} \right) \dot{\sigma}'_{ref} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\sigma' c_{m,ref}} \right)^{-1/b}, \text{ met } \varepsilon_0 = -c_{m,ref} \sigma'_{ref}$$

Zoals bij het gelineariseerde isotachenmodel is  $\sigma'_{ref}$  een referentie spanning (de in situ effectieve spanning voor gasdepletie in de desbetreffende reservoircel) en  $c_{m,a}$  de instantane compactiecoëfficiënt. De referentiebelastingsnelheid is  $\dot{\sigma}'_{ref}$ , dit is de geologische belastingsnelheid gebruikt in de berekening voor gasdepletie in het veld.  $c_{m,ref}$  is de referentie compactiecoëfficiënt behorend bij de geologische belastingsnelheid.  $b$  is de dimensieloze Rate parameter die de mate van uitwaaiing van de isotachen bepaalt.

Voor constante seculiere reksnelheid  $\dot{\varepsilon}_s$  is  $\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\sigma'}$  constant en de isotachen zijn rechte lijnen in het  $\sigma', \varepsilon$  diagram met helling  $c_m = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\sigma'}$ . Deze helling varieert als de seculiere reksnelheid varieert, maar alle lijnen komen samen in het punt bij spanning nul en rek  $\varepsilon_0 = -c_{m,ref} \sigma'_{ref}$ . Voor een voorbeeld van het spanning-rek diagram van het RTCM model zie Figuur 5.3.

## 5.3 Invoerparameters en gedrag van de compactiemodellen

### 5.3.1 Invoerparameters

De invoerparameters van de compactiemodellen kunnen ingedeeld worden in toestandsparameters en materiaalparameters. De toestandsparameters zijn weergegeven in Tabel 5.1. Hierna wordt besproken in welke mate de parameters vrij te variëren zijn en in welke mate ze bepaald zijn door beschikbare informatie uit het veld (m.n. toestandsparameters) of laboratorium (materiaaleigenschappen).

Tabel 5.1 Toestandsparameters gebruikt in de modellen.

Model	Model parameters	Vrije parameters
Gelineariseerd isotachenmodel	$\sigma'_{ref}, \dot{\varepsilon}_{s,ref}$	$\dot{\varepsilon}_{s,ref}$
Time-Decay model	$\sigma'_{ref}$	-
Rate Type Compactie Model	$\dot{\sigma}'_{ref}, \sigma'_{ref}$	$\dot{\sigma}'_{ref}$

Ieder model heeft een referentiespanning  $\sigma'_{ref}$ . Dit is de in situ spanning in een grid cel voorafgaand aan gasdepletie. In het gelineariseerde isotachenmodel en het Time-Decay model komt de referentiespanning alleen voor in de term  $\sigma' - \sigma'_{ref}$ . Omdat  $\sigma' - \sigma'_{ref} = \Delta P$  (voor een Biot-factor gelijk aan 1) met  $\Delta P$  de gasdrukdepletie, hoeft  $\sigma'_{ref}$  niet als invoerparameter meegenomen te worden.

Voor het RTCM model moet de referentiespanning  $\sigma'_{ref}$  expliciet gegeven worden omdat de afstand tussen de isotachen afhangt van de absolute waarde van de effectieve spanning. De referentiespanning  $\sigma'_{ref}$  is hier de in situ verticale effectieve spanning voorafgaand aan de gasproductie. Voor het RTCM model is de totale verticale spanning  $\sigma$  berekend met  $\sigma = 0,21$  (bar/m)\*diepte van de reservoir gridcel (m) (NAM 2013b,d). Van deze waarde wordt de initiële gasdruk uit het MORES model afgetrokken om de effectieve referentiespanning  $\sigma'_{ref}$  te bepalen.

De materiaalparameters voor ieder model zijn weergegeven in Tabel 5.2. Het gelineariseerde isotachenmodel en het RTCM hebben 3 materiaalparameters en het Time-Decay model heeft twee materiaalparameters.

Tabel 5.2 Materiaal parameters gebruikt in de modellen.

Model	Materiaal parameters
Gelineariseerd isotachenmodel	$c_{m,a}$ , $c_{m,b}$ , $C$
Time-Decay model	$c_m$ , $\tau$
Rate type Compactie model	$c_{m,a}$ , $c_{m,ref}$ , $b$

Voor het RTCM wordt  $b = 0,017$  gebruikt, de laboratorium waarde voor de Groningen kernmonsters (De Waal, 1986). De materiaalparameter  $b$  is niet gevarieerd in de Red Flag procedure.

In laboratoriumproeven op zandsteen kernen is de compactiecoëfficiënt bepaald. Dit is  $c_m$  in het Time-Decay model,  $c_{m,a} + c_{m,b}$  in het gelineariseerde isotachenmodel danwel  $c_{m,lab}$  in het RTCM model (deze wordt met RTCM vergelijking 34 in Pruikma et al. (2013) omgerekend naar  $c_{m,ref}$  de feitelijke input voor het RTCM model). In Paragraaf 5.4.2 wordt een relatie afgeleid voor de compactiecoëfficiënt als functie van de porositeit op basis van proeven op zandsteenkernen. Onder veldcondities is er een effect van korrelcompressibiliteit die over het algemeen in rekening wordt gebracht met een Biot coëfficiënt op de drukdepletie (Geertsma, 1973). Dit reduceert effectief de compactiecoëfficiënt. Ook is er een bepaalde onzekerheid in de afgeleide compactiecoëfficiënt-porositeit functie (zie Paragraaf 5.4.1). Vanwege deze twee effecten is gekozen om wel de vorm van de uit labmetingen bepaalde compactiecoëfficiënt-porositeit functie te hanteren als input, maar deze te vermenigvuldigen met een (niet van tijd of plaats afhankelijke) factor  $\alpha_{cm}$  die vrij gevarieerd wordt in Red Flag.

Voor het Time-Decay model worden in Red Flag twee parameters gevarieerd: de tijdsconstante  $\tau$  en de vermenigvuldigingsfactor  $\alpha_{cm}$  op de compactiecoëfficiënt-porositeit functie.

Voor het RTCM model worden in totaal drie parameters gevarieerd: de toestandsparameter  $\sigma'_{ref}$ , de vermenigvuldigingsfactor  $\alpha_{cm}$  op de compactiecoëfficiënt-

porositeit functie en de instantane elastische compactiecoëfficiënt  $c_{m,a}$ . Deze laatste wordt opgegeven als een fractie  $\frac{c_{m,a}}{c_{m,ref}}$  die constant wordt genomen voor het hele veld. Noodzakelijkerwijs moet deze fractie tussen de nul en één liggen: als  $\frac{c_{m,a}}{c_{m,ref}} = 0$  dan is er geen elastische intantane respons en als  $\frac{c_{m,a}}{c_{m,ref}} = 1$ , dan is er geen kruip aandeel meer en is de gehele respons elastisch. Dit is effectief een lineair elastisch compactiemodel.

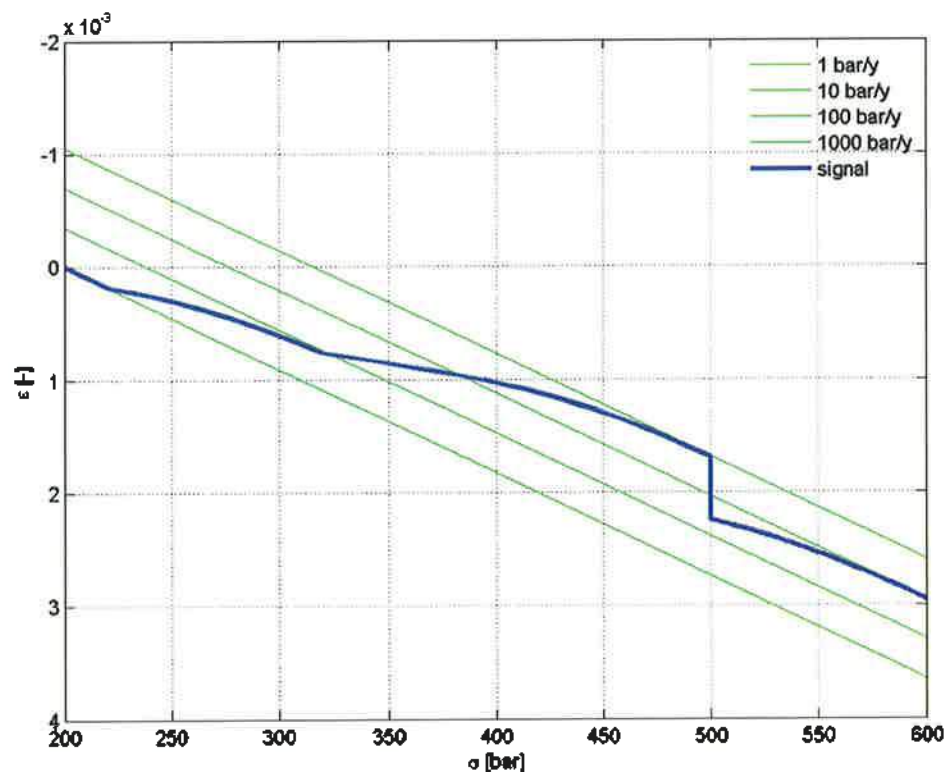
Voor het gelineariseerde isotachenmodel is geen Red Flag analyse uitgevoerd. In Pruiksmā et al. (2013) is een omrekenformule voor materiaalparameters van het RTCM naar het lineair isotachenmodel gegeven. Deze formule wordt gebruikt om de beste set parameters volgend uit Red Flag voor het RTCM om te rekenen naar invoerparameters voor het lineaire isotachenmodel.

### 5.3.2 Gedrag van de compactiemodellen

In deze paragraaf worden de drie compactiemodellen met elkaar vergeleken. Hierbij wordt aandacht geschonken aan het spanning-rek gedrag van de modellen en aan het kruipgedrag.

#### 5.3.2.1 Spanning-rek relaties van de compactiemodellen

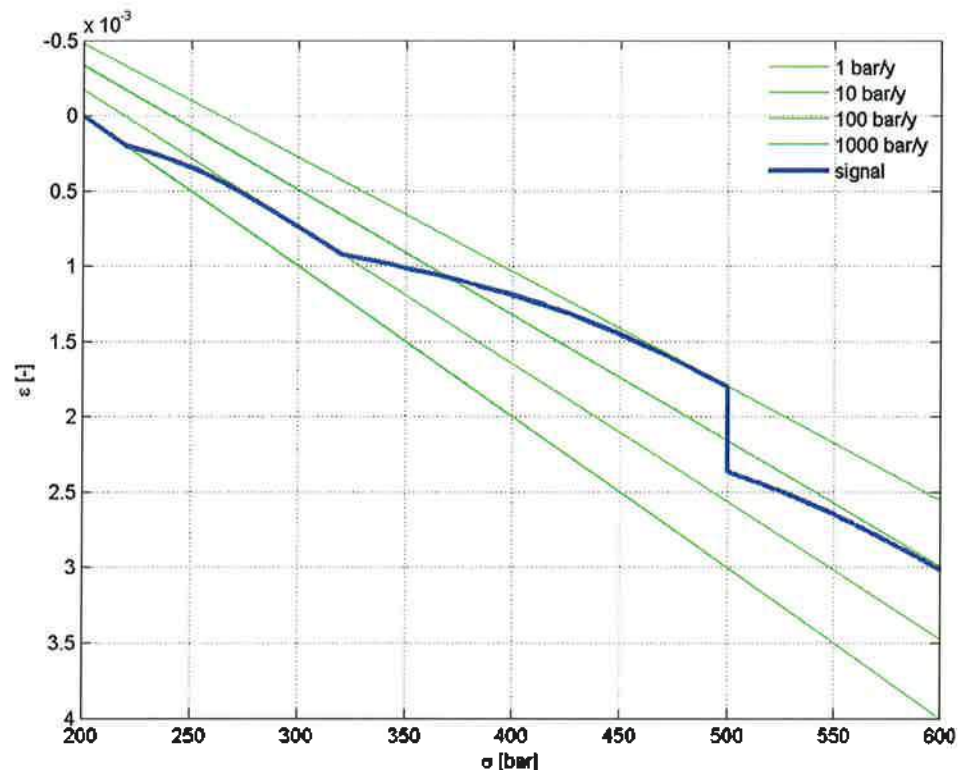
Het gedrag van de compactiemodellen is weergegeven in spanning-rek diagrammen (Figuur 5.2 t/m Figuur 5.4). Figuur 5.2 geeft een voorbeeld van een berekening met het gelineariseerde isotachenmodel. De belasting is tussen 200 en



Figuur 5.2 Voorbeeld van een berekening met het gelineariseerde isotachenmodel. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingnelheid 1000 bar/jaar en de onderste lijn 1 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting.

220 bar 1 bar/jaar en verandert daarna tot 320 bar in 10 bar/jaar en dan tot 500 bar naar 1000 bar/jaar. Bij 500 bar vindt een periode van 1 jaar lang kruip plaats, waarna met 100 bar/jaar doorbelast wordt tot 600 bar.

Te zien is dat de isotachen (de groene lijnen) parallel lopen en dat voor iedere factor 10 verhoging van de belasting snelheid eenzelfde verschil in rek is tussen de isotachen. Bij iedere wisseling van belastingsnelheid wordt naar verloop van tijd de corresponderende isotach bereikt. Het gedrag bij hogere belastingsnelheid is stijver, bij gelijke spanning hebben deze isotachen een lagere rek. Het kruipproces bij 500 bar laat zien dat de rek toeneemt bij gelijkblijvende spanning. Na één jaar kruip wordt doorbelast met 100 bar/jaar en uiteindelijk wordt de corresponderende isotach weer bereikt.



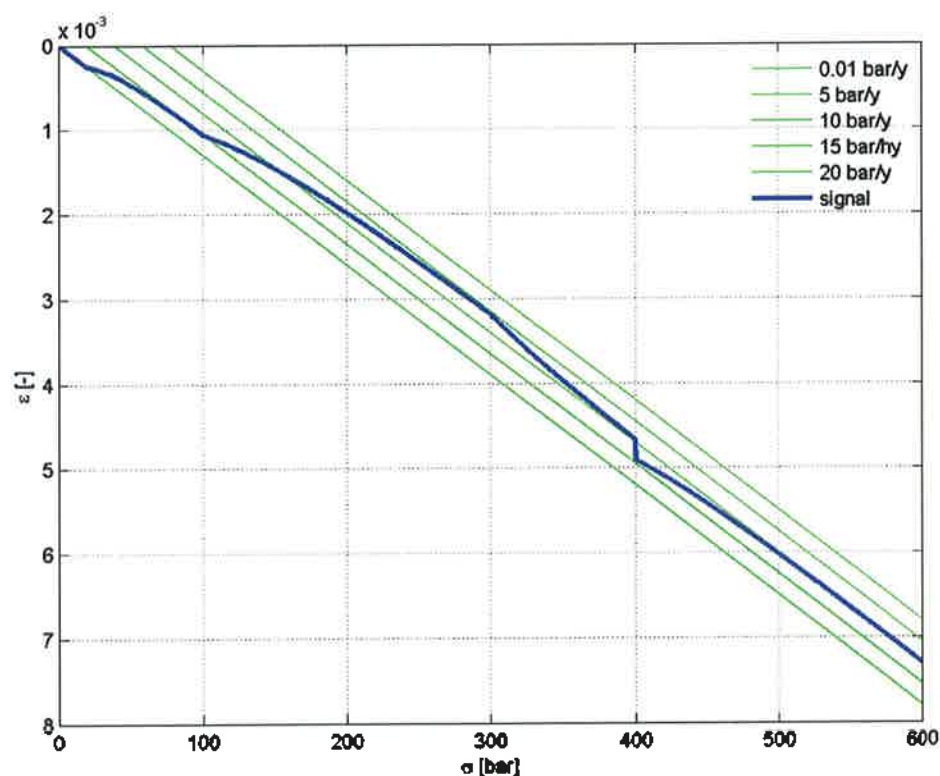
Figuur 5.3 Voorbeeld van een berekening met het RTCM model. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingsnelheid 1000 bar/jaar en de onderste lijn 1 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting. Deze belasting is tussen 200 en 220 bar 1 bar/jaar, en dan tot 320 bar 10 bar/jaar en dan tot 500 bar 1000 bar/jaar. Bij 500 bar vindt een periode van 1 jaar lang kruip plaats, waarna met 100 bar/jaar doorbelast wordt tot 600 bar.

Figuur 5.3 geeft een voorbeeld van een berekening met het RTCM model, gebruikmakend van hetzelfde belastingsignaal als in Figuur 5.2. Te zien is dat de isotachen (de groene lijnen) niet parallel lopen, maar divergeren. De isotachen komen samen bij een spanning nul (niet weergegeven), hetgeen een direct gevolg is van de empirische relatie voor isotachen gevonden door De Waal (1986) die gebruikt werd als fundamentele aanname voor de ontwikkeling van het RTCM isotachenmodel. Voor iedere factor 10 verhoging van de belastingsnelheid is eenzelfde verschil in spanning tussen de isotachen (bij dezelfde rek). Dit is een direct gevolg van de empirische relatie (vergelijking 6.1 in De Waal 1986) die als



expliciete aanname in het RTCM model is verwerkt. Toch verschilt, bij gelijk-blijvende spanning, de afstand in rek niet veel, waardoor het gedrag van het RTCM model en het gelineariseerde isotachenmodel sterk op elkaar lijken. Het is met name het divergeren van de isotachen dat verschillen oplevert. Aangezien de helling toeneemt bij afnemende belastingsnelheid is er in het algemeen een hogere kruipsnelheid in het RTCM dan in het gelineariseerde isotachenmodel.

Figuur 5.4 geeft een voorbeeld van een berekening met het Time-Decay model, met een ander belastingsignaal dan gebruikt voor het RTCM en gelineariseerde isotachenmodel. Deze belasting is tussen 0 en 20 bar 5 bar/jaar, en dan tot 100 bar 10 bar/jaar en dan tot 300 bar 20 bar/jaar. Dan wordt de snelheid verlaagd naar 10 bar/jaar tot 400 bar, waarna een periode van 3 jaar lang kruip plaatsvindt. Daarna wordt doorbelast met 10 bar/jaar tot 600 bar. Dit andere belastingsignaal is gekozen voor betere illustratie van het gedrag van het Time-Decay model. Te zien is dat de isotachen (de groene lijnen) parallel lopen. De verticale afstand tussen de isotachen is gelijk voor eenzelfde verschil in belastingsnelheid. Dit, in tegenstelling tot het logaritmisch verband in het gelineariseerde isotachenmodel, waar voor iedere factor 10 in belastingsnelheid eenzelfde afstand tussen de isotachen bestaat. Het Time-Decay model heeft een inherent ander kruipgedrag dan de andere twee modellen (zie Paragraaf 5.3.2.2).



Figuur 5.4 Voorbeeld van een berekening met het Time-Decay model. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingsnelheid 20 bar/jaar en de onderste lijn 0,01 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting.

### 5.3.2.2 *Kruipgedrag van de compactiemodellen*

Kruip is gedefinieerd als de doorgaande vervorming in de tijd onder constant blijvende belasting ( $\dot{\sigma}' = 0$ ). Het is duidelijk dat de directe rek  $\varepsilon_d$  niet toeneemt omdat deze alleen een functie is van de spanning,  $\varepsilon_d = f(\sigma')$ , en de spanning blijft constant. Dus alleen de vergelijking voor de seculiere rek draagt bij aan de totale rek. De analytische oplossing van de seculiere rek vergelijking bij constant blijvende effectieve spanning voor het gelineariseerde isotachenmodel heeft de vorm

$$\varepsilon_s - \varepsilon_{s,0} = c_1 \ln(1 + c_2 t)$$

waarin  $c_1$  en  $c_2$  constanten zijn die volgen uit de grootheden in de vergelijkingen (voor invoerparameters en spanning, zie Pruiksmā et al., 2013). Deze vorm is identiek aan de experimenteel geobserveerde kruiprek als functie van de tijd voor zandsteen (Dewers et al., 1995).

Voor het Time-Decay model heeft de seculiere rek tijdens kruip de vorm:

$$\varepsilon_s = c_1 - c_2 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Deze verschilt sterk van de experimenteel door Dewers et al. (1995) geobserveerde vorm. Er is een limiet aan de kruiprek. Deze is  $c_1$  en wordt benaderd na een tijd die een paar keer de tijdsconstante  $\tau$  is.

De seculiere rek vergelijking van het RTCM model is niet eenvoudig te integreren over de tijd. Als de benadering gemaakt wordt dat  $c_m$  constant is in de RTCM differentiaalvergelijking, dan kan de vergelijking analytisch opgelost worden (zie Paragraaf 7.3.3 van De Waal (1986)). De vorm van deze kruiprek is dan:

$$\varepsilon_s - \varepsilon_{s,0} = c_1 \ln(1 + c_2 t) ,$$

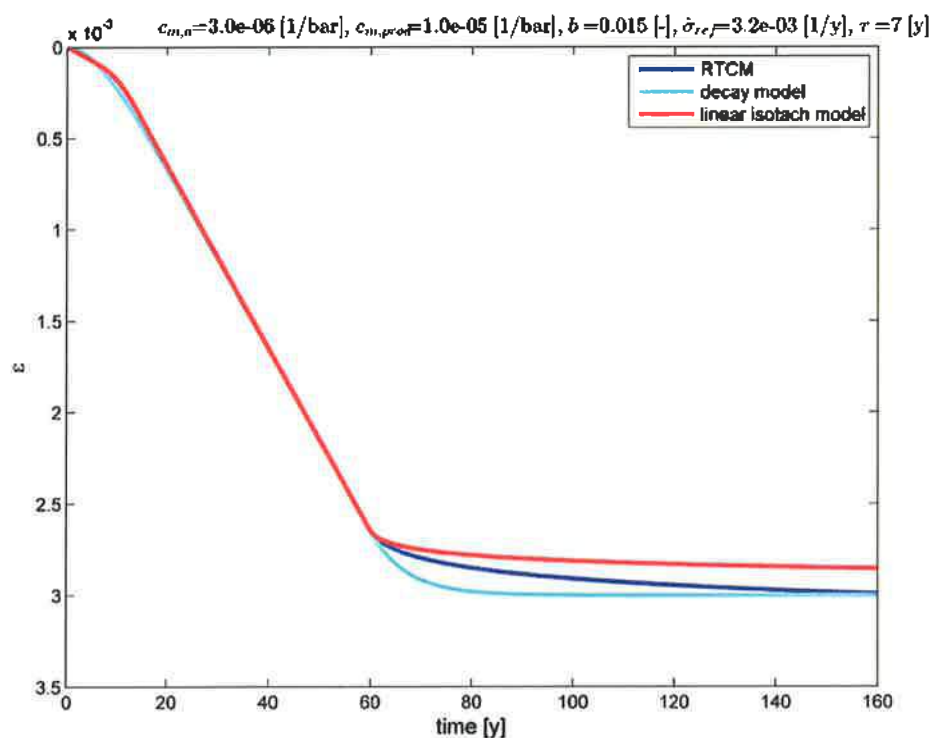
identiek aan die van het lineaire isotachenmodel en de experimenten van Dewers et al. (1995). De constanten zijn  $c_1 = bc_m \sigma'_{0}$  en  $c_2 = \frac{\dot{\varepsilon}_{s,0}}{bc_m \sigma'_{0}}$  waarbij  $\sigma'_{0}$  de effectieve spanning is tijdens kruip en  $\dot{\varepsilon}_{s,0}$  de seculiere reksnelheid bij de aanvang van kruip. De compactiecoëfficiënt is echter niet constant in het RTCM model en is ongeveer een factor 1,25 hoger bij geologische belastingsnelheid ten opzichte van de waarde tijdens productie (zie Pruiksmā et al., 2013). Tijdens het kruipproces stijgt  $c_m$  geleidelijk omdat isotachen behorend bij een lagere belastingsnelheid bereikt worden. Differentiatie van bovenstaande uitdrukking voor de kruiprek naar de tijd laat zien dat voor stijgende  $c_m$  de seculiere reksnelheid minder snel afneemt in de tijd dan in het geval van een constante  $c_m$  zoals in het lineaire isotachenmodel. Hierdoor resulteert het RTCM model in een hogere kruipsnelheid na verloop van tijd in vergelijking met het lineair isotachenmodel.

### 5.3.2.3 *Vergelijk van de compactiemodellen voor een constante productiesnelheid en kruip*

Aangezien de isotachen voor alle drie compactiemodellen rechte lijnen zijn, is het mogelijk om de modellen met elkaar te laten overeenstemmen bij één belastingsnelheid, door de isotach van die belastingsnelheid in de modellen identiek te maken. Hieruit volgt een wiskundige relatie tussen de parameters van de

modellen (zie Pruiksmas et al., 2013). In Figuur 5.5 zijn de modellen bij een productiesnelheid van 5 bar per jaar op elkaar afgestemd. Het opgelegde belastingsignaal heeft vanaf tijdstip nul een snelheid van 5 bar/jaar gedurende 60 jaar, daarna wordt de belasting constant gehouden en vindt kruip plaats. Te zien is dat de modellen vanaf het begin na verloop van tijd (ongeveer 20 jaar) op dezelfde deformatiesnelheid uitkomen. Er is een verschil in het begin tussen het Time-Decay model en de andere modellen. Omdat het Time-Decay geen elastische respons heeft is de helling aan het begin nul, terwijl in het RTCM model en het gelineariseerde isotachenmodel de helling aan het begin niet nul is door de aanwezigheid van een directe instantane rek component. Het RTCM model en gelineariseerde isotachenmodel hebben in de figuur dezelfde beginhelling. Tot het moment van kruip op tijdstip 60 jaar zijn de modellen identiek.

Vanaf 60 jaar worden de verschillen in modellen zichtbaar. Het Time-Decay model heeft hier een tijdsconstante van 7 jaar, en het duurt daarom circa 7 jaar na het inzetten van het kruip proces dat het model daarop begint te reageren. Het RTCM en gelineariseerde isotachenmodel reageren instantaan op de stop van productie door aanwezigheid van de directe rekcomponent. Als de belasting constant blijft, neemt de directe rek niet meer toe, dit is direct zichtbaar als een knik in de figuur op 60 jaar. Aan het begin van het kruip proces hebben het RTCM model en gelineariseerde isotachenmodel hetzelfde verloop, maar na enige tijd is zichtbaar dat het RTCM model een grotere kruipsnelheid heeft, zoals in de vorige paragraaf besproken. Na een periode van een aantal keren de tijdsconstante, laat het Time-



Figuur 5.5 Simulatie met het RTCM model, gelineariseerde isotachenmodel en Time-Decay model voor een constante productiesnelheid van 5 bar/jaar en constant blijvende belasting vanaf 60 jaar (kruip). Modelparameters zijn in elkaar omgerekend voor de 5 bar/jaar isotach met de methode beschreven in Pruiksmas et al. (2013).

Decay model geen compactie meer zien (zie ook kruip formule in vorige paragraaf), terwijl de compactie van het RTCM model en lineaire isotachenmodel doorgaan. De helling wordt wel steeds kleiner in de tijd (zie logaritmische kruip formule in vorige paragraaf).

#### 5.4 Berekening van de compactie en bodemdaling

Voor de RTCM- en Time-Decay compactiemodellen zijn de beschreven input parameters gevarieerd en de resulterende bodemdaling is vergeleken met de gemeten bodemdaling door gebruik van de methode Red Flag. Voor elk van de compactiemodellen volgt daaruit een set invoerparameters die het best past bij de gemeten daling. Deze parameters zijn uiteindelijk gebruikt voor de bodemdalingsprognose en de prognose van compactie benodigd voor de seismische hazard analyse.

##### 5.4.1 Red Flag methode en onzekerheid in metingen differentiestaat

De Red Flag methode (Nepveu et al., 2010) is een statistische methode ontwikkeld om een groot aantal uitkomsten van modelberekeningen ('scenario's') te confronteren met data en die scenario's te bepalen die de data het beste (d.w.z. met de hoogste waarschijnlijkheid) beschrijven. De methode is gebaseerd op Bayesiaanse waarschijnlijkheidsrekening. In de Red Flag methode wordt de volledige geschiedenis van de bodemdaling meegenomen voor alle beschikbare peilmerken in termen van differenties tussen de verschillende campagnes. De compactiemodellen worden beoordeeld op hun fit over de gehele periode. Hierbij is een standaardafwijking meegenomen op de bodemdalingsmetingen die in de tijd toeneemt.

In de geodetische berekeningen van peilmerkmetingen, zoals bijvoorbeeld met het pakket MOVE, wordt de beweging van de peilmerken ten opzichte van een referentiepeilmerk bepaald. Uit deze berekening volgt ook een variantie-covariantie matrix en de standaard deviatie van de bodemdalingsmeting. Hierbij wordt echter geen rekening gehouden met de historische daling van het referentiepeilmerk. Idealiter zouden in de geomechanische analyse de variantie-covariantie matrix en de standaard deviaties, gecorrigeerd voor de historische daling van het referentiepeilmerk, voor de peilmerkonzekerheden moeten worden meegenomen. Voor de hier gepresenteerde geomechanische analyse is de differentiestaat met peilmerkbewegingen door NAM beschikbaar gesteld. Hierbij is geen informatie beschikbaar gekomen over de uit MOVE verkregen standaard deviaties, noch een volledige variantie-covariantie matrix. In de TNO-AGE analyse voor Ameland (Muntendam-Bos et al., 2012) is voor de onzekerheid van de peilmerkdaling uitgegaan van een combinatie van een aanname voor de standaardafwijking van het referentiepeilmerk ( $\sigma_{ref}$ ), een aanname voor de meetonnauwkeurigheid van de aangemeten peilmerken ( $\sigma_{peil}$ ) en een tijdsafhankelijke term voor de historische instabiliteit van het referentiepeilmerk. Dit resulteert in de volgende formule voor de standaardafwijking van de bodemdalingsmetingen

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{ref}^2 + \sigma_{peil}^2 + ((t - t_0)\Delta_{ref})^2}.$$

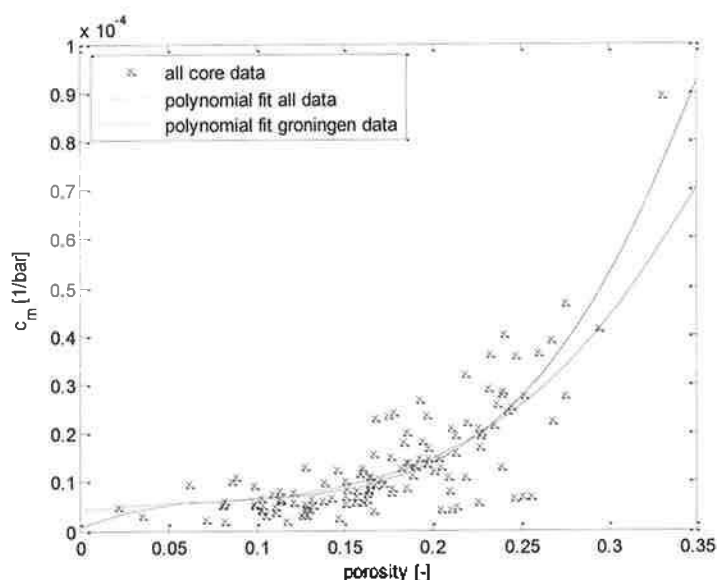
Voor de Ameland studie zijn  $\sigma_{ref} = 3 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{peil} = 3 \text{ mm}$  en  $\Delta_{ref} = 0,25 \text{ mm/jaar}$  gehanteerd. Voor Groningen zijn dezelfde getallen gebruikt. Dit resulteert in een standaardafwijking van de bodemdalingsmetingen aan het begin van de productie  $t = t_0 = 1964$  van 0,42 cm en een standaardafwijking in 2013 van 1,27 cm. Het 90% betrouwbaarheidsinterval (2-sigma standaard deviatie) in 2013 wordt gegeven door de meting na vereffening  $\pm 2.54 \text{ cm}$ .

Deze in de tijd toenemende standaardafwijking is in de Red Flag methode verwerkt. De gemeten differenties zoals aangeleverd door NAM worden als uitgangspunt gebruikt. Daaruit worden de instabiele punten bij het 99% betrouwbaarheidsinterval verwijderd (zie Hoofdstuk 4 voor een beschrijving van de instabiele punten analyse). De resterende set gemeten differenties in de peilmerken is in Red Flag gebruikt om de compactiemodellen aan te toetsen. Hiervoor zijn in dezelfde peilmerken en tussen dezelfde tijdstippen als de differentiestaat, differenties bepaald uit de berekende bodemdaling ter vergelijking met de bodemdalingsmetingen.

#### 5.4.2 Relatie tussen de compactiecoëfficiënt en de porositeit

Zoals beschreven in Paragraaf 5.3.1 wordt als invoer voor de compactiemodellen een vermenigvuldigingsfactor  $\alpha_{cm}$  op de compactiecoëfficiënt-porositeit functie  $c_m(\varphi)$  gebruikt. Deze  $c_m(\varphi)$  functie is bepaald uit compactie-experimenten op Rotliegend kernmonsters van gasvelden in Noord Nederland. Deze zijn door de NAM beschikbaar gesteld. Deze compactiecoëfficiënten laten een duidelijke afhankelijkheid van de porositeit van het gesteente zien (Figuur 5.6).

De  $c_m(\varphi)$  functie gebruikt in de geomechanische modellering wordt bepaald door middel van een regressiefunctie aan de laboratoriummetingen. Een derdegraads



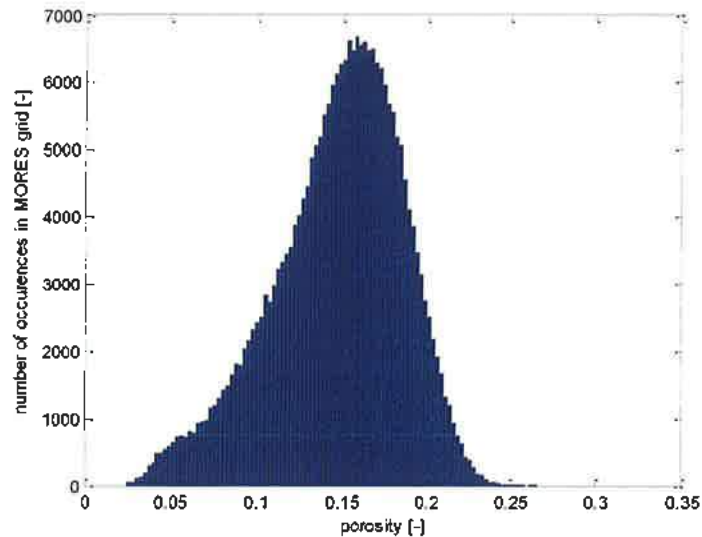
Figuur 5.6 Porositeits afhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt. De blauwe markers zijn alle beschikbare kernmetingen. De groene lijn is de derdegraads polynoom trendlijn door alle kernmetingen (vergelijking 4), en de rode lijn is de beste fit door de kernmetingen in het Groninger Rotliegend (vergelijking 5).

polynoom trendlijn is gemaakt voor alle kernmetingen en voor een subset bestaande uit alleen de kernmetingen in het Groninger Rotliegend. De regressie-functie voor alle metingen is

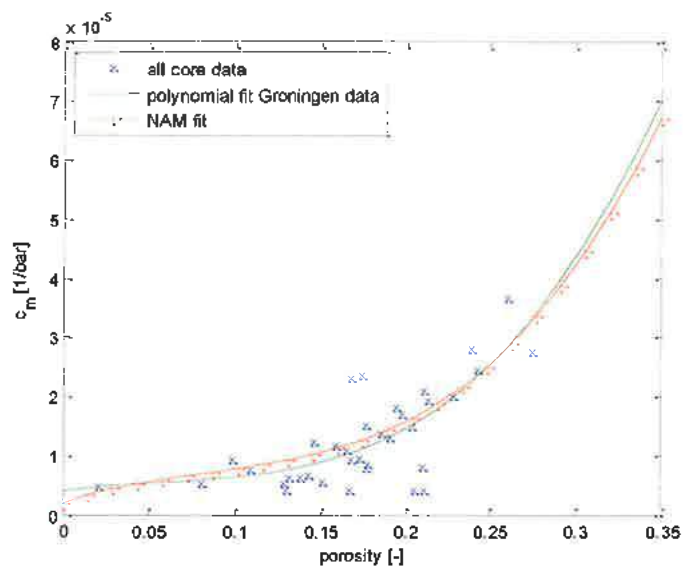
$$c_m(\varphi) = 4,943 \cdot 10^{-3} \varphi^3 - 1,419 \cdot 10^{-3} \varphi^2 + 1,52 \cdot 10^{-4} \varphi + 6,198 \cdot 10^{-7} \text{ bar}^{-1}$$

En de regressie-functie voor alleen de Groningen kernmonsters is

$$c_m(\varphi) = 2,464 \cdot 10^{-3} \varphi^3 - 4,472 \cdot 10^{-4} \varphi^2 + 4,314 \cdot 10^{-5} \varphi + 4,107 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$



Figuur 5.7 Porositeitsverdeling in het Groningen MORES model van NAM.



Figuur 5.8 Porositeitsafhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt vergelijk van de door NAM bepaalde relatie met de derdegraads polynoom door de Groningen kernen. De blauwe markers zijn alle beschikbare kernmetingen in het Groninger Rotliegend. De groene lijn is de beste derdegraads polynoom fit, en de rode lijn is de beste fit van NAM.

Figuur 5.7 laat de porositeitsverdeling zien in het Groningen MORES model van NAM. Het overgrote deel ligt binnen het bereik 0,05 en 0,23. In dit bereik is het onderscheid tussen de polynoom voor alle kernen en die voor alleen de Groningen kernen verwaarloosbaar klein (Figuur 5.6). De lijn voor de Groningen kernen ligt dicht bij de lijn afgeleid door NAM, zie Figuur 5.8 en is gebruikt in de Groningen studie.

In eerder onderzoek (Muntendam-Bos et al., 2012) is de compactiecoëfficiënt gecorrigeerd voor het verschil tussen de belastingsnelheid in het veld en de belastingsnelheid in de laboratorium proeven. Echter, in de isotachen formulering van het Rate Type Compactie Model (RTCM) is de compactiecoëfficiënt geen constante in het model omdat alle belastingsnelheden van geologisch tot de snelste depletiesnelheid voorkomen in de berekeningen. De variatie van de compactiecoëfficiënt met de belastingsnelheid is hier automatisch verwerkt in het RTCM model en de laboratoriumwaarde moet als input gegeven worden. Er is dan geen extra correctie nodig voor de belastingsnelheid.

In (Muntendam-Bos et al., 2012) is verder een correctie toegepast voor het effect van de korrelstijfheid, ook wel de Biot-factor genoemd (Geertsma, 1973). Dit geeft een reductie in de compactiecoëfficiënt. Het effect van de Biot-factor is in de Red Flag analyse impliciet meegenomen in de vermenigvuldigingsfactor  $\alpha_{cm}$  op de compactiecoëfficiënt-porositeit functie  $c_m(\varphi)$ , zie Paragraaf 5.3.1.

#### 5.4.3 Resultaten Red Flag analyse

In onderstaande Tabel 5.3 zijn de resultaten van Red Flag voor het Rate Type Compactie Model weergegeven. In Tabel 5.4 zijn de resultaten van Red Flag voor het Time-Decay model weergegeven. In de eerste kolom staat de waarschijnlijkheid dat die bepaalde set parameters de beste overeenkomst geeft met de gemeten bodemdaling. In de tweede kolom staat de  $\chi^2$  volgend uit Red Flag, die een indruk geeft van de gemiddelde fout per vergeleken datapunt. De kolommen daarna geven de waarden voor de invoerparameters. In tegenstelling tot de  $\chi^2$  in andere statistische methoden is deze grootheid hier dimensieloos door normalisatie op het kwadraat van de standaardafwijking. De  $\chi^2$  in de tweede kolom neemt slechts in geringe mate toe, terwijl de kans sterk achteruitgaat vanaf de eerste rij van de

Tabel 5.3 Red Flag output voor het RTCM model.

Kans [%]	$\chi^2$ [-]	$\frac{\epsilon_{m,a}}{\epsilon_{m,ref}}$ [-]	$\sigma'_{ref}$ [bar/jaar]	$\alpha_{cm}$ [-]
99,9997	0,7510	0,44	$3,16 \cdot 10^{-4}$	0,57
$7,6733 \cdot 10^{-4}$	0,7527	0,49	$3,16 \cdot 10^{-4}$	0,57
$4,5616 \cdot 10^{-9}$	0,7550	0,44	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,61

Tabel 5.4 Red Flag output voor het Time-Decay model.

Kans [%]	$\chi^2$ [-]	$\tau$ [jaar]	$\alpha_{cm}$ [-]
76,82	0,93415	4,85	0,53
21,51	0,93420	4,97	0,53
1,21	0,93450	4,73	0,53
0,44	0,93465	5,09	0,53
0,011	0,93524	4,60	0,53

tabellen naar beneden. Dit komt omdat de  $\chi^2$  alleen iets zegt over de middelbare afwijking ten opzichte van de metingen terwijl Red Flag in de kansberekening het verloop van de bodemdaling in de tijd beschouwt.

Er is voor gekozen om de modellen met parameters binnen het 99% kans interval te gebruiken. In geval van het RTCM beperkt zich dit tot alleen het beste model dat 99,9997 % kans heeft. In geval van het Time-Decay model geven de beste drie modellen samen een kans van 99,54 % kans en worden meegenomen in de beschouwing.

In de tabellen is te zien dat de gemiddelde  $\chi^2$  per datapunt met 0,75 voor het RTCM duidelijk lager ligt dan de waarde van 0,93 voor het Time-Decay model. In een Red Flag analyse met het beste RTCM model en het beste Time-Decay model is met meer dan 99,9999% kans het RTCM het beste model.

In het gelineariseerde isotachenmodel worden parameters  $c_{m,a}$ ,  $c_{m,b}$ ,  $c$ ,  $\dot{\epsilon}_{s,ref}$  gebruikt (zie Paragraaf 5.3.1). Wat voor de compactiecoëfficiënten feitelijk in het model als invoer gebruikt wordt is  $c_{m,a} + c_{m,b}$  en de fractie  $\frac{c_{m,a}}{c_{m,a} + c_{m,b}}$ . Waarbij  $c_{m,a} + c_{m,b}$  de totale helling is van de isotachen en de fractie  $\frac{c_{m,a}}{c_{m,a} + c_{m,b}}$  het instantane deel daarvan geeft. De totale helling wordt weer gegeven door de vermenigvuldigingsfactor maal de compactiecoëfficiënt-porositeit functie  $c_{m,a} + c_{m,b} = \alpha_{cm} c_m(\varphi)$ . In Pruiksma et al. (2013) is een relatie gegeven om de input parameters voor het RTCM om te rekenen naar de parameters voor het lineaire isotachenmodel. In Tabel 5.5 zijn de parameters voor het lineaire isotachenmodel gegeven die berekend zijn uit de beste set RTCM parameters. Deze set parameters is gebruikt in de bodemdalingsberekeningen met het lineaire isotachenmodel.

Tabel 5.5 Input parameters voor het gelineariseerde isotachenmodel berekend uit de beste set parameters voor het RTCM model in Tabel 5.3.

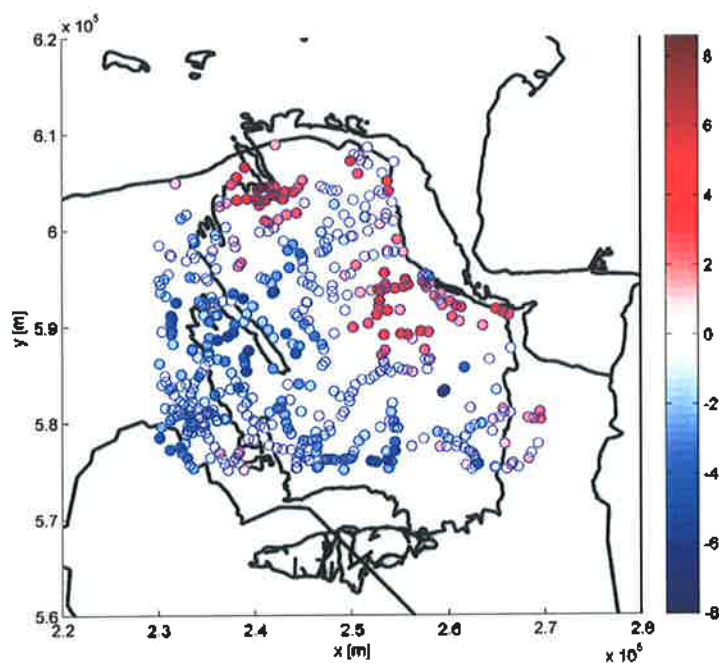
Parameter	Waarde
$\frac{c_{m,a}}{c_{m,a} + c_{m,b}}$	0,44 [-]
$\alpha_{cm}$	0,67 [-]
$c$	$3,74 \cdot 10^{-5}$ [-]
$\dot{\epsilon}_{s,ref}$	$1,09 \cdot 10^{-9}$ 1/jaar

#### 5.4.4 Vergelijking gemeten bodemdaling met de berekende bodemdaling

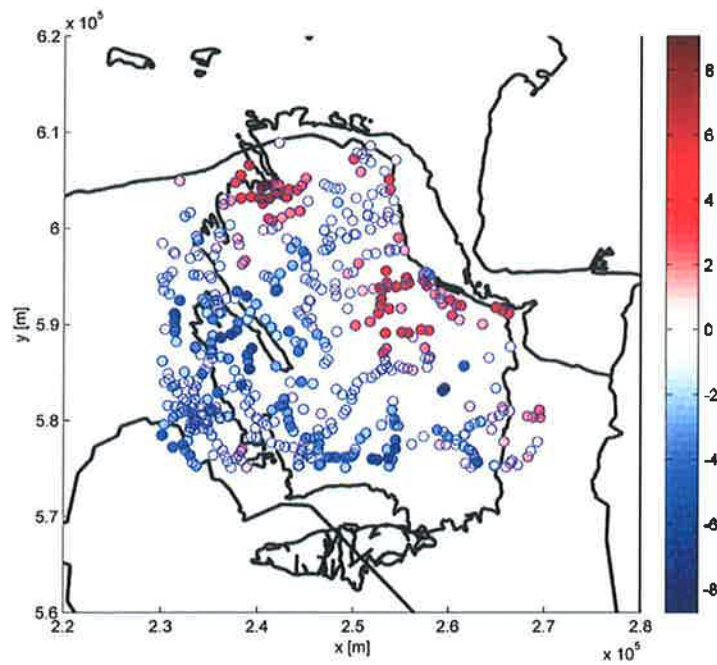
De bodemdaling berekend met het modelinstrumentarium is vergeleken met de gemeten bodemdaling voor de drie compactiemodellen met de beste parameter sets volgend uit de Red Flag analyse. Figuur 5.9 t/m Figuur 5.11 tonen de afwijkingen ten opzichte van de gemeten bodemdaling in de peilmerken eind 2011. Punten waar de berekende bodemdaling groter is dan gemeten zijn in rood weergegeven en punten met minder bodemdaling dan gemeten zijn in blauw weergegeven. Te zien is dat het patroon van de afwijkingen nagenoeg hetzelfde is voor het RTCM model en het lineair isotachenmodel. De verschillen tussen het Time-Decay model en het RTCM model zijn groter. Bijvoorbeeld in het noordwesten is in beide modellen een overschatting van bodemdaling van ongeveer 8 cm, maar iets naar het oosten rondom coördinaten (250000, 605000) is er bijna geen verschil



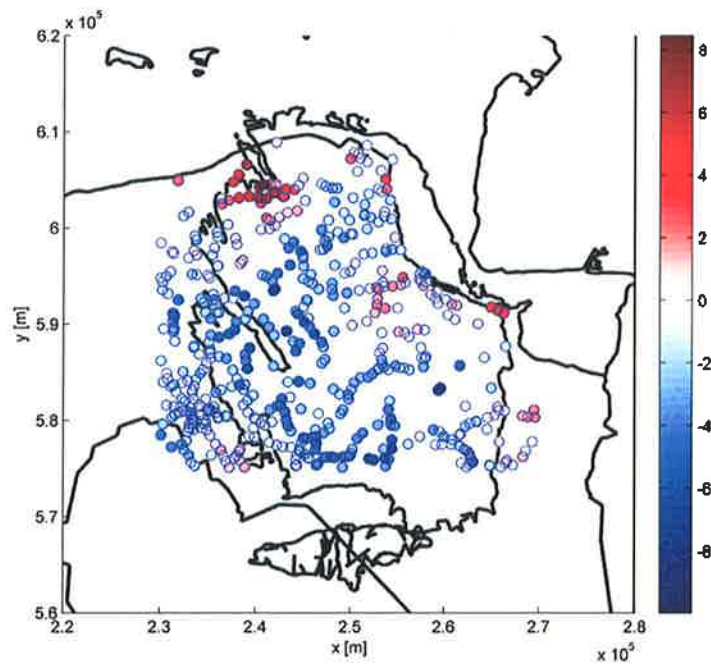
tussen gemeten en berekende daling in het RTCM model terwijl het Time-Decay model daar de daling 3 cm onderschat. In het centrum van de kom wordt de daling met het Time-Decay model ongeveer 5 à 6 cm onderschat en met het RTCM ongeveer 2 à 3 cm. Appendix D.1 toont scatterplots van berekende versus gemeten daling op verschillende tijdstippen. De fout groeit over het algemeen in de tijd tot een maximum fout van 8.6 cm (in het Delfzijl gebied) met de gemeten daling voor het RTCM model en een maximum fout van 9,1 cm voor het gelineariseerde isotachenmodel en 10,0 cm voor het Time-Decay model. De verdeling van de fout eind 2011 is bepaald en weergegeven in Figuur 5.12. Het RTCM model heeft in 78% van de peilmerken een bodemdaling die minder dan twee keer de standaardafwijking is. Voor het Time-Decay model is dat 68%, ongeacht welke van de drie beste parameter sets gebruikt worden. Het gelineariseerde isotachenmodel zit tussen de twee modellen in met 74%. In Figuur D.2.1 in Appendix D.2 is de bodemdaling in het centrum van de kom vergeleken met de berekening met het RTCM en gelineariseerde isotachenmodel en in Figuur D.2.2 met de drie beste parameter sets voor het Time-Decay model. Hiertoe zijn alle peilmerken geselecteerd met meer dan 29 cm bodemdaling en die in 1964 al aanwezig waren (primaire peilmerken). Te zien is dat de bodemdaling berekend voor de drie parameter sets met het Time-Decay model nagenoeg op elkaar ligt. Vergelijk van de numerieke resultaten voor het hele veld (alle peilmerken) liet zien dat deze drie varianten maximaal 1,1 mm van elkaar verschillen. Het RTCM model en het lineaire isotachenmodel liggen ook dicht bij elkaar. Over het hele veld (in plaats en tijd) is er een verschil van maximaal 1,1 cm tussen de twee modellen. Uit Appendix D.2 volgt dat de maximale daling beter beschreven wordt met het RTCM model en lineaire isotachenmodel dan met het Time-Decay model. Vanwege de betere overeenkomst met de gemeten bodemdaling is ervoor gekozen om de bodemdalingsprognose met het RTCM model te maken.



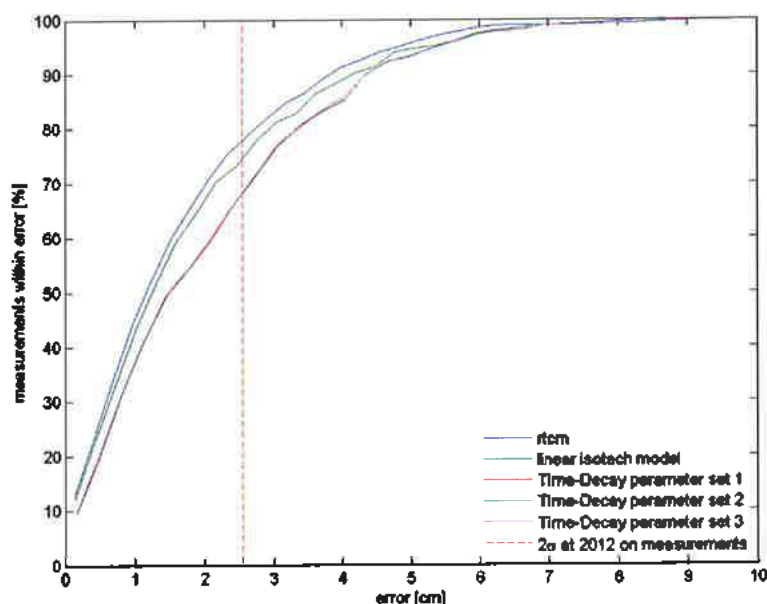
Figuur 5.9 Verskil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.



Figuur 5.10 Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het lineair isotachen model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.



Figuur 5.11 Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het Time-Decay model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.

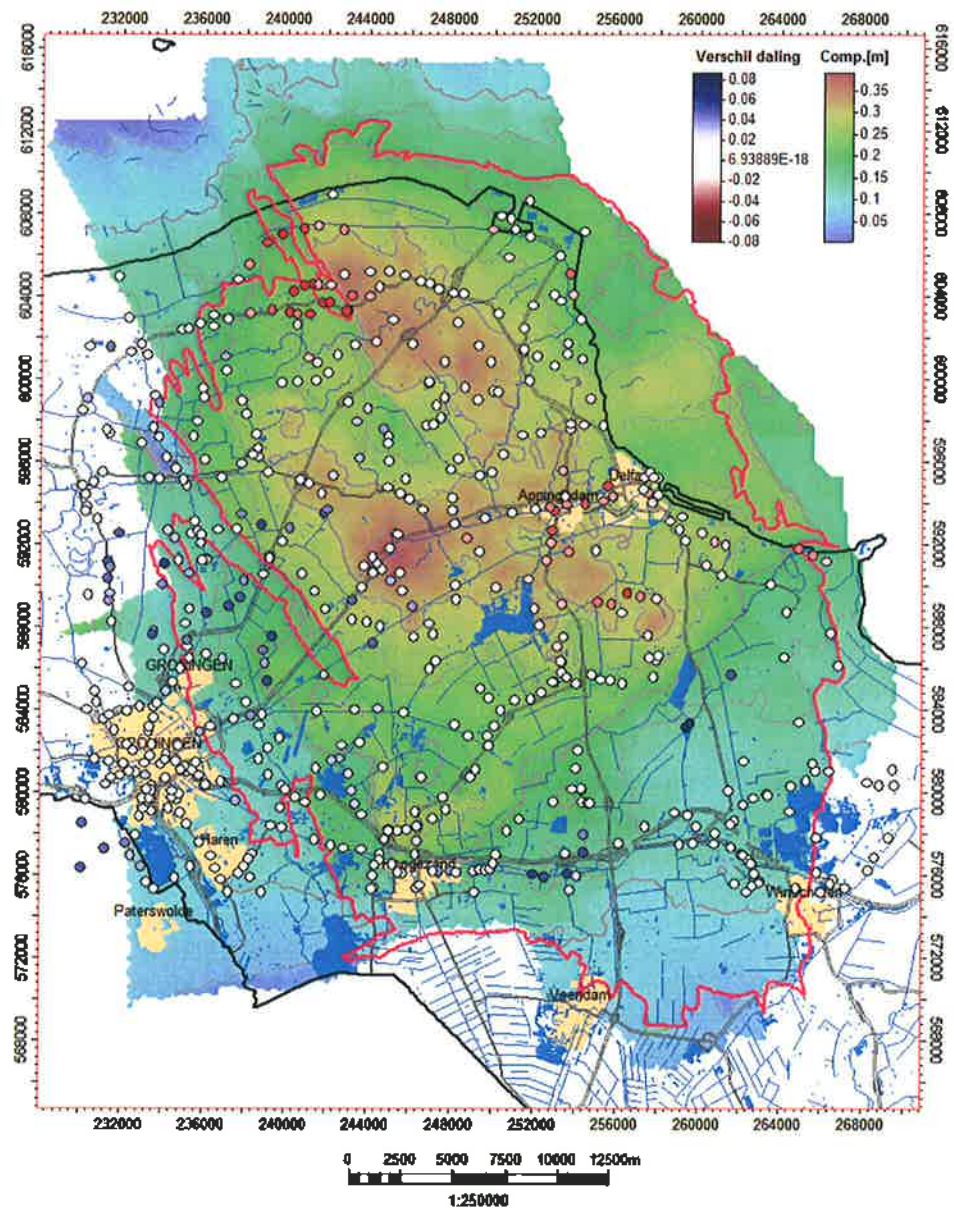


Figuur 5.12 Verdeling van de fout in de bodemdaling voor de drie compactiemodellen.

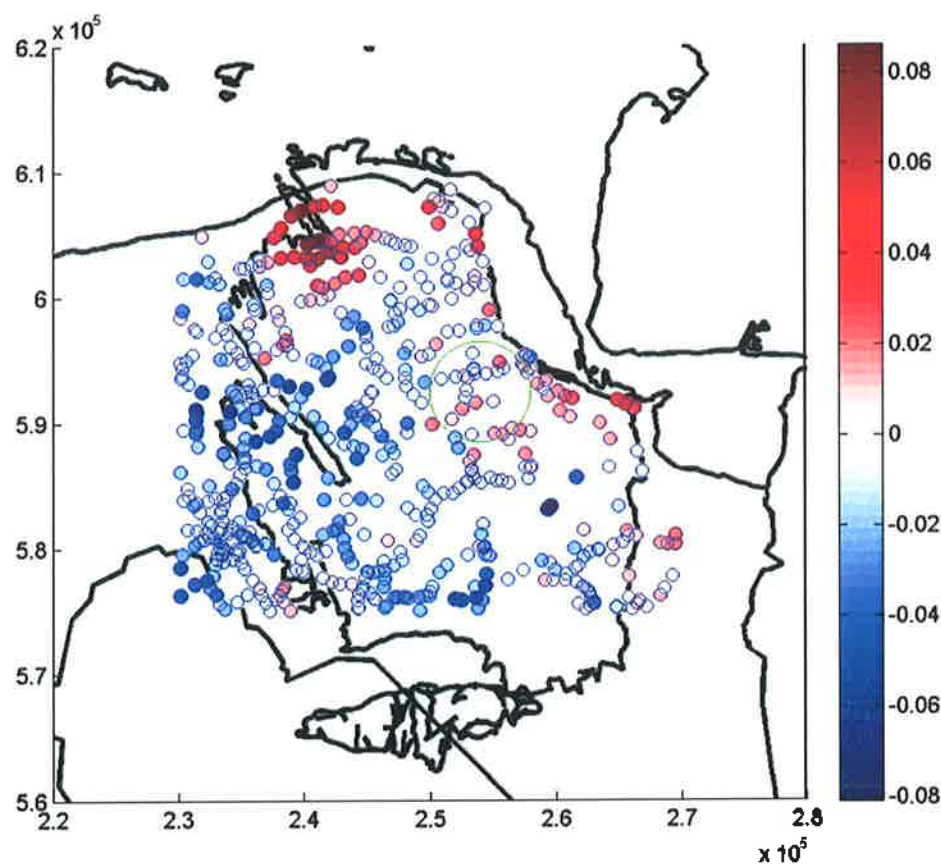
#### 5.4.5 *Verschillen tussen gemeten en berekende bodemdaling nabij Delfzijl en in het noordwesten van het veld*

Alle onderzochte compactiemodellen leveren een overschatting op de bodemdaling in het noordwesten van het veld en in het gebied nabij Delfzijl. Figuur 5.13 toont de verschillen tussen gemeten en berekende bodemdaling voor het RTCM model (uit Figuur 5.9) nogmaals samen met de berekende compactie. In de omgeving van Delfzijl zijn lokaal zones met hogere compactie te herkennen met daaromheen een gebied met redelijk uniforme compactie. In Paragraaf 2.5 wordt beschreven dat er een bepaalde onzekerheid aanwezig is in het porositeitsmodel en dat een lagere porositeit in dit gebied niet uitgesloten is.

Om het effect van een reductie in porositeit te bepalen is een deelgebied binnen het reservoir met een straal van 4 km een porositeitsreductie met een factor 0,85 toegepast. Figuur 5.14 toont de verschillen tussen gemeten en berekende bodemdaling voor deze situatie. De groene cirkel geeft het gebied aan waar de porositeitsreductie is toegepast. Te zien is dat de bodemdaling in het gebied nu binnen 2 cm van de gemeten waarde ligt, dit komt overeen binnen twee maal de standaardafwijking van de gemeten bodemdaling.

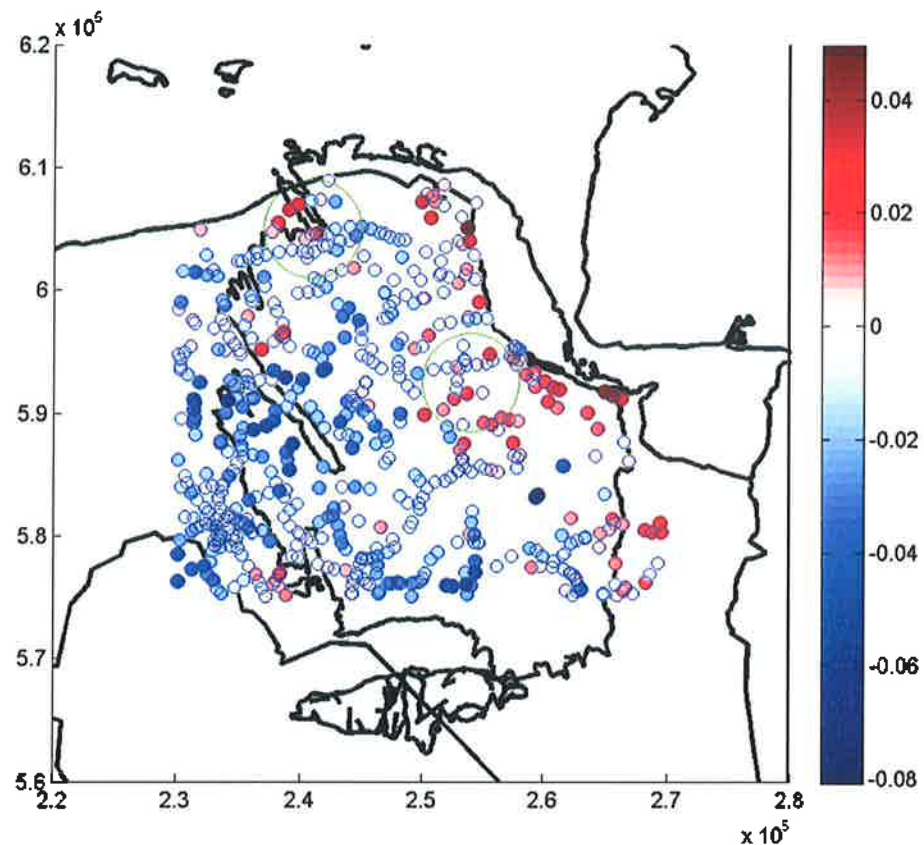


Figuur 5.13 Gemodelleerde compactie voor de Groningen eind 2011 voor het RTCM model. Het verschil tussen berekende en geobserveerde bodemdaling is weergegeven op de peilmerklocaties. Een rode kleur geeft de gebieden aan waarbij de berekende bodemdaling groter is dan de geobserveerde bodemdaling.



Figuur 5.14 Verskil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011 na toepassing van een porositeitsreductie met een factor 0,85 in een gebied met straal 4 km nabij Delfzijl (groene cirkel). Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.

Om het effect van porositeitsreductie in het noordwestelijk deel van het veld te onderzoeken is de porositeit in een gebied met een straal van 4 km in het noordwesten met een factor 0,50 gereduceerd, zie Figuur 5.15. In dit geval komen de berekeningen beter overeen met de metingen van bodemdaling maar zo'n porositeitsreductie is onrealistisch (zie Paragraaf 2.5). De discrepantie tussen gemeten en berekende bodemdaling in het noordwesten zou mogelijk verklaard kunnen worden door de grote diepteverschillen in reservoirgesteente langs de breuken in dat gebied (zie Paragraaf 2.5). De porositeit is diepte afhankelijk waardoor sterke veranderingen over breuken kunnen plaatsvinden. Gezien de gebruikte interpolatie van porositeiten tussen putten zitten er geen abrupte veranderingen in porositeiten over breuken in het model.



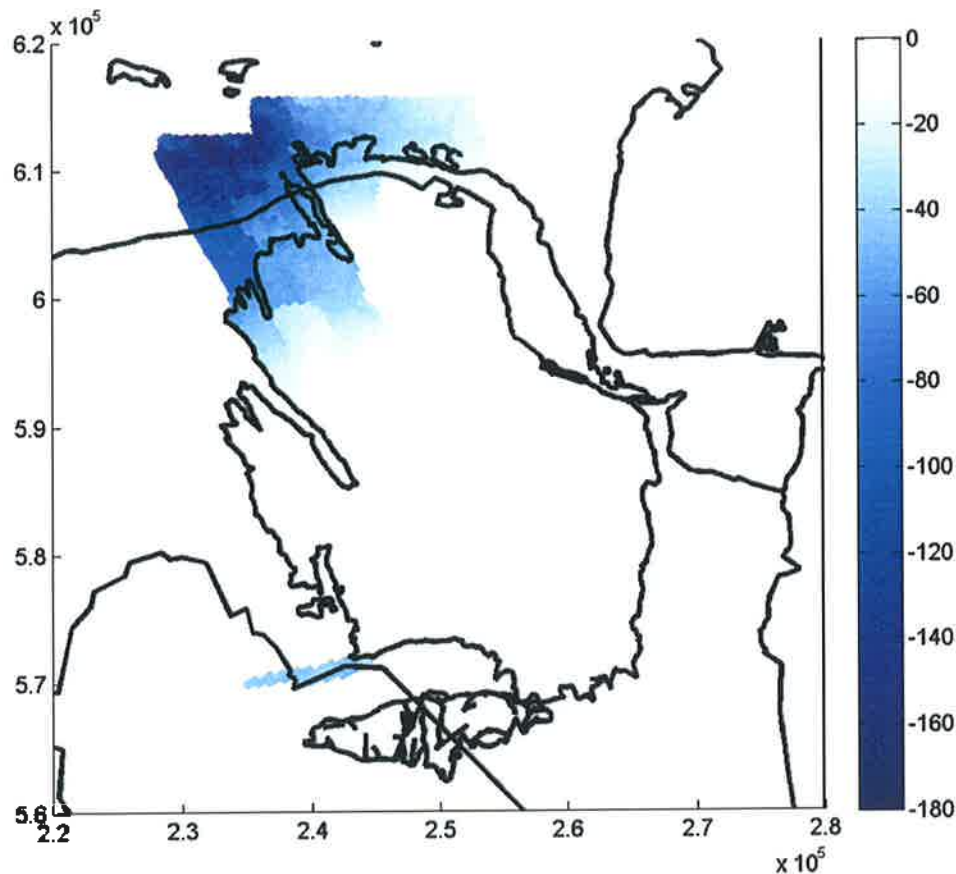
Figuur 5.15 Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011 na toepassing van een porositeitsreductie met een factor 0,50 in het noordwesten van het veld (groene cirkel) en een reductie met een factor 0,85 in een gebied met straal 4 km nabij Delfzijl (groene cirkel). Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.

#### 5.4.5.1 Aquifer scenario's noordwesten

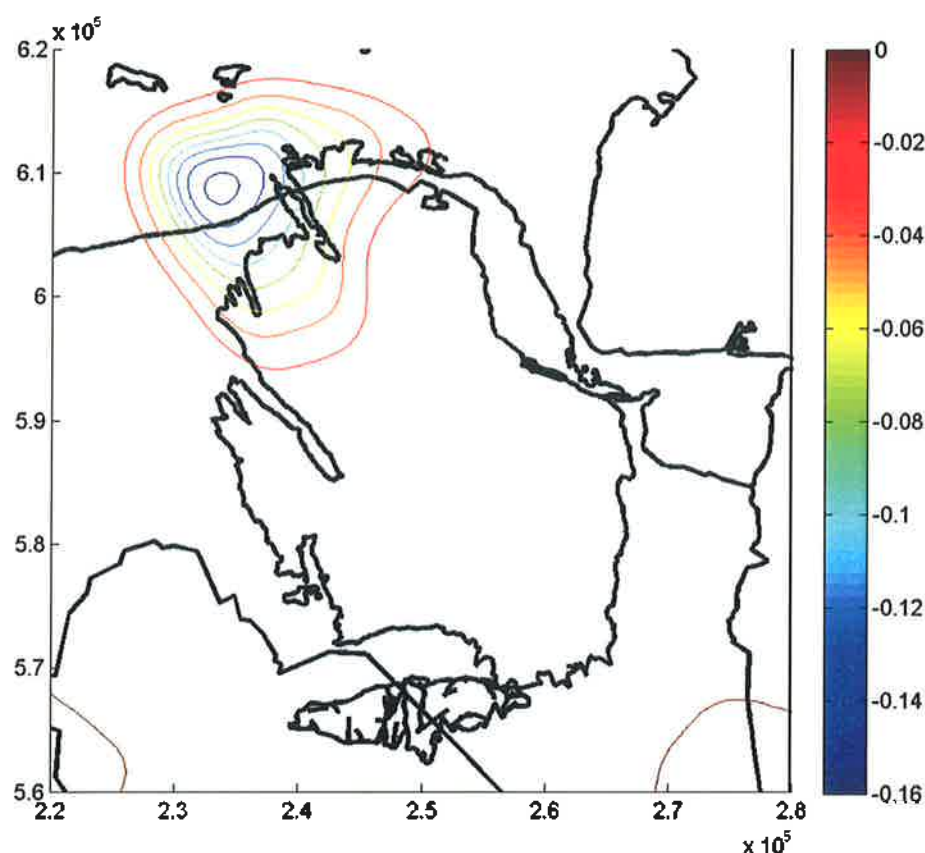
De berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd voor het sterke aquifer scenario (zie Hoofdstuk 3). Voor dit scenario is de drukgeschiedenis in de reservoir cellen beschikbaar gesteld door NAM. Er is een tweede realisatie van het dynamische MORES model gemaakt met een zwak aquifer scenario, waarvoor geen drukgeschiedenis beschikbaar is gesteld. Er is echter wel een dynamisch reservoirmodel beschikbaar gesteld vanaf 2013. In Figuur 5.16 is in 2013 het verschil in druk weergegeven tussen het sterke en zwakke aquifer scenario. In het noordwesten is de druk in het zwakke aquifer scenario tot 180 bar lager.

Om te bepalen wat het effect is van het sterke aquifer scenario op de bodemdaling is een druksignaal gegenereerd in de gridcellen in het noordwesten van het veld uitgaande van de beschikbare drukken voor het sterke aquifer scenario. Het genereren van de drukken is als volgt uitgevoerd: op tijdstip 2013 is de druk in iedere reservoir cel voor het zwakke aquifer scenario gedeeld door de druk in die cel voor het sterke aquifer scenario. Daaruit volgt een factor voor iedere gridcel waarmee de druk in het sterke aquifer scenario vermenigvuldigd moet worden om

het drukveld in het zwakke aquifer scenario te krijgen. Omdat de begindruk in 1964 hetzelfde is voor beide scenario's is ervoor gekozen om deze factor in de tijd lineair groeien van 1 tot de uiteindelijke factor (die voor iedere gridcel anders is). Daarmee is gegarandeerd dat zowel begindruk klopt en de druk in 2013 netjes aansluit. Met dit gegenereerde drukscenario is vervolgens het verschil in bodemdaling in 2012 bepaald, zie Figuur 5.17. Op de locatie van de peilmerken is er tot ongeveer 8 cm meer bodemdaling in het zwakke aquifer scenario. Met het zwakke aquifer scenario zou de bodemdaling in het noordwesten nog meer overschat worden dan nu met het sterke aquifer scenario het geval is.



Figuur 5.16 Verschuldruk (in bar) tussen het sterke en zwakke aquifer scenario in 2013. De druk in het zwakke aquifer scenario is lager.



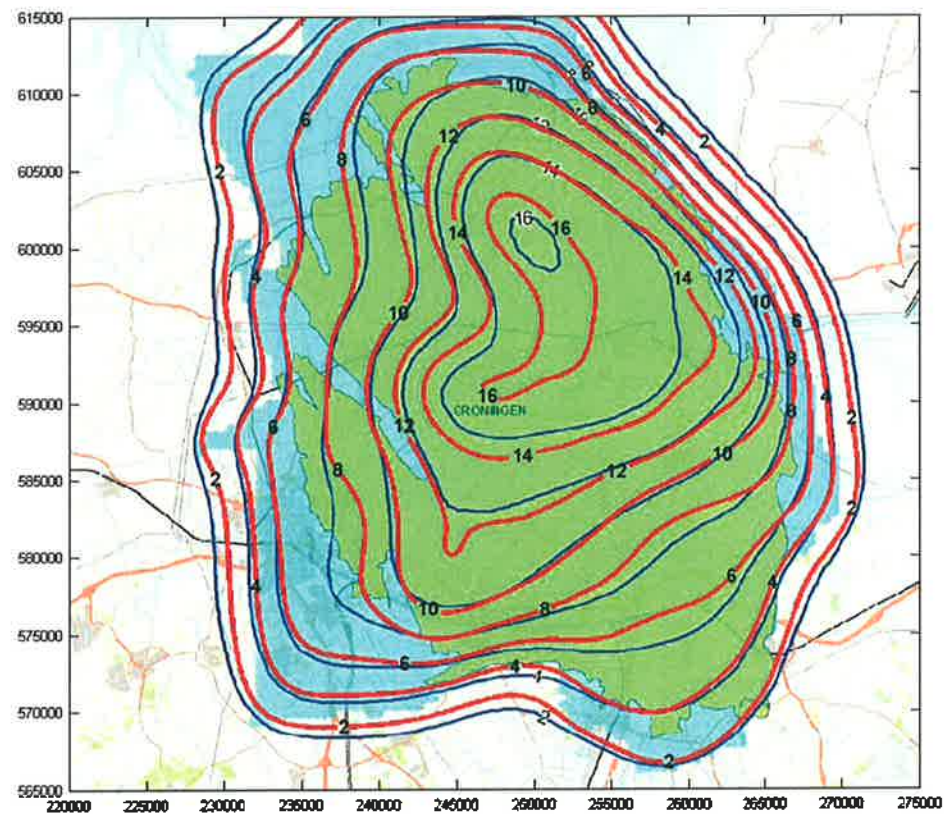
Figuur 5.17 Verschil in berekende bodemdaling (in m) eind 2012 tussen het sterke aquifer scenario en het zwakke aquifer scenario in meters. Er is ongeveer 16 cm meer daling in het noordwesten in het zwakke aquifer scenario.

## 5.5 Bodemdalingsprognoses voor 2025, 2050 en 2080

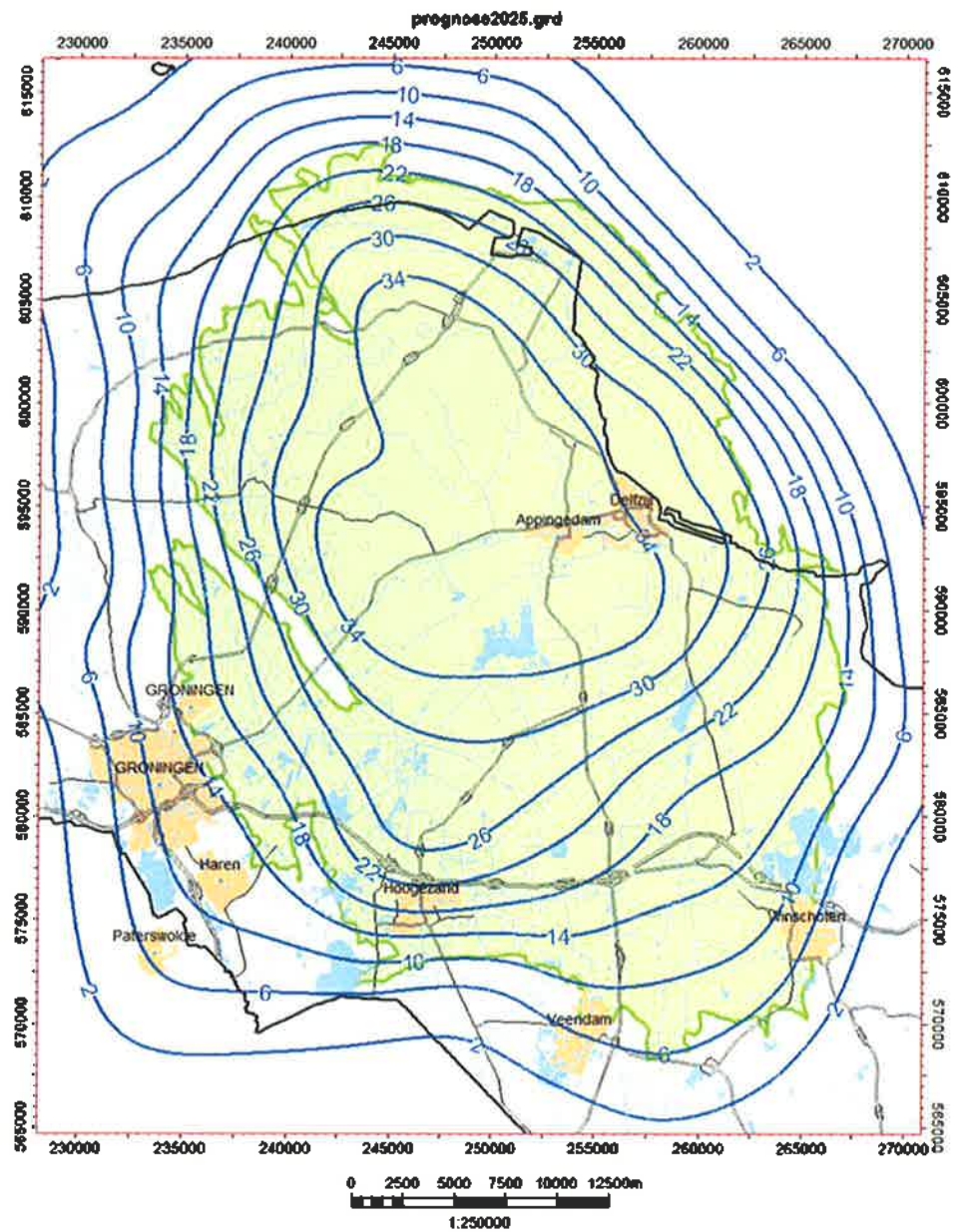
Op basis van het marktvaag scenario (zie Paragraaf 3.3) is de bodemdaling berekend in 2025, 2050 en 2080 met het RTCM model. Hierbij wordt de beste set invoerparameters gebruikt (Tabel 5.5). Figuur 5.18 geeft de nog te verwachten bodemdaling vanaf 2013 tot en met 2080, weergegeven op de bodemdalingskaart uit het winningsplan van NAM (2013d). Vanaf de 14 cm contour zijn de contourlijnen zeer vergelijkbaar qua vorm en uitbreiding, hoewel een verschillend compactiemodel gebruikt is (NAM heeft gerekend met het Time-Decay model). Aan de rand van het veld liggen de dalingscontouren van NAM (2013d) iets buiten de contouren berekend met het RTCM model. De bodemdaling berekend door NAM is daar iets groter, in de orde van een halve centimeter. De maximum nog te verwachten bodemdaling vanaf 2013 tot 2080 is 17 cm. In het winningsplan van NAM (NAM, 2013d) staat 18 cm vermeld. Een verschil van 1 cm over een periode van 67 jaar is minimaal. Figuur 5.19 t/m Figuur 5.21 tonen de totale berekende bodemdaling in 2025, 2050 en 2080. Een vergelijking tussen de resultaten van TNO-AGE en de contouren uit het NAM winningsplan (NAM, 2013d) laat een vergelijkbare vorm zien, met de door NAM berekende daling aan de randen enkele centimeters groter. Bijvoorbeeld aan de Waddenzeedijk ter plaatse van coördinaten ( $x=245000$ ,  $y=608000$  in RD coördinaten) wordt 30 cm berekend in 2080. De door



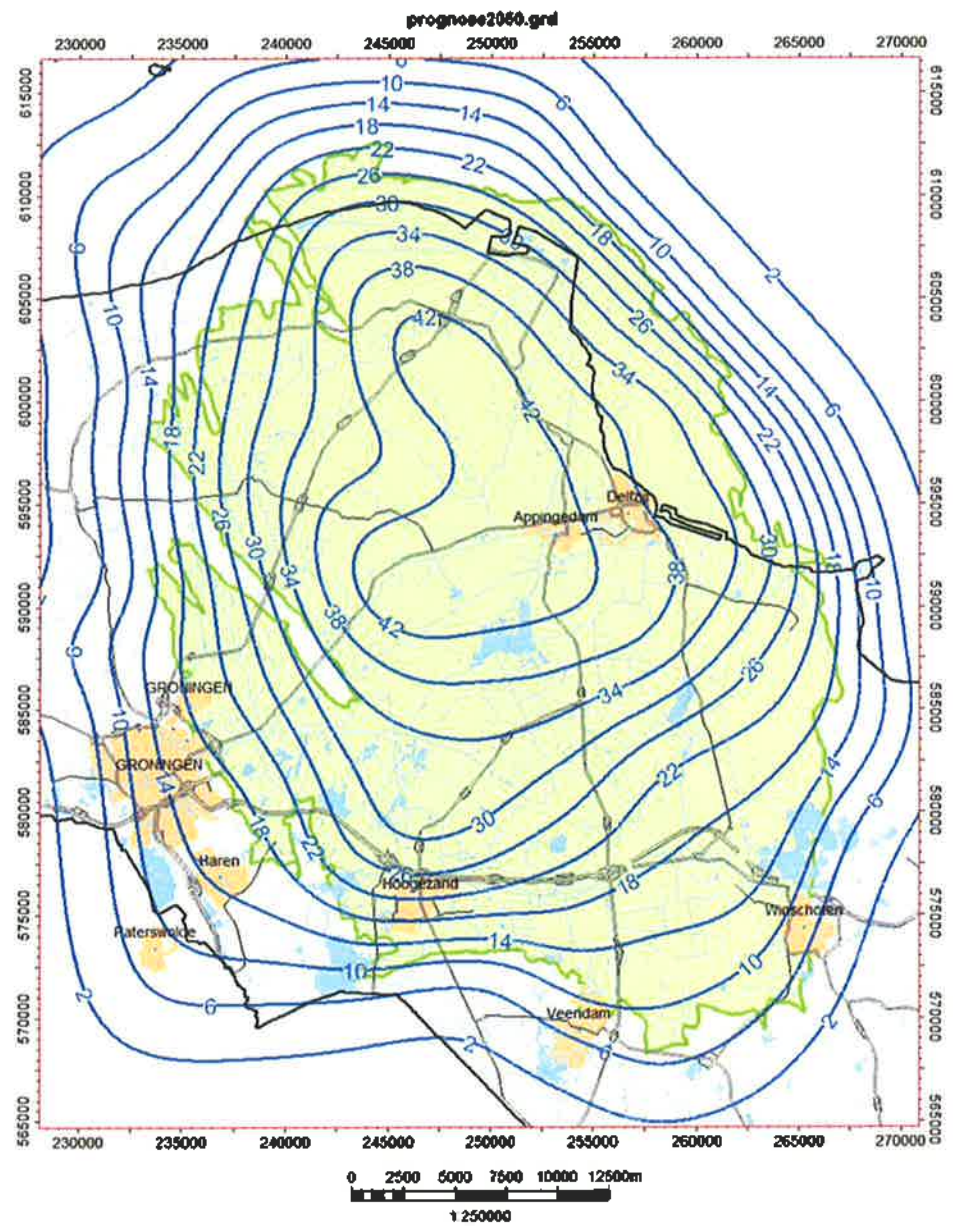
NAM berekende contour is daar bijna 34 cm. Dit verschil wordt verklaard door de verschillen tussen het Time-Decay model en het RTCM model. De maximum bodemdaling voor de beste fit in de Red Flag procedure met het Time-Decay model werd onderschat (Figuur D.2.2. in Appendix D.2) In de fit-procedure van NAM met het Time-Decay model zijn de peilmerken met de grootste bodemdaling zwaarder gewogen zodat de maximum bodemdaling beter benaderd wordt. In dit geval wordt de bodemdaling aan de flanken van het veld meer overschat.



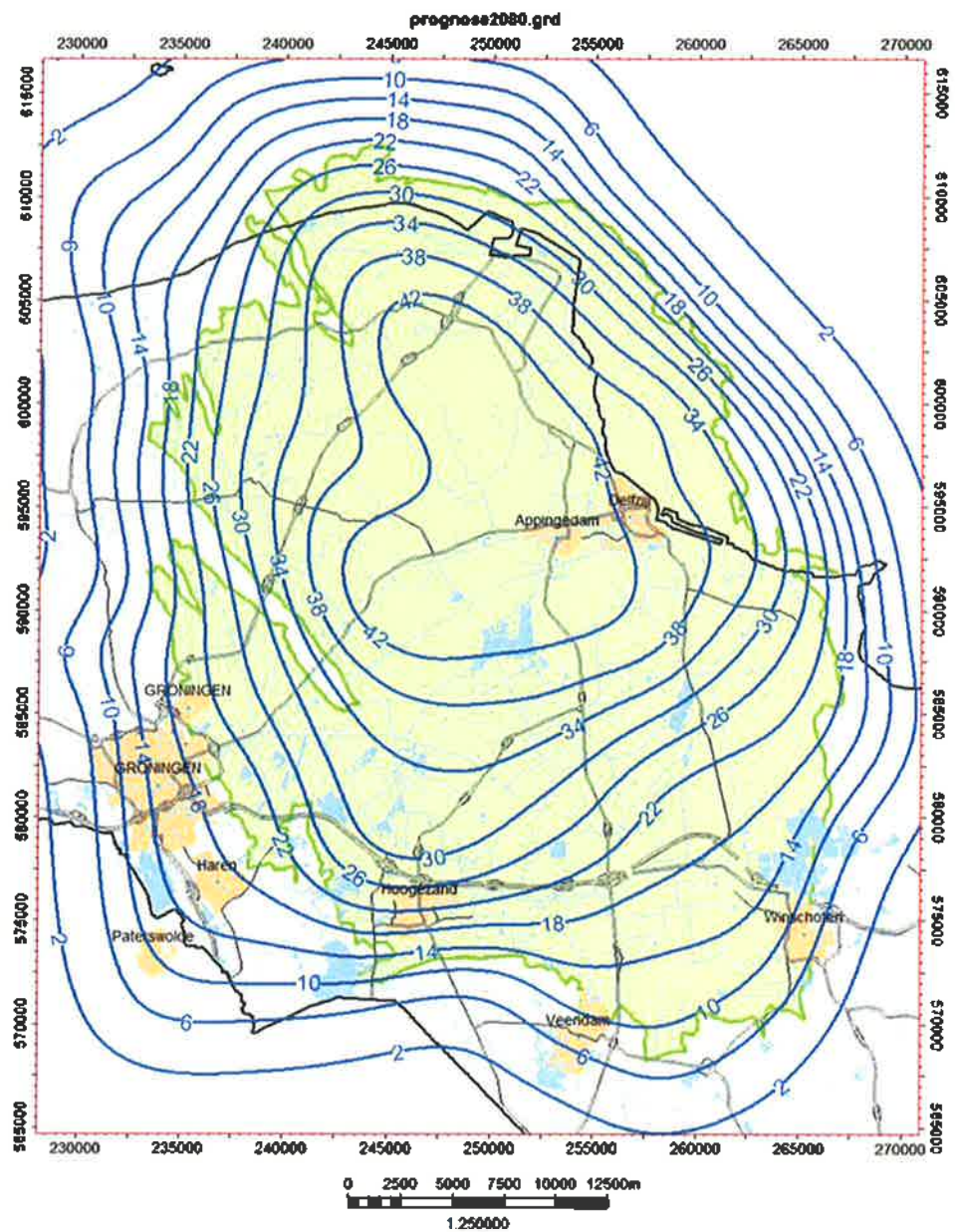
Figuur 5.18 Nog te verwachten bodemdaling vanaf 2013 tot en met 2080. In rood de contouren in centimeters bodemdaling berekend met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. In blauw de contouren uit het Winningsplan van NAM (2013d).



Figuur 5.19 Bodemdalingsprognose voor 2025 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.



Figuur 5.20 Bodemdalingsprognose voor 2050 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De contourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.



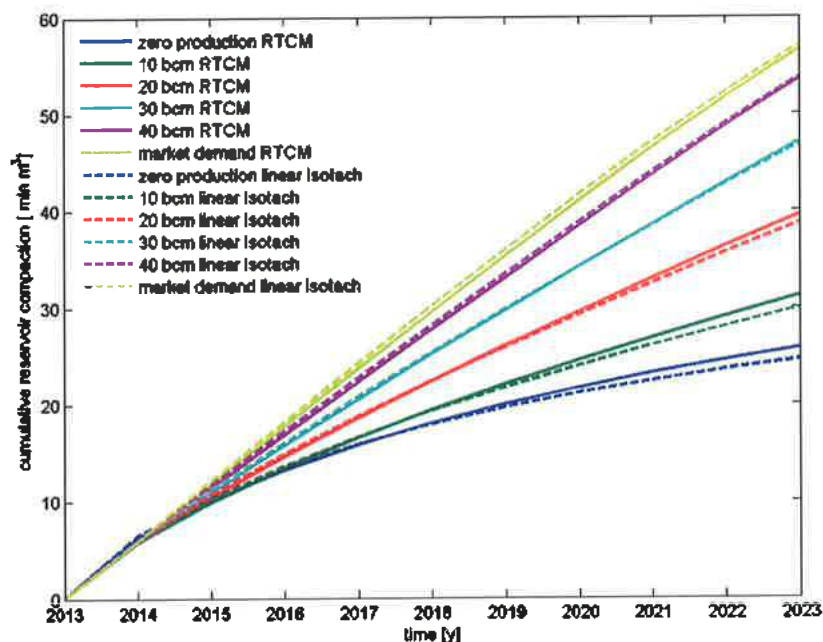
Figuur 5.21 Bodemdalingsprognose voor 2080 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.

## 5.6 Compactie scenario's

In de analyse van NAM (2013a,b) is de seismische hazard alleen afhankelijk van de compactie in het reservoir. Verschillen in compactie leiden tot verschillen in seismische hazard. Daarom is voor de verschillende productiescenario's, beschreven in Paragraaf 3.3, de compactie berekend met verschillende compactiemodellen.

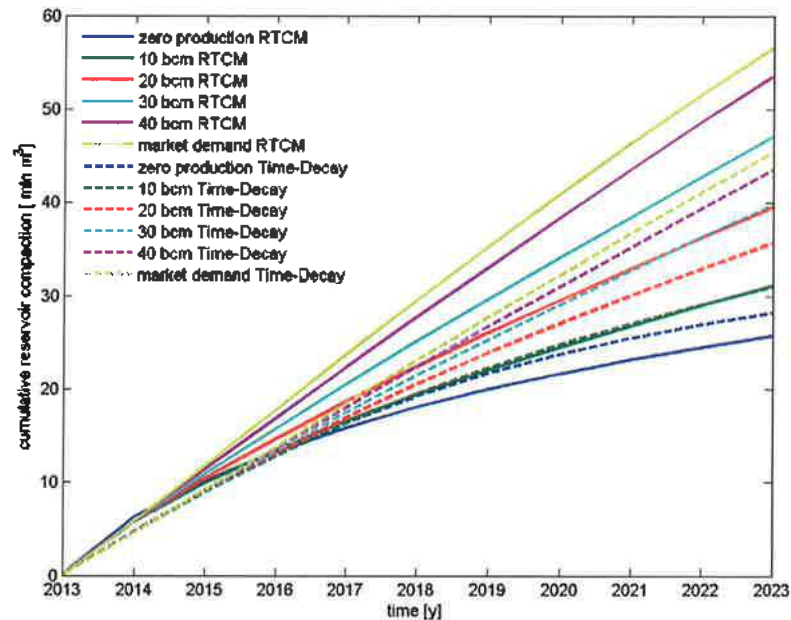
In deze paragraaf wordt de compactie tussen 2013 en 2023 besproken. Appendix D.3 t/m D.5 geeft de compactie resultaten over de gehele periode vanaf 1964 tot en met 2080. Appendix D.3 geeft het totale compactievolume in het reservoir als functie van de tijd voor het RTCM model en de verschillende productiescenario's. Appendix D.4 geeft resultaten voor de verschillende productiescenario's berekend met het Time-Decay model. In Appendix D.5 wordt het compactie volume als functie van tijd tussen het RTCM model en het gelineariseerde isotachenmodel vergeleken. In Appendix D.5 worden ook de resultaten voor het RTCM model met het Time-Decay model vergeleken. In Appendix D.6 en D.7 worden contourkaarten van de reservoircompactie in meters gegeven voor het marktvaag scenario voor de drie compactiemodellen (RTCM, Time-Decay en gelineariseerde isotachenmodel) samen met contourkaarten van de verschillen tussen de compactiemodellen.

In de periode 2013-2023 is het verschil in compactie tussen het RTCM model en het gelineariseerde isotachenmodel in het gehele veld niet meer dan enkele millimeters, zie de contourkaart in Figuur D.7.4. Figuur 5.22 toont de totale cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's met het RTCM model en het gelineariseerde isotachenmodel. De verschillen nemen toe in de tijd maar zijn klein, in 2023 circa 4% verschil voor het nul productie scenario en minder dan 1% verschil voor het marktvaag scenario. De compactie bij het nul scenario is groter met het RTCM model, vanwege de snellere kruip zoals beschreven in



Figuur 5.22 Cumulatieve compactie in miljoen m<sup>3</sup> voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het lineair isotach model.

Paragraaf 5.3.2. Voor het marktvaag scenario is de compactie met het gelineariseerde isotachenmodel groter. Dit doordat in het RTCM model bij grotere depletiesnelheid de compactiecoëfficiënt afneemt, terwijl deze gelijk blijft in het gelineariseerde isotachenmodel.

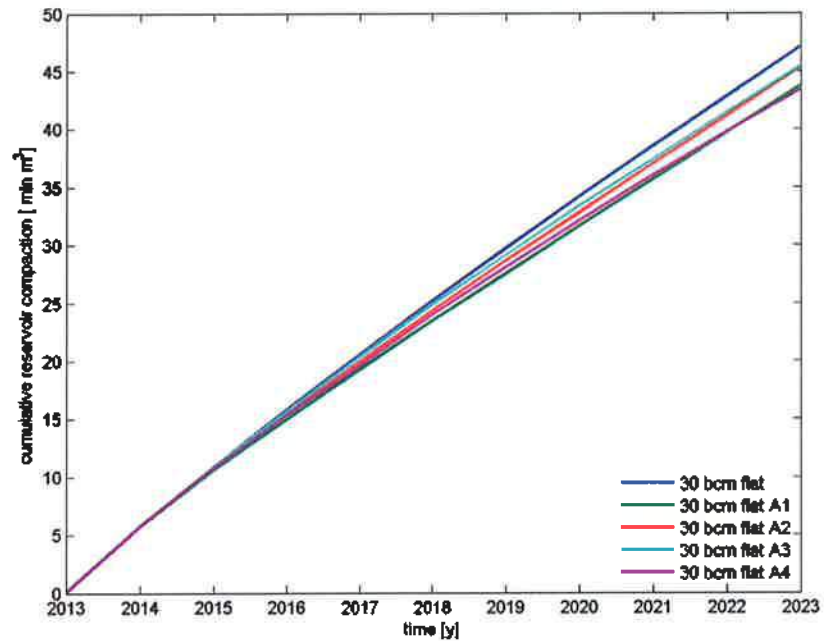


Figuur 5.23 Cumulatieve compactie in miljoen  $m^3$  voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het Time-Decay model.

De verschillen in compactie tussen het RTCM model en het Time-Decay model voor de periode 2013 tot 2023 zijn duidelijk groter, zie Figuur 5.23. Het effect van de scenario's is kleiner in het Time-Decay model. De spreiding tussen marktvaag scenario en het nul productie scenario voor het Time-Decay model is in 2023 ongeveer 17 miljoen  $m^3$ . Voor het RTCM model en het lineaire isotachenmodel is de spreiding tussen marktvaag en nul productie scenario ongeveer 30 miljoen  $m^3$ . Figuur D.7.5 laat zien dat de ruimtelijke compactie met het Time-Decay model in de periode 2013-2023 maximaal 1,5 cm afwijkt van het RTCM model. De compactie berekend met het Time-Decay model is in het centrale deel van het veld minder dan de compactie berekend met het RTCM model. Aan de west en oost kant van het Groningen veld is de compactie berekend met het Time-Decay model juist groter dan de compactie berekend met het RTCM model. Dergelijke systematische verschillen werden ook al gezien in de bodemdaling (zie Paragraaf 5.5). Een andere set parameters in het Time-Decay model kan leiden tot een betere overeenkomst in het centrale deel van het veld, maar leidt tot nog grotere afwijkingen aan de randen (deze keuze heeft NAM gemaakt, persoonlijke communicatie). In het winningsplan Groningen (NAM, 2013d) is te zien dat de maximum bodemdaling berekend met het Time-Decay model in de periode 1995 tot 2013 de gemeten bodemdaling goed benadert. Dit betekent dat de bodemdaling aan de randen (vooral het Noordwesten) overschat wordt. In NAM (2013b) is te zien dat de cumulatieve compactie berekend met het Time-Decay model groter is dan de hier berekende cumulatieve compactie van het Time-Decay model, hetgeen ook een indicatie is van deze keuze. De compactie in NAM (2013b) berekend met het Time-Decay model is ook iets groter dan de hier berekende compactie van het

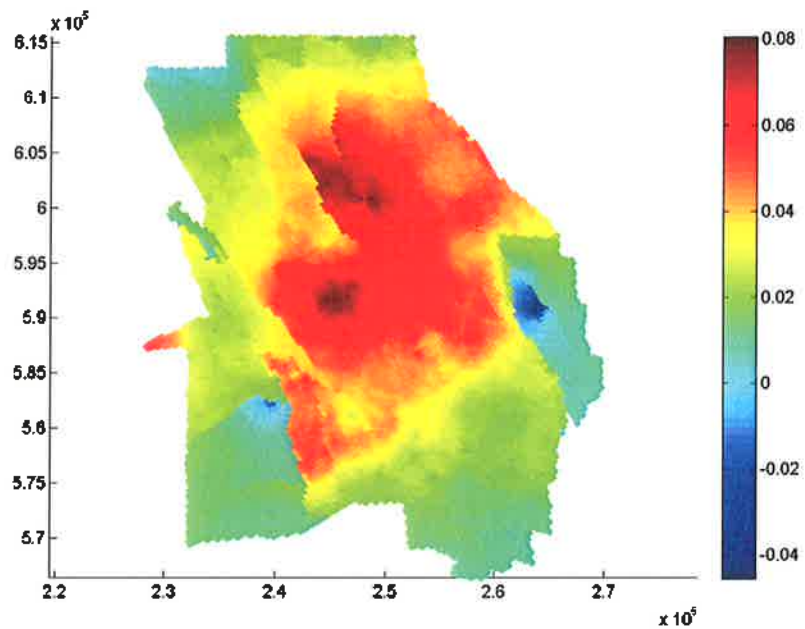
RTCM model. Dit is ook gerelateerd aan de waarschijnlijke keuze van NAM om het Time-Decay model vooral aan de bodemdaling in het diepste punt te kalibreren.

Figuur 5.24 laat voor het RTCM model de berekende cumulatieve compactie zien tussen 2013 en 2023 voor de alternatieve 30 bcm scenario's beschreven in Paragraaf 3.3. De verschillen tussen de scenario's zijn in 2023 maximaal 4,5 miljoen  $m^3$  een verschil van ongeveer 9% ten opzichte van de compactie van het 30 bcm scenario.

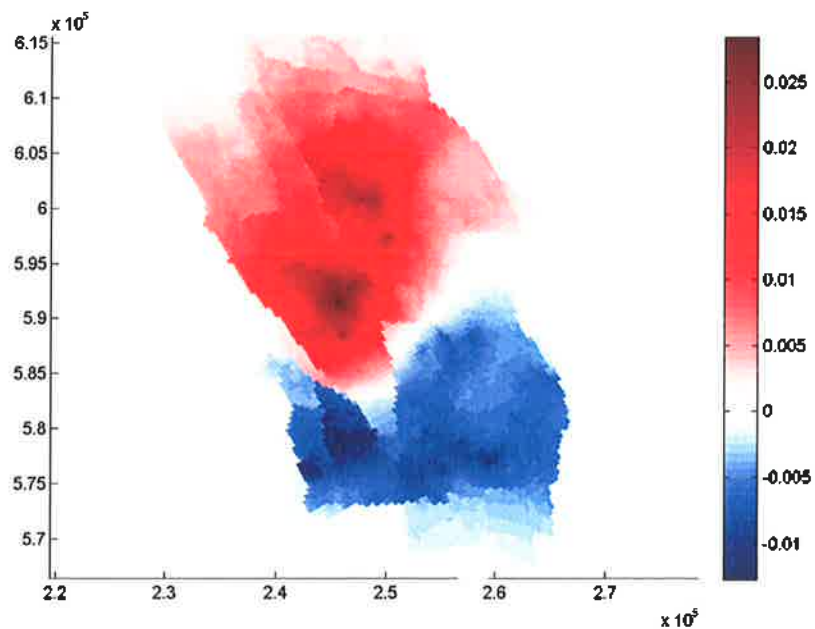


Figuur 5.24 Cumulatieve compactie in miljoen  $m^3$  voor de periode vanaf 2013 tot 2023 berekend met het RTCM model voor de alternatieve 30 bcm scenario's uit Paragraaf 3.3.

Toch is het ruimtelijke verschil in compactie significant. Figuur 5.25 en Figuur 5.26 geven het ruimtelijke verschil voor de compactie van 2013 tot 2023 voor het 30 bcm scenario en het 30 bcm A4 scenario. De compactie in dit tijdsinterval is maximaal 8 cm in het 30 bcm scenario voor het centrum van de kom. De verschillen tussen het 30 bcm en 30 bcm A4 scenario lopen op tot 2,5 cm in het centrale deel van de kom. Dit komt overeen met 31% van de maximum compactie. Verschillen tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario voor de periodes 2013-2016 en 2013-2018 zijn weergegeven in Appendix D.8.



Figuur 5.25 Compactie in m voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model voor het 30bcm scenario.



Figuur 5.26 Compactie verschil in m tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2023 met het RTCM model.

## 5.7 Discussie en conclusie

In deze paragraaf worden de belangrijkste conclusies gegeven voor de compactiemodellen, de overeenkomst tussen berekende en gemeten daling, de



bodemdalingsprognose, de compactie ten gevolge van de verschillende productiescenario's en de verschillen tussen de compactiemodellering van NAM en TNO-AGE.

#### 5.7.1 *Compactiemodellen en vergelijk van gemeten met berekende bodemdaling*

Ten aanzien van de compactiemodellen kunnen volgende conclusies worden getrokken:

- Het RTCM model (Rate Type Compactie Model) komt het beste overeen met de gemeten bodemdaling. In 2012 geeft het RTCM model in 78% van de peilmerken een verschil in gemeten en berekende bodemdaling die minder dan twee keer de standaardafwijking is. Voor het gelineariseerde isotachen is dat 74%, en voor het Time-Decay model 68%.
- Het gelineariseerde isotachenmodel komt qua gedrag sterk overeen met het RTCM model, met lateraal slechts 1,1 cm verschil in bodemdaling en 2 cm verschil in compactie tussen de twee modellen over de historische periode vanaf 1964 tot 2012.
- De parameterconversie van het RTCM naar het gelineariseerde isotachenmodel geeft goede resultaten. Zowel het RTCM model als het gelineariseerde isotachenmodel hebben 3 vrije parameters aangezien de laboratorium waarde voor de RTCM  $b$  parameter gebruikt kan worden als één van de input parameters.
- Het Time-Decay model geeft in vergelijking met de andere modellen minder daling in het centrum van de kom en meer aan de randen van het veld. Of, als de daling in het centrum van de kom gefit wordt aan de gemeten bodemdaling, zoals in het winningsplan Groningen, dan wordt de daling aan de rand sterk overschat.
- Het RTCM model en het gelineariseerde isotachenmodel reageren instantaan op een verandering in productiesnelheid doordat beide modellen een elastische component hebben. De kruipcomponent van de modellen reageert niet instantaan. Het Time-Decay model reageert niet instantaan op een verandering in productiesnelheid maar in plaats daarvan in een tijdspanne bepaald door de tijdsconstante van dit model.
- Het verschil tussen de gemeten en berekende bodemdaling is voor alle compactiemodellen het meest uitgesproken in het gebied rond Delfzijl en in het noordwesten van het veld, waar een te hoge bodemdaling berekend wordt. Gebruik van het zwakke aquifer scenario maakt de verschillen in het noordwesten erger.
- Een porositeitsreductie van 15% in een 4 km radius gebied rondom Delfzijl resulteert in een berekende bodemdaling die binnen twee keer de standaardafwijking van gemeten bodemdaling valt.
- De overschatting van de bodemdaling in het noordwesten kan slecht verklaard worden met een reductie in porositeit. Het verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt door breuken met een grote offset in het noordwesten op korte

afstand van elkaar, waardoor de berekende compactie overschat wordt. De porositeit is diepte afhankelijk waardoor sterke veranderingen over breuken kunnen plaatsvinden. Gezien de gebruikte interpolatie van porositeiten tussen putten zitten er geen abrupte veranderingen in porositeiten over breuken in het model.

### 5.7.2 Bodemdalingsprognose

- De maximum nog te verwachten bodemdaling vanaf 2013 tot 2080 is 17 cm, berekend met het RTCM model. De vorm van de nog te verwachten bodemdaling berekend met het RTCM model lijkt op die in het winningsplan Groningen, met het verschil dat de contouren in het centrum buiten die van de NAM liggen en aan de rand erbinen in overeenkomst met de conclusies ten aanzien van het Time-Decay model dat de daling aan de rand overschat en in het centrum onderschat. De verschillen met de NAM contourkaart zijn maximaal ongeveer  $\pm 1$  cm.
- Het RTCM model geeft als maximum bodemdaling 39,2 cm in 2025, 45,3 cm in 2050: en 46,7 cm in 2080.

### 5.7.3 Compactie en compactieprognose

- De compactie tussen 2013 en 2023 berekend met het RTCM model en gelineariseerde isotachenmodel lijken sterk op elkaar voor alle productiescenario's. Er zijn geen significante verschillen in deze tijdsperiode. Vanaf 2023 laat het RTCM model meer compactie zien door de hogere kruipsnelheid in vergelijking met het gelineariseerde isotachenmodel.
- De compactie tussen 2013 en 2023 in het Time-Decay model is hoger dan die in het RTCM model voor het productie stop scenario. Voor het 10 bcm scenario is de compactie ongeveer gelijk en voor de hogere productiesnelheden is de compactie met het Time-Decay model lager.
- De variatie in cumulatieve compactie in de periode 2013-2023 voor de verschillende productiescenario's is ongeveer 30 miljoen  $m^3$  met het RTCM model en 17 miljoen  $m^3$  met het Time-Decay model. De variatie tussen de alternatieve 30bcm scenario's onderling is met het RTCM model ongeveer 5 miljoen  $m^3$  en 2,5 miljoen  $m^3$  met het Time-Decay model.
- Het Time-Decay model laat een kleinere variatie zien in compactie voor de verschillende productiescenario's dan de andere modellen. Dit is het gevolg van de tijdsconstante die ervoor zorgt dat het een periode van 5-15 jaar duurt voordat het model reageert op veranderingen in productie.
- Het 30bcmA4 scenario, waarbij de productie 30 bcm/jaar is en vijf clusters rondom Loppersum niet produceren vanaf 1-1-2014, geeft tot 31% minder compactie in het centrum van de kom in de periode 2013-2023 in vergelijking met het 30bcm scenario, waarbij de productie 30 bcm/jaar is met de normale productiefilosofie.
- De compactie berekend door NAM met het Time-Decay model is groter dan de compactie met het Time-Decay model zoals door TNO-AGE gebruikt is, en ook

groter dan de met het RTCM model berekende compactie. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat NAM in het winningsplan de parameters voor het Time-Decay model zo gekozen heeft dat de maximum bodemdaling gefit wordt. In deze TNO-AGE analyse met Red Flag is de gemiddelde beste fit bepaald.

#### 5.7.4 *Verschillen compactiemodellering NAM/TNO-AGE*

- De beste parameters voor het Time-Decay model zoals bepaald door NAM zijn een vermenigvuldigingsfactor op de compactie coëfficiënt van 0,45 en een tijdsconstante van 7,3 jaar. Met deze getallen wordt de maximum bodemdaling in 2012 goed benaderd.
- De parameters die, volgens de hier gebruikte methode, de beste fit met gemeten daling opleveren zijn 4,85 jaar voor de tijdsconstante en 0,53 als vermenigvuldigingsfactor op de compactiecoëfficiënt.
- Als de implementatie van de modellen identiek zou zijn zou men verwachten dat met een kleinere tijdsconstante (4,85 tegen 7,3 jaar) en een slapper materiaalgedrag (vermenigvuldigingsfactor 0,53 tegen 0,45) de in deze studie berekende bodemdaling groter zou moeten zijn dan die bepaald door NAM. Echter, het omgekeerde is het geval zoals uit voorgaande conclusies blijkt.
- Het verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het verschil in opschaling van het model. In de TNO-AGE aanpak wordt eerst de compactie berekend voor iedere gridcel en daarna de totale compactie in één kolom van het grid. In de NAM aanpak wordt de porositeit eerst gemiddeld over één kolom van het grid, en op basis van die porositeit wordt een compactiecoëfficiënt bepaald uit de trendlijn  $c_m(\varphi)$ . Omdat deze trendlijn niet-lineair is kan dit verschillen opleveren in compactiecoëfficiënt en in de voor een kolom berekende compactie.

## 6 Geomechanische modellering

### 6.1 Introductie

In dit hoofdstuk worden de resultaten samengevat van de analyse van de (ruimtelijke en tijdsafhankelijke) relatie tussen geologie, breukconfiguratie, reservoir drukken, reservoir compactie en de geïnduceerde seismiciteit in het Groningen gasveld. In deze analyse is gebruik gemaakt van de volgende gegevens:

- Het 3D Petrel model met ruimtelijke informatie over de positie van de geologische eenheden en de 3D-configuratie van de belangrijkste breuken in het gebied. Het 3D-Petrel breukenmodel bevat 707 van de in totaal 1579 breuken, die op basis van seismische data zijn gekarteerd op reservoir niveau. De strekking van de breuken in het model varieert per ('pijler') locatie, de helling van de breuken in het model is constant over de gehele dikte van het reservoir. De extensie van de breuken in de onder- en bovenliggende lagen is niet in kaart gebracht; er is weinig detail-informatie beschikbaar over het voorkomen van breuken boven en onder het Rotliegend reservoir.
- MoRes reservoir model ('history-match' op basis van productie- en drukgegevens tot 2012). Het model geeft informatie over de tijdsafhankelijke en ruimtelijke ontwikkeling van de drukken in het reservoir en de positie van het gas-water contact. Bij de huidige analyse is uitgegaan van reservoirdrukken, verticaal gemiddeld over de dikte van het reservoir.
- Compactie model, beschreven in Hoofdstuk 5. Het compactie model geeft informatie over de ruimtelijke en tijdsafhankelijke compactie van het reservoir gesteente. In de huidige analyse wordt steeds uitgegaan van de resultaten van het 'rate-type' compactiemodel ((RTCM), dat is gecalibreerd aan de waargenomen bodemdaling tot begin 2012).

In Paragraaf 6.2 wordt op basis van de geometrie (oppervlakte) van de breuken in het 3D Petrel-model een schatting gemaakt van de maximale fysische magnitude die in het Groningen veld kan optreden. In Paragraaf 6.3 worden (ruimtelijke en tijdsafhankelijke) relaties tussen de waargenomen seismiciteit, de depletie en de compactie van het reservoir, en de geometrie (breukverzet) en oriëntatie van de breuken geanalyseerd.

### 6.2 Maximale magnitudes afgeleid uit geometrie van breuken in het Groningen gasveld

Het seismisch moment van een aardbeving kan worden berekend uit de volgende relatie (Aki, 1972):

$$M_0 = G * A * d$$

waarbij  $M_0$  het seismisch moment (Nm),  $A$  ( $m^2$ ) het oppervlak van de breuk dat tijdens de beving verschuift,  $G$  de schuifmodulus (Pa) en  $d$  (m) de gemiddelde verplaatsing over het gereactiveerde breukoppervlak is.

Voor de statische spanningsafname (de zogenaamde 'stress drop') van een aardbeving geldt de volgende relatie (Aki, 1972):

$$\Delta\sigma = c \frac{Gd}{\sqrt{A}}$$

waarbij  $\Delta\sigma$  (Pa) de statische spanningsafname is en  $c$  (-) een factor voor de geometrie van de breuk (-).

De combinatie van bovenstaande vergelijkingen geeft:

$$\Delta\sigma = c \frac{M_0}{A^{1.5}}$$

Voor een rechthoekige 'dip-slip' breuk, met een lengte  $L$  (m) en een breedte  $w$  (m) (en  $w < L$ ) wordt de geometrie factor  $c$  gegeven door (Starr, 1928):

$$c = \left(\frac{16}{3\pi}\right) \left(\frac{L}{w}\right)^{\frac{1}{2}}$$

De statische spanningsafname van aardbevingen wereldwijd (zowel tektonische als geïnduceerde bevingen) liggen binnen een range van 0,1 – 100 MPa (Kanamori en Anderson, 1975). De spanningsafnames door geïnduceerde aardbevingen liggen gemiddeld wat lager dan de spanningsafnames door tektonische bevingen: spanningsafnames door geïnduceerde aardbevingen zijn veelal lager dan 10 MPa (zie bijvoorbeeld Haak et al., 2001; Dost et al., 2012; Dahm et al., 2007; Cesca et al., 2011). Uitgaande van deze waarden voor de spanningsafname door geïnduceerde aardbevingen en gebruikmakend van bovenstaande formules, kan op basis van de oppervlaktes van de breuksegmenten in het 3D Petrel model het seismisch moment berekend worden. De (moment) magnitude  $M_w$  van de aardbevingen kan vervolgens berekend worden uit de volgende formule (Hanks en Kanamori, 1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.07$$

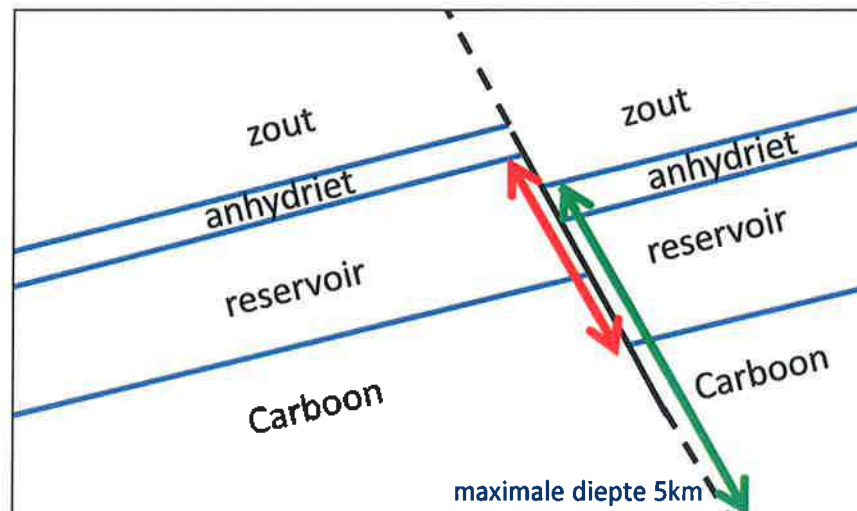
Uit het 3D Petrel model zijn, met behulp van een geautomatiseerde workflow, de breukoppervlaktes van de verschillende breuken op twee manieren berekend (zie Figuur 6.1 voor de 2 manieren van berekening van breuk-parameter  $w$ ):

- Set 1: Het totale oppervlak van de breuk dat grenst aan het reservoirgesteente (oppervlakte beschikbaar tussen onderkant en top van het Rotliegend);
- Set 2: De oppervlakte van de breuksegmenten tussen de onderkant van het Zechstein steenzout en een diepte van 5000 m.

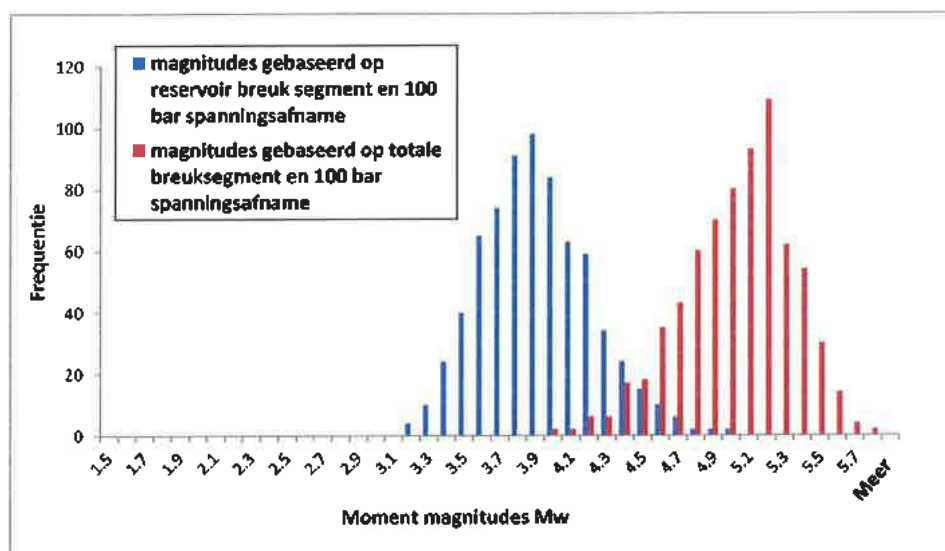
Boven het Rotliegend reservoir en de Zechstein basale anhydriet ligt een dik pakket Zechstein steenzout. Het steenzout wordt gekenmerkt door hoge horizontale spanningen (isotrope spanningscondities ten gevolge van kruip). Het is niet waarschijnlijk dat er in het steenzout grootschalige breukstructuren aanwezig zijn (relaxatie van schuifspanningen). Het wordt daarmee niet waarschijnlijk geacht dat er in het steenzout tijdens een aardbeving grote breukoppervlakten gereactiveerd worden. Over de extensie van de breuken in het Carboongesteente onder het Rotliegend reservoir is weinig bekend, omdat seismische data voor dit dieptebereik schaars zijn. In de geologische profielen in Kombrink (2008) worden breuken geïnterpreteerd tot de top van het Carbonaat platform, gelegen op een diepte van

circa 5000m. Bij de berekeningen van de maximale magnitude is voor set 2 aangenomen dat de breuken kunnen doorlopen tot een diepte van 5000 m.

Figuur 6.1 laat zien dat in het eerste geval (set 1) wordt aangenomen dat de verplaatsing/slip langs de breuk tijdens een aardbeving beperkt blijft tot het breukoppervlak direct grenzend aan het reservoirgesteente en dat de spanningsveranderingen (Coulomb spanningsveranderingen) niet groot genoeg zijn om de breuk buiten het reservoir (over een significant gedeelte) te reactiveren. In het tweede geval (set 2) wordt aangenomen dat ook het oppervlak van de breuk buiten het reservoir volledig gereactiveerd kan worden (Figuur 6.1). Op basis van de aanname van een maximale diepte van 5000 m, de gegevens over de top van het Rotliegend reservoirgesteente uit Petrel, een dikte van 50 m voor de basale Zechstein anhydrietlaag en de gemiddelde helling van de breuk uit Petrel, kan vervolgens een maximale oppervlakte per breuksegment berekend worden. De breukoppervlaktes zijn vervolgens gebruikt door op basis van vergelijking 1) en 2) het seismisch moment  $M_0$  en de moment magnitude  $M_w$  af te leiden. Hierbij is uitgegaan van een schuifmodulus  $G$  voor het reservoirgesteente van 10 GPa.



Figuur 6.1 Berekening van de parameter 'w' van de breuken in het Petrel breukmodel. Set 1 gaat uit van de breedte  $w$  van het breuksegment dat grenst aan het reservoirgesteente (rode pijlen). Set 2 gaat uit van de breedte  $w$  van het breuksegment, gemeten vanaf onderkant Zechstein zout tot een diepte van 5 km (groene pijlen).



Figuur 6.2 Moment magnitudes ( $M_w$ ) berekend voor twee sets van breukoppervlaktes uit het 3D Petrel model: Magnitudes van set 1 (blauw) zijn gebaseerd op het oppervlak van de breuken dat grenst aan reservoir gesteente; magnitudes van set 2 (rood) zijn gebaseerd op het totale oppervlakte van de breuken onder het Zechstein steenzout, onder aanname dat de breuken doorlopen tot een diepte van 5000 m beneden maaiveld. Magnitudes zijn berekend voor een spanningsafname van 100 bar (10 MPa) en een schuif modulus van 10GPa.

Het langste aaneengesloten breuksegment in het Groningen veld heeft een lengte van circa 23 km (Figuur E.1.1 in Appendix E.1). Op basis van het maximale oppervlak van deze breuk wordt onder de eerste aanname (set 1) een maximale magnitude van  $M_{\max} = 5,0$  berekend. Onder de tweede aanname (set 2) wordt voor het langste breuksegment een maximale magnitude van  $M_{\max} = 5,8$  berekend.

Bovenstaande analyse gaat ervan uit dat de verschillende breuksegmenten in het Petrel model afzonderlijk gereactiveerd worden en dat de verplaatsingen tijdens een aardbeving beperkt blijven tot één breuksegment. Het kan echter niet worden uitgesloten dat meerdere breuksegmenten oplijnen en gelijktijdig tijdens een aardbeving gereactiveerd worden. Uitgaande van een maximale lengte van 45 km (gebaseerd op de maximale NNW-ZZO dimensie van het Groningenveld) en een maximale waarde voor de hoogte van het breuksegment van 2 km (tussen basis gesteentezout en een diepte van 5000 m) wordt op basis van bovenstaande formules voor een gemiddelde stress drop van 10 MPa een maximale magnitude van  $M_{w, \max} = 5,9$  berekend. In NAM (2013a,b) wordt op basis van de dimensies van de breuken een  $M_{\max}$  van 5,8 berekend. Dit komt goed overeen met de hier gevonden waarde voor de maximale fysische magnitude. Hierbij moet worden opgemerkt dat de kans op het optreden van de fysisch maximale magnitude nul is.

In bovenstaande berekeningen zijn geen restricties opgelegd aan de aspect ratio's van het gereactiveerde breukoppervlak; dit resulteert in een mogelijke overschatting van de magnitudes. Voor het merendeel van de natuurlijke aardbevingen ligt de geometrie factor  $c$  in het interval 2,4-5,0. Over de maximale aspect ratio's en geometrie factoren specifiek voor geïnduceerde seismiteit is weinig bekend. Dit heeft de potentie om de schatting voor de fysisch maximale magnitude te verlagen.

### 6.3 Ruimtelijke analyse van geïnduceerde seismiciteit

In een eerder advies van TNO-AGE in 2009 (TNO, 2009) werden aanwijzingen voor correlaties gevonden die mogelijk een aanknopingspunt bieden voor nadere detaillering van het seismisch hazard boven het Groningen veld. Deze aanwijzingen bestonden uit:

- Correlatie tussen de hypocentra van de trillingen en de locatie van de twee breuksystemen in het Groningen veld.
- Correlatie tussen de mate van breukverzet en het voorkomen van seismiciteit.
- Aanwezigheid van steenzout langs delen van de randbreuken met weinig seismiciteit.
- Een zone waar de Onder Slochteren Zandsteen waarschijnlijk niet mee geproduceerd wordt.

In dat advies werd aanbevolen om de relatie tussen geïnduceerde seismiciteit in het Groningen veld en de bovengenoemde aspecten in meer detail te analyseren op basis van een geactualiseerde versie van het NAM *field review* model. Nu zowel het statisch- (Hoofdstuk 2) als het dynamisch (Hoofdstuk 3) model beschikbaar is, is het mogelijk om deze correlaties verder te analyseren.

In de navolgende sectie wordt ingegaan op de ruimtelijke- en/of tijdsafhankelijke relatie tussen de geobserveerde seismiciteit in het Groningen veld enerzijds, en de depletie van het reservoir, de compactie van het reservoirgesteente, het verzet van de breuken en de initiële spanningscondities (reactivatie potentieel of 'slip tendency') op de breuken in het reservoir anderzijds.

#### 6.3.1 *Seismiciteit versus depletie van het reservoir*

In Figuur E.2.1 in Appendix E.2 worden de depletiedrukken (verticaal over het reservoir gemiddelde waarden van drukverlaging ten opzichte van de initiële druk) voor eind 2012 en de belangrijkste breuken in het Groningen veld weergegeven. Uit Figuur E.2.1 kan worden afgeleid dat de depletie van het reservoir ruimtelijk gezien redelijk uniform is. De depletiedrukken (op tijdstip eind 2012) variëren van circa 220-250 bar in het centrum en het zuidwestelijke deel van het veld tot minder dan 140 bar aan de randen van het veld. Drukgradiënten in het reservoir en drukverschillen over breuken zijn overwegend klein, met uitzondering van de drukverschillen over enkele grote breuken aan de randen van het veld, gekenmerkt door een groot verzet langs de breuken en juxtapositie van reservoirlagen tegen het Zechstein steenzout. Er zijn geen duidelijke aanwijzingen voor de aanwezigheid van niet- of nauwelijks gedepleteerde reservoir compartimenten in het centrum van het gasveld.

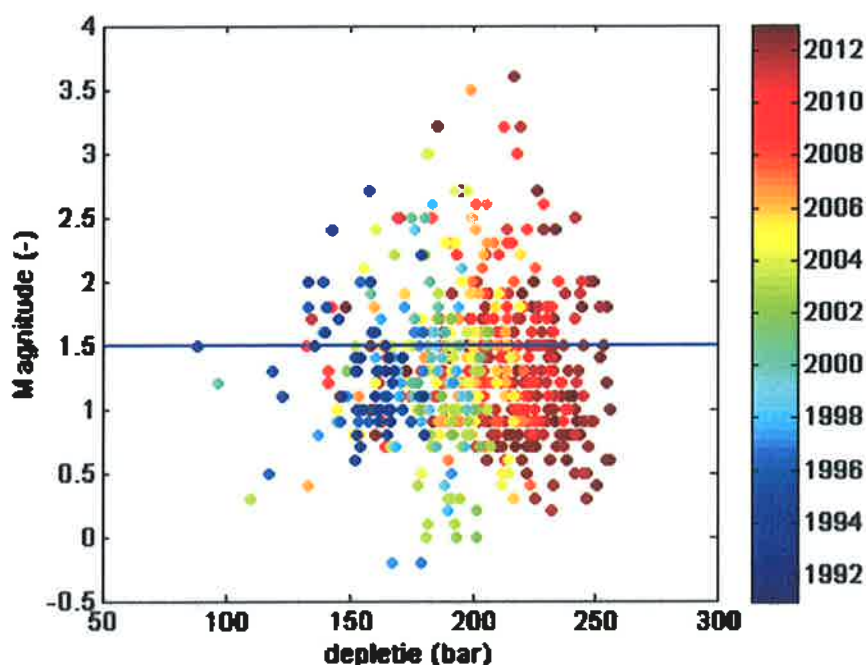
Figuur E.2.1 toont tevens de locaties van de aardbevingen in het Groningen veld, geregistreerd vanaf 1991 tot 2013. De meeste bevingen zijn geregistreerd in de gebieden met hogere drukdepletie, in het centrum van het veld en het zuidwestelijke deel van het veld. In 1995 heeft een uitbreiding van het monitorings-netwerk van KNMI plaatsgevonden; sindsdien is de completiemagnitude  $M_C$  (magnitude waarbij de seismische catalogus compleet is) gelijk aan  $M_L=1,5$ .

Figuur 6.3 geeft de relatie weer tussen de verticaal gemiddelde drukdepletie in de loop van de tijd versus de magnitude van de bevingen. De depletiedruk is

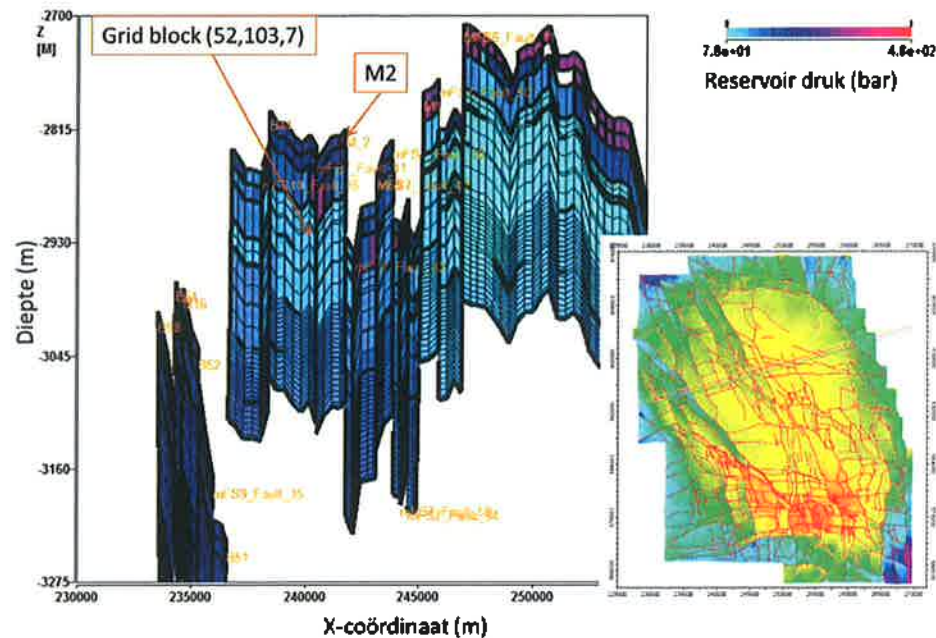


uitgelezen op het tijdstip van de aardbeving uit de MoRes gridcel die het dichtst bij de locatie van de beving is gelegen. Figuur 6.3 toont een duidelijke toename in de magnitudes van de bevingen met toenemende depletie van het reservoir. In de figuur zijn alle bevingen binnen de contouren van het Groningen veld geplot van 1991 tot februari 2013.

Hierbij wordt opgemerkt dat lokale drukverschillen tussen slecht doorlatende lagen zoals de Ten Boer kleilaag aan de top van het reservoir en de goed doorlatende reservoir zandsteen in Figuur E.2.1 en Figuur 6.3 niet naar voren komen. Figuur 6.4 toont een verticale doorsnede uit MoRes voor het tijdstip eind 2012. De drukdepletie van de Ten Boer kleilaag loopt achter op de drukdepletie van de goed doorlatende Slochteren zandsteen. Bij juxtapositie van de reservoir zandsteen tegen de Ten Boer kleilaag zijn lokaal grotere drukverschillen over de breuk aanwezig. Daarnaast kunnen lokale drukverschillen in het Carboon onder het reservoir gesteente aanwezig zijn. Lokale drukverschillen leiden tot meer spanningen langs de breuken zoals uitgewerkt in latere paragrafen van dit hoofdstuk.



Figuur 6.3 Magnitudes van aardbevingen versus depletiedruk in het reservoir. De kleurschaal geeft het tijdstip weer waarop de bevingen plaatsvonden. De blauwe lijn op  $M=1,5$  toont de magnitude van completie (Magnitude waarboven de catalogus compleet is sinds 1996).



Figuur 6.4 Reservoir drücken in MoRes voor het tijdstip eind 2012, weergegeven voor een verticale WZW-ONO doorsnede door het Loppersum gebied. Relatief hoge drücken aan de top van het reservoir (roze en paarse kleurcodering) zijn drücken in de Ten Boer kleilaag. Bij juxtapositie van de Ten Boer kleilaag tegen goed doorlatende reservoir zandsteen zijn lokaal significante drukverschillen over de breuken aanwezig.

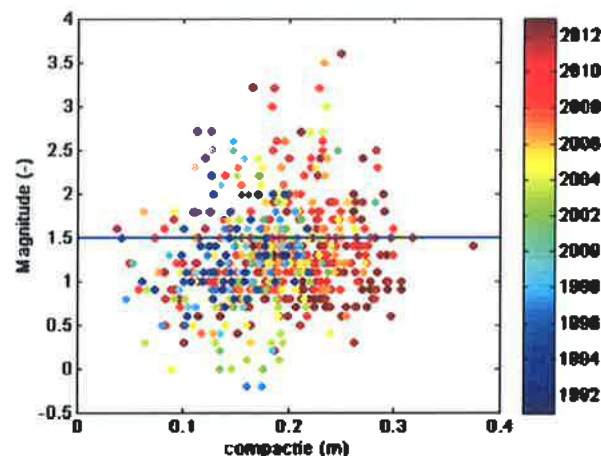
### 6.3.2 Seismiciteit versus compactie van het reservoirgesteente

De ruimtelijke- en tijdsafhankelijke relatie tussen compactie van het reservoir en geïnduceerde seismiciteit vormt één van de belangrijkste componenten van de seismische hazard analyse van het Groningen veld, toegepast door NAM (NAM, 2013a,b). In deze sectie wordt kort ingegaan op de ruimtelijke- en tijdsafhankelijke relatie tussen compactie en seismiciteit. Een meer gedetailleerde analyse van deze relatie, de bepaling van de zogenaamde 'partiticoëfficiënt' (NAM, 2013a,b) en de consequenties voor de seismische hazard analyse voor het Groningen veld wordt behandeld in Hoofdstuk 7.

Appendix E.3 toont een overzicht van geregistreerde seismiciteit en de gemodelleerde cumulatieve compactie van het reservoirgesteente, berekend met het rate-type-compactie model (RTCM) op zes tijdstippen. Daarnaast wordt voor elk tijdstip de seismiciteit getoond, die vanaf het begin van productie van het gasveld tot het specifieke tijdstip is geregistreerd. Uit de kaarten kan globaal worden afgeleid dat het gebied waar de aardbevingen geregistreerd worden meegroeit met het gebied waar ook de meeste compactie optreedt. Er zijn echter ook een paar uitzonderingen te zien: direct ten noorden van het centrale gebied met de meeste cumulatieve compactie, ligt een gebied met relatief lage cumulatieve compactie: minder dan 20 cm compactie voor eind 2012, ten opzichte van meer dan 30 cm compactie voor eind 2012 in de omliggende gebieden. In dit gebied zijn ondanks de beperkte cumulatieve compactie van het reservoir relatief veel aardbevingen geregistreerd.

In het noorden en oosten van het gasveld liggen gebieden met relatief hoge cumulatieve compactie (meer dan 30 cm), waar tot nu toe geen tot nauwelijks aardbevingen met  $M > M_C$  zijn geregistreerd. De breukdichtheid is hier relatief laag, wat een verklaring kan zijn voor de beperkte seismiciteit die hier is waargenomen.

Figuur 6.5 geeft een cross-plot van de gemodelleerde cumulatieve compactie (RTCM-model) en de magnitude van de bevingen. De figuur toont een duidelijke trend van toenemende magnitude van de bevingen met toenemende cumulatieve compactie. Magnitudes  $M_L = 3,0$  zijn geregistreerd bij verticale cumulatieve compacties van 16 cm en meer.



Figuur 6.5 Magnitudes van aardbevingen versus (gemodelleerde) cumulatieve compactie van het reservoir (RTCM-model). De kleurschaal geeft het tijdstip van de bevingen weer.

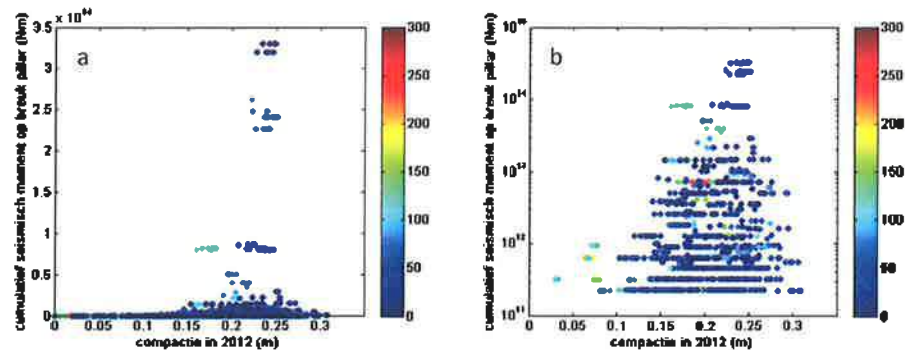
### 6.3.3 Relatie breuken en seismiciteit

#### 6.3.3.1 Verzet langs de breuken

In eerdere 2D- en 3D modelstudies (Roest en Kuilman, 1994; Mulders, 2003; Orlic en Wassing, 2012) is aangetoond dat de spanningsontwikkeling op de breuken tijdens depletie van het reservoir, het moment (depletie) waarop de breuken gereactiveerd worden en de uiteindelijke verplaatsingen op de breuken sterk afhangt van het verzet van het reservoir gesteente langs de breuken.

Middels een geautomatiseerde workflow is in het 3D-Petrel breukenmodel, op de locatie van alle individuele breuk 'pijlers', het verzet bepaald van de top van het Rotliegend reservoir. Figuur E.2.1 geeft het verzet van de 707 breuken in het Groningen veld weer. Het verzet van de breuken in het gebied waar de meeste seismiciteit is geregistreerd is over het algemeen minder dan 150-200 m. Op de grote randbreuken van het Groningen veld komen breuk verzetten van honderden meters voor. Op het eerste gezicht is er geen duidelijk verband tussen het verzet van de breuk en seismiciteit waar te nemen.

Naast het breukverzet is voor alle breuken in het Petrel breukenmodel, voor elke pijler op de breuk, het cumulatieve seismische moment bepaald van de aardbevingen in de directe omgeving van de pijler. Voor de bepaling van het seismisch moment zijn alle aardbevingen geselecteerd, die binnen een straal van 500 m van de breuk pijler liggen. De keuze van 500 m is gebaseerd op de onzekerheid in horizontale plaatsbepaling (500 m) van de aardbevingen (informatie KNMI). Daarnaast is voor alle pijlers de cumulatieve compactie op het tijdstip van de beving, in de dichtstbij gelegen gridcel van het RTCM model bepaald. Figuur 6.6 geeft de resultaten van deze analyse weer.



Figuur 6.6 Plot van de relatie tussen het verzet van de breuken, het cumulatief seismisch moment van de bevingen eind 2012 en de cumulatieve compactie (RTCM) berekend voor 2012. a) lineaire schaal voor verticale as seismisch moment b) logaritmische schaal voor verticale as seismisch moment. Kleurcodering geeft het verzet van de breuken weer.

Uit Figuur E.2.1 en Figuur 6.6 kan worden afgelezen dat de meeste seismiciteit tot nu toe is vrijgekomen nabij breuken met een verzet van minder dan 150 meter: Dit zijn tevens de breukstructuren die dominant voorkomen in het centrum van het Groningen veld waar de cumulatieve compactie het grootst is. De horizontale oprijning van punten wordt veroorzaakt doordat eenzelfde aardbeving verschillende keren gesampled kan worden op meerdere pijlers binnen een straal van 500m van de beving. Het beeld in Figuur 6.6a wordt sterk gedomineerd door de enkele zwaardere aardbevingen die zijn opgetreden in centrum van het compactie gebied in het Groningen veld. Figuur 6.6b geeft meer informatie over de relatie tussen verzet en seismisch moment voor de lagere magnitudes.

Voor grote breukverzetten (groter dan de reservoirdikte + circa 50 m dikte van de Zechstein basale anhydrietlaag) geldt dat het hoger gelegen reservoir zal grenzen aan het Zechstein gesteentezout (of eventuele anhydriet-'floaters'). Verwacht wordt dat de kans op het optreden van seismische slip op dit gedeelte van de breuken kleiner is door de relaxatie van de schuifspanningen in het gesteentezout en de hoge horizontale spanningen in het Zechstein gesteentezout ten gevolge van de isotrope spanningscondities in het zout.

#### 6.3.4 Seismiciteit versus reactivatie potentieel van de breuken

Het initiële reactivatie potentieel ('slip tendency' ST (-)) van een breuk geeft de initiële verhouding van de schuifspanning en de effectieve normaalspanning op het breukvlak vóór depletie van het reservoir:

$$ST = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

waarbij  $\sigma_n$  de effectieve normaalspanning op de breuk is en  $\tau$  de schuifspanning op de breuk.

De sterkte van een breuk kan worden beschreven door het 'Mohr Coulomb sterkte' criterium:

$$\tau_{max} = C + \sigma_n \tan \phi$$

waarbij C de cohesie (Pa),  $\phi$  de frictiehoek (°) en  $\tau_{max}$  de schuifspanning (Pa) is, waarop de sterkte van de breuk wordt overschreden en 'failure' of slip op de breuk optreedt. Voor een cohesieloze breuk (C=0 Pa) met een frictiehoek van 30° (Byerlee, 1978) treedt slip op bij een reactivatie potentieel waarde van ST=0,6.

Op basis van gegevens over de oriëntatie (strekking en hellingshoek) van de breuken in het 3D Petrel model is het reactivatie potentieel van alle breuksegmenten ter plaatse van de breukpijlers berekend. Hierbij is uitgegaan van de gegevens voor het regionale spanningsveld gerapporteerd in NAM (2013b), samengevat in Tabel 6.1. Het initiële reactivatie potentieel van de breuken geeft een eerste indicatie hoever de spanningen op de breuk verwijderd liggen van het Mohr Coulomb sterkte criterium. Het reactivatie potentieel van de breuken wordt berekend op basis van het regionale spanningsveld en de oriëntatie van de breuken in dit spanningsveld: spanningscondities op breuken kunnen echter lokaal sterk beïnvloed zijn door bijvoorbeeld drukverschillen, geometrische effecten, stijfheidsverschillen tussen lagen en aanwezigheid van gesteentezout. Steenzout veroorzaakt hoge normaalspanningen door isotrope spanningscondities in het zout en relaxatie van schuifspanningen.

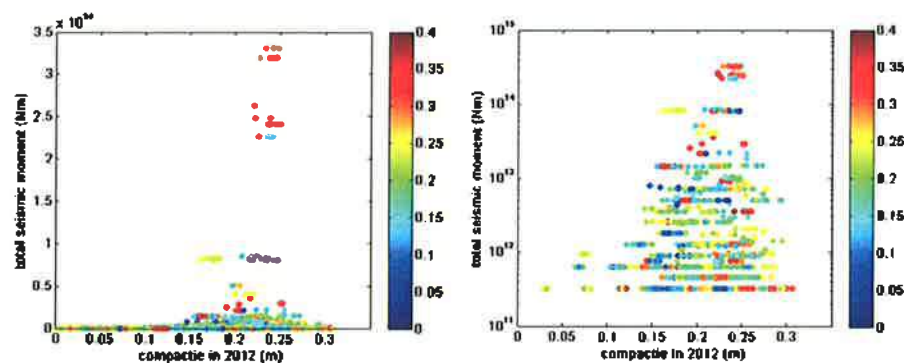
Tabel 6.1 Gradiënten van horizontale en verticale spanning, gebaseerd op NAM (2013b).

Verticale totaalspanning $S_v$	Gradiënt 2,14 bar/m
Minimale horizontale spanning ( $S_{hmin}$ )	Gradiënt 1,74 bar/m
Maximale horizontale spanning ( $S_{hmax}$ )	Gradiënt 1,60 bar/m
Waterspanning ( $P_p$ )	Gradiënt 1,16 bar/m
Oriëntatie $S_{hmax}$	160°

In Figuur E.4.1 wordt het initiële reactivatie potentieel van de breuken in het 3D Petrel model weergegeven. Het initiële reactivatie potentieel is berekend op de locatie van de breukpijlers, op de diepte van de top van het reservoir. Uit de figuur blijkt dat het reactivatie potentieel van de NNW-ZZO georiënteerde breuken gemiddeld iets hoger ligt dan het reactivatie potentieel van de O-W georiënteerde breuken, maar het verschil is niet groot. (De verschillen tussen  $S_{hmax}$  en  $S_{hmin}$  zijn relatief klein, en het is daarmee met name de helling van de breuk die het reactivatie potentieel bepaalt). Het maximale reactivatie potentieel voor de breuken

is circa 0,4, Zoals eerder vermeld zal reactivatie van een cohesieloze breuk met een frictie coëfficiënt van  $\mu=0,6$  pas optreden wanneer de verhouding van de schuifspanning en effectieve normaalspanning gelijk aan 0,6 is. Het initiële reactivatie potentieel berekend voor de breuken in het Groningen veld valt ruim onder deze waarde. Dit betekent dat de breuken in het initiële spanningsveld niet kritisch gestresst zijn.

Naast het reactivatie potentieel is in Figuur 6.7 voor alle breuken in het Petrel breukenmodel, voor elke pijler op de breuk, het cumulatieve seismische moment bepaald van de aardbevingen in de directe omgeving van de pijler met de eerder beschreven methode. Daarnaast is voor alle pijlers de cumulatieve compactie op het tijdstip van de beving, in de dichtstbij gelegen gridcel van het RTCM model bepaald. In deze methode kan een aardbeving 'gesampled' worden op meer dan één pijler (horizontale oplijning van datapunten). In de figuur wordt alleen het seismisch moment getoond van bevingen binnen een afstand van 500 m van een breuk. Figuur 6.7 toont dat het hoogste seismisch moment niet per definitie kan worden gerelateerd aan de breuken met het hoogste reactivatie potentieel.



Figuur 6.7 Plot van de relatie tussen het totaal vrijgekomen seismisch moment (op een breuk pijler), reservoircompactie en berekende initiële reactivatie potentieel van de breuken. a) lineaire schaal voor verticale as seismisch moment b) logaritmische schaal voor verticale as seismisch moment. Kleurcodering geeft reactivatie potentieel.

#### 6.3.4.1 Depletieconstante

In theorie kan het spanningspad en de ontwikkeling van de verticale effectieve en horizontale reservoirspanning tijdens depletie (voor een horizontaal oneindig uitgestrekt reservoir) worden afgeleid uit de zogenaamde depletieconstante van het reservoir, waarbij (Mulders, 2003):

$$\begin{aligned}\Delta\sigma'_v &= -\alpha\Delta p \\ \Delta\sigma'_h &= -(\alpha - \gamma_h)\Delta p\end{aligned}$$

met  $\alpha$  Biot's coëfficiënt (-),  $\Delta\sigma'_v$  (MPa) de verandering in verticale effectieve spanning,  $\Delta\sigma'_h$  (MPa) de verandering in horizontale effectieve spanning,  $\Delta p$  de drukverandering (MPa) en  $\gamma_h$  de depletieconstante van het reservoir. De depletieconstante wordt gegeven door:

$$\gamma_h = \alpha \frac{(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

met  $\nu$  (-) de Poisson ratio van het reservoirgesteente.

De onzekerheid in de depletieconstante van het reservoir is echter groot. Hettema (2000) noemt depletieconstanten op basis van een beperkt aantal veldmetingen in de range van 0,4-0,6 en uni-axiale depletieconstanten op basis van experimentele data in de range van 0,9 +/- 0,1. Het is niet mogelijk op basis van deze theorie en de grote onzekerheden in depletieconstante af te leiden of drukdepletie zal leiden tot meer stabiele of minder stabiele spanningscondities op de breuken. Daarnaast is er geen sprake van eendimensionale compactie in een horizontaal uitgestrekt reservoir, maar zullen effecten zoals het verzet van het reservoir langs breuken, stijfheidsverschillen, drukverschillen en niet-elastische deformatie van het reservoir, het spanningspad in het reservoir lokaal sterk kunnen beïnvloeden.

#### 6.3.4.2 Observaties van seismiciteit in negen structurele regio's

In Figuur E.5.1 in Appendix E.5 worden op basis van de structureel geologische kenmerken van het Groningen gasveld negen verschillende structurele regio's onderscheiden ( ). Tabel 6.2 geeft een overzicht van de belangrijkste door TNO-AGE bepaalde kenmerken van deze structurele regio's, in termen van breuklengte (km), breukdichtheid ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) en de gemiddelde breuk reactivatiepotentieel van de regio's. In Figuur E.5.1 wordt tevens de waargenomen seismiciteit getoond. De meeste seismiciteit heeft tot nu toe plaatsgevonden in regio 1 (noordoostelijke deel), regio 4, regio 5 en regio 7. De regio's 4 en 6 worden gekenmerkt door een relatief lage breukdichtheid ( $0,008$  en  $0,007 \text{ m}/\text{m}^2$ ). Regio 1, 5, 8 en 9 kennen een relatief hoge breukdichtheid. De variatie in breuk reactivatie potentieel is laag; door de min of meer isotrope spanningscondities voor  $S_{H\max}$  en  $S_{H\min}$  wordt de breukreactivatiepotentieel grotendeels bepaald door de helling van de breuken, minder sterk door de strekking van de breuken.

Tabel 6.2 Overzicht belangrijkste kenmerken structurele regio's Groningen veld.

Structurele regio	Breuklengte (km)	Breukdichtheid ( $\text{km}/\text{km}^2$ )	Breuk reactivatie potentieel (-)
1	370	1,6	0,17
2	68	1,1	0,25
3	150	1,2	0,20
4	100	0,8	0,22
5	150	1,6	0,21
6	130	0,7	0,22
7	270	1,2	0,21
8	110	1,6	0,20
9	210	1,4	0,23

#### 6.4 2D geomechanische modellering

In NAM (2013a,b) wordt er bij de berekening van de fysische bovengrens voor  $M_{\max}$  vanuit gegaan dat het totaal beschikbare reservoir moment (berekend uit het totale compactievolume voor het gehele Groningen veld) vrij kan komen in één enkele event ( $M_{\max}$ ). Dit houdt in dat de spanningen op de breuken beïnvloed kunnen worden door compactie van het reservoir op grote afstand van de breuk. Dit lijkt zeer onrealistisch. Met behulp van schematische 2D geomechanische modellen wordt geanalyseerd in hoeverre deze aanname realistisch is, en welk deel van de reservoir compactie nog bijdraagt aan de spanningsveranderingen op de breuk.

In de seismische hazard analyse wordt het compactie volume in het reservoir ( $\Delta V_{res}$  in  $m^3$ ) omgerekend naar een reservoir moment (RM in Nm), via Kostrov's vergelijking (Kostrov, 1974):

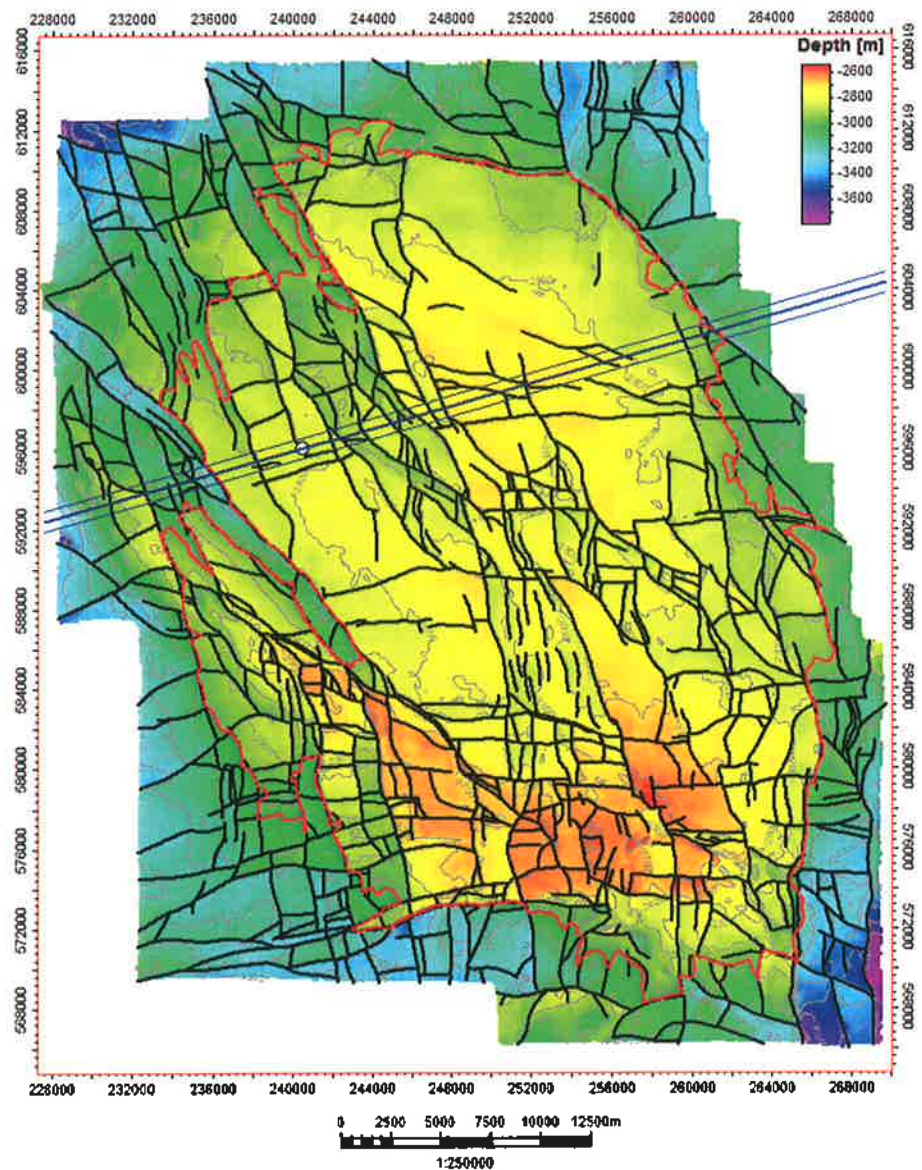
$$RM = 2G\Delta V_{res}$$

Aanname hierbij is, dat een gedeelte (gekwantificeerd door een partiticoëfficiënt) van dit reservoir moment) wordt omgezet in seismische reactivatie van breuken en dus een seismisch moment. De partiticoëfficiënt wordt afgeleid uit de verhouding van het totaal geobserveerde seismische moment van alle bevingen, binnen een cumulatieve compactie-contour van het Groningen veld, en het totale reservoir moment berekend uit het cumulatieve compactievolume, beschikbaar binnen een compactie-contour. Voor een gedetailleerde beschrijving van de methode, zie NAM (2013a,b) en Hoofdstuk 7 van dit rapport.

Daarnaast gebruikt NAM (2013a,b) het (gemodelleerde en aan bodemdaling gekalibreerd) cumulatieve compactie volume voor het Groningen veld, en het daarbij horende totale reservoir moment, om de maximale magnitude  $M_{\max}$  voor het Groningen veld te berekenen ('finite strain limit'). Uitgangspunt hierbij is dat in een 'worst case' scenario het totale reservoir moment in één keer vrij zou kunnen komen en volledig worden omgezet in seismisch moment. NAM (2013a,b) berekent hiermee voor het Groningen veld een  $M_{\max}$  van 6,5 bij een partiticoëfficiënt van 1.

De partiticoëfficiënt wordt afgeleid op basis van geobserveerde seismiciteit – en op basis van de (gemodelleerde) cumulatieve compactie, die tot nu toe in het veld heeft plaatsgevonden. Het is onzeker, hoe de partiticoëfficiënt zich bij grotere compactie zal gedragen, en of het gerechtvaardigd is om de partiticoëfficiënt, bepaald voor compactie in één gebied (met een bepaalde karakteristiek qua breukgeometrie en oriëntatie) te gebruiken voor andere gebieden (met mogelijk andere karakteristieken), waar deze compactie nog niet is opgetreden.





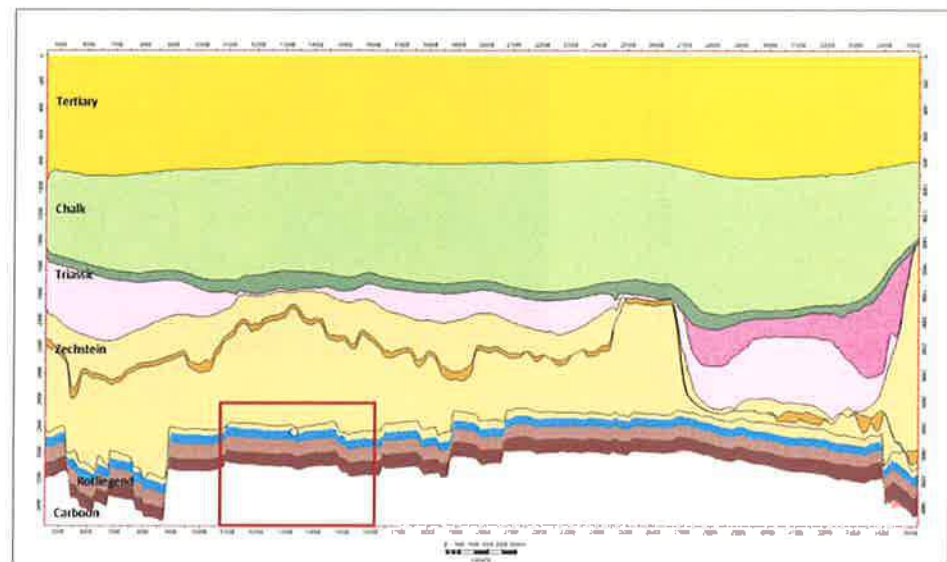
Figuur 6.8 Locatie verticale doorsnede door het Loppersum gebied, dat gekenmerkt wordt door relatief hoge seismiteit. Het gebied wordt gekenmerkt door aanwezigheid van veel NNW-ZZO georiënteerde breuken met variabel verzet. De locatie van de Huizinge  $M_w=3,6$  beving is op de kaart aangegeven als witte cirkel.

Op dit moment is er weinig inzicht hoe compactie in een reservoir zich vertaalt naar spanningsveranderingen en (seismische en a-seismische) verplaatsingen op de breuken. Zoals eerder al opgemerkt is in eerdere 2D- en 3D geomechanische modelstudies (Roest en Kuilman, 1994; Mulders, 2003; Orlic en Wassing, 2012) aangetoond dat de spanningsontwikkeling op de breuken tijdens depletie van het reservoir, het moment (respectievelijk de mate van drukdepletie) waarop de breuken gereactiveerd worden en de berekende verplaatsingen op de breuken sterk afhankelijk van de geometrie van het reservoir en het omliggende gesteente en de geometrie van de breuken (oriëntatie van breuken, verzet, 'juxtapositie' van lagen, grootte van het reservoir). Daarnaast zijn de geomechanische eigenschappen van het reservoir, het omliggende gesteente en de breuken, alsook het spanningsveld van groot belang. Deze complexe interactie van

reservoircompactie en seismische en a-seismische breukreactivatie wordt in de aanpak van NAM (2013a,b) samengevat in één parameter: de partiticoëfficiënt.

Figuur 6.8 geeft de ligging van een verticale doorsnede door het Loppersum gebied weer, dat gekenmerkt wordt door een relatief hoge seismiciteit. Figuur 6.9 toont deze verticale doorsnede met de geologische eenheden en de breukconfiguratie in het gebied. Het gebied rondom Loppersum wordt gekenmerkt door een relatief hoge breukdichtheid, aanwezigheid van veel NNW-ZZO georiënteerde breuken en een breukverzet variërend van nauwelijks breukverzet, tot enkele honderden meters. De belangrijkste geologische eenheden, die ook terugkomen als eenheden in de 2D geomechanische modellen, zijn in Figuur 6.9 weergegeven:

- 1) Bovenliggend gesteente ('Overburden': Trias en jonger gesteente)
- 2) Zechstein gesteente zout (inclusief ingesloten anhydrietlagen)
- 3) Zechstein basale anhydriet laag
- 4) Slochteren Ten Boer kleilaag
- 5) Slochteren reservoir zandsteen
- 6) Onderliggend gesteente ('Underburden': Carboon)



Figuur 6.9 Verticale doorsnede door het gebied nabij Loppersum. De locatie van de Huizinge beving is op het profiel weergegeven (witte cirkel).

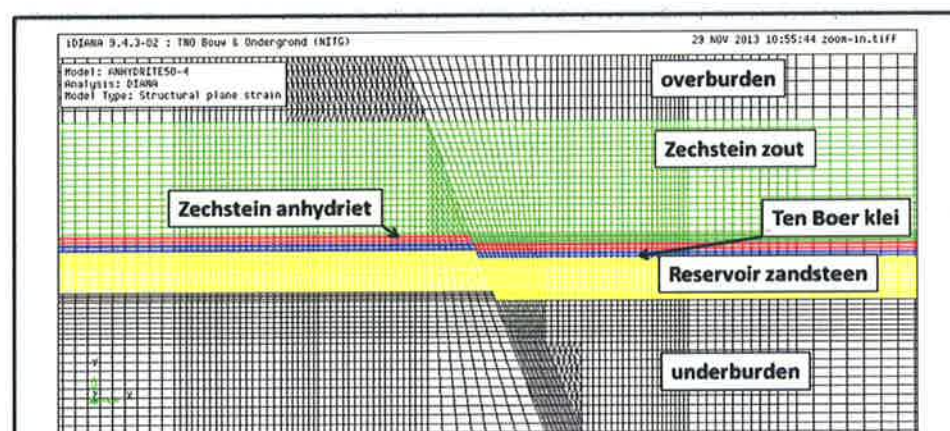
Op basis van deze verticale doorsnede van de geologie zijn in het eindige elementen programma Diana vier (geometrisch vereenvoudigde) modellen geconstrueerd van een breuk met een breukverzet variërend van 0 m, 50 m, 100 m tot 290 m om geometrische effecten te kunnen analyseren. De breuk in het Diana model heeft een helling van 70°. De verticale doorsnede is loodrecht georiënteerd op de NNW-ZZO breuken, parallel aan de minimale horizontale spanning  $S_{hmin}$  in het gebied. In Figuur 6.10 wordt een detail van de geometrie in het Diana model getoond (voor een breuk verzet van 50 m). De dimensie van het Diana mesh waarmee is gerekend bedraagt 7 km (verticaal) bij 13 km (horizontaal).

De initiële druk in het reservoir (Slochteren, Ten Boer klei en de Slochteren reservoir zandsteen) is 350 bar. Het reservoirgesteente wordt tot een reservoirdruk van 70 bar gedepleteerd (80% depletie). Poriëndrukken in de onder- en

bovenliggende gesteenten zijn hydrostatisch gekozen, met een drukgradiënt van 1bar/10m. De gradiënt van de verticale spanning wordt berekend uit de dichtheid van het bovenliggend gesteente, voor de horizontale spanning wordt een  $K'_0$  (effectief) van 0,4 aangehouden. Materialeigenschappen van de 6 eenheden en de breuk zijn samengevat in Tabel 6.3. Materialeigenschappen en spanningsgradiënten eigenschappen zijn gebaseerd op de waarden genoemd in NAM (2013b). Voor de breuk wordt een frictie coëfficiënt van  $\mu=0,6$  aangehouden, zonder cohesie (Byerlee, 1978). Daarnaast zijn enkele modellen gerund met uniforme materiaal eigenschappen (Tabel 6.3).

Tabel 6.3 Geomechanische parameters van de eenheden onderscheiden in het Diana model. Waarden tussen haakjes zijn waarden gebruikt in het model met uniforme parameters.

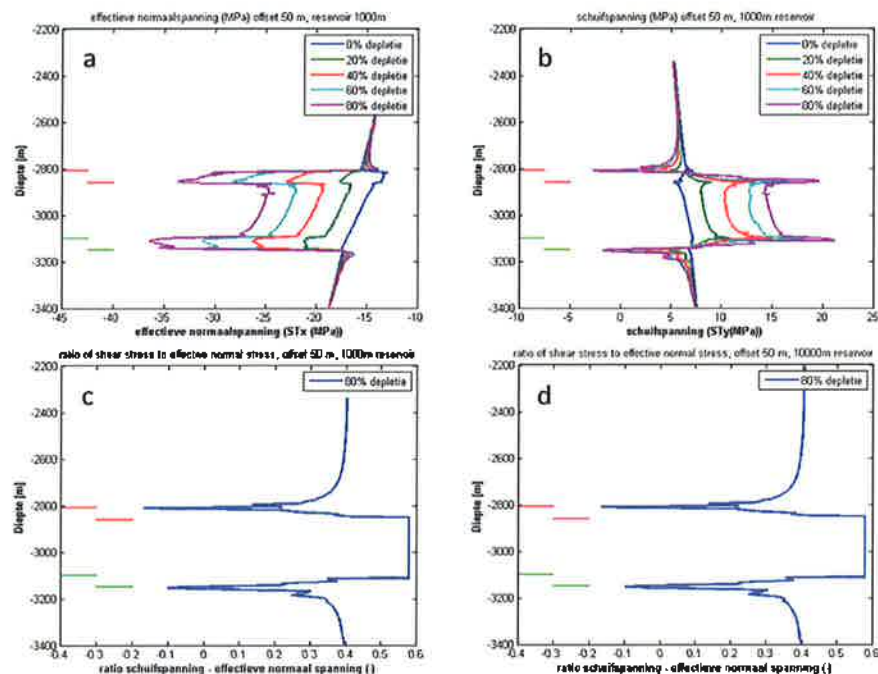
Geomechanische eenheid	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio (-)	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	$K'_0$ (-)	Overig
'Overburden'	10 (15)	0,25 (0,20)	2270 (2300)	0,4 (0,4)	
Zechstein gesteentezout	35 (15)	0,30 (0,20)	2150 (2300)	1,0 (0,4)	Kruipgedrag (geen kruip)
Zechstein basale anhydrietlaag	70 (15)	0,25 (0,20)	2970 (2300)	1,0 (0,4)	
Slochteren Ten Boer kleilaag	40 (15)	0,20 (0,20)	2300 (2300)	0,4 (0,4)	
Slochteren reservoir zandsteen	15 (15)	0,20 (0,20)	2300 (2300)	0,4 (0,4)	
'Underburden'	40 (15)	0,20 (0,20)	2300 (2300)	0,4 (0,4)	



Figuur 6.10 Detail van de geometrie in Diana (model met breuk offset van 50m). Breuk offset in de Diana modellen wordt gevarieerd tussen 0m en 290m. De totale dikte van het reservoir (Ten Boer kleilaag, blauw, en reservoir zandsteen, geel) bedraagt 290m. Bij een offset van 290m is het rechter reservoirblok over de volledige reservoir dikte verplaatst.

### 6.4.1 Differentiële compactie over de breuk

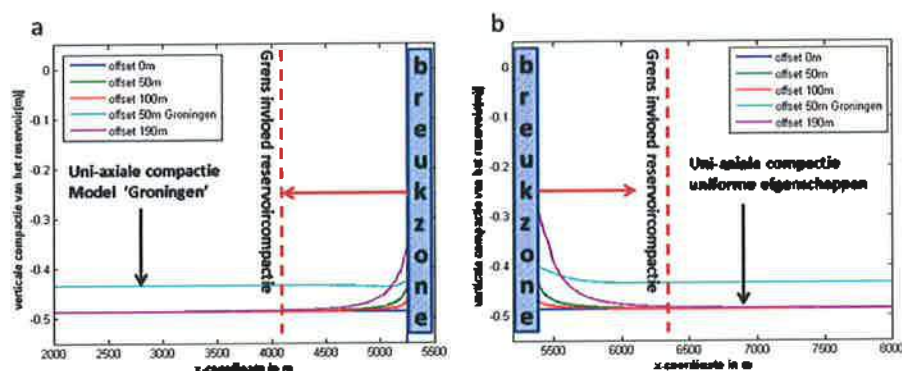
In de eerste set runs is uitgegaan van uniforme materiaaleigenschappen voor het gesteente (alle lagen gelijke materiaaleigenschappen en initiële spanningstoestand), een breuk met een frictie coëfficiënt van 0,6 en een breukverzet van 50 m (zie voor geometrie Figuur 6.10, maar dan uniforme eigenschappen). Figuur 6.11 toont de effectieve normaalspanning, schuifspanning en ratio van schuifspanning/effectieve normaalspanning op het breukvlak, tijdens depletie van het reservoir. De spanningen in Figuur 6.11 a) tot en met c) zijn berekend voor een model met beperkte horizontale afmetingen, nl. een totale horizontale dimensie van 2000 m (1000 m reservoir aan weerszijden van de breuk). Figuur 6.11 d) toont de verhouding van schuifspanning en effectieve normaalspanning op het breukvlak, voor een model met een totale horizontale dimensie van 10000 m (5000 m aan weerszijden van de breuk). De resultaten voor beide berekeningen zijn nagenoeg identiek: Delen van het reservoir, gelegen op afstand > 1000 m van de breuk hebben geen significant effect op de spanningen (en verplaatsingen) op de breuk. Het reservoir gedeelte op afstand > 1000 m deformeert nagenoeg uni-axiaal (alleen verticale compactie).



Figuur 6.11 Spanningsontwikkeling op een breuk bij depletie van het reservoir aan weerszijden van de breuk: a) Effectieve normaalspanning op het breukvlak tegen de diepte voor 0, 20, 40, 60 en 80% depletie, modelgrootte 2000 m, b) Schuifspanning op het breukvlak tegen de diepte voor 0, 20, 40, 60 en 80% depletie, modelgrootte 2000m, c) en d) ratio schuifspanning/effectieve normaalspanning tegen diepte, voor modelgrootte van 2000, resp. 10000 m.

Om de invloed van het breukverzet te analyseren, is eenzelfde type berekeningen, met uniforme materiaaleigenschappen, gemaakt voor een variërend breuk verzet: 0 m, 50 m, 100 m en 290 m. Daarnaast is een model gerund, representatief voor de het Groningen reservoir (verzet van 50 m, zie Figuur 6.10). Hierbij wordt aan het Zechstein gesteentezout tijdsafhankelijk materiaalgedrag (kruip) toegekend.

In Figuur 6.12 is voor elke geometrie, met oplopende afstand tot de breuk, de ratio van de berekende verticale compactie t.o.v. de verticale een-dimensionale compactie geplot. Het deel van het reservoir dat uni-axiaal compacteert (zelfde compactie aan beide kanten van de breuk) levert geen bijdrage aan de spanningsontwikkeling op de breuk. De breuk met een verzet van 190m 'voelt' de invloed van reservoir compactie op de grootste afstand. Voor deze breuk is er een verschil in compactie aan de rechter en linkerkant van de breuk. Voor de getoonde geometrieën is de maximale afstand waarover de spanningsveranderingen door reservoir compactie worden overgebracht op het breukvlak beperkt, namelijk zo'n 1100 m. De berekende compactie voor het model representatief voor het Groningen reservoir is gemiddeld lager dan die voor het model met uniforme materiaaleigenschappen vanwege de hogere stijfheid van de Ten Boer kleilaag.

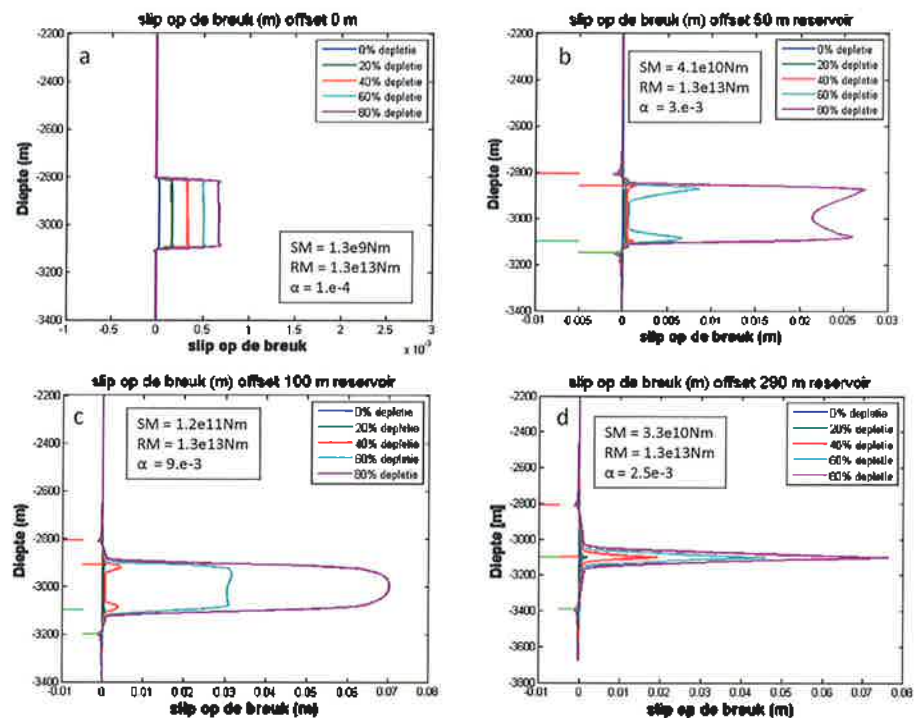


Figuur 6.12 Invloedsgebied van reservoir compactie nabij de breuk. a) Linkerzijde van het breukvlak b) rechterzijde van het breukvlak. De breuk met een verzet (*offset*) van 190m (paarse lijn) beïnvloedt de compactie van het reservoir over de grootste afstand – en vice versa. Rode pijl geeft de maximale afstand waarover de spanningsveranderingen door reservoir compactie worden overgebracht op het breukvlak weer. In lichtblauw wordt de compactie voor het 2D model (zie ook Figuur 6.10) voor het gebied rondom Loppersum getoond, in paars de compactie voor het model met uniforme eigenschappen.

Figuur 6.13 toont de berekende verplaatsingen voor de vier verschillende geometrieën, met variabel breukverzet. Het model van de breukgeometrie met 290 m verzet geeft de grootste verplaatsingen. Voor elke geometrie kan een 'slip moment' op de breuk worden berekend, dat wordt veroorzaakt door de relatieve verplaatsing van beide reservoirblokken langs de breuk. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de vergelijking voor het seismisch moment (Paragraaf 6.2). Het 'slip moment' wordt berekend door de slip per breuk-element (interface-element in Diana) te vermenigvuldigen met het oppervlak en de schuifmodulus van de breuk elementen. Daarnaast is het beschikbare reservoir-moment (voor het totale reservoir in het model) berekend. De verhouding van het 'slip moment' en reservoir moment wordt per breuk-verzet apart vermeld in Figuur 6.13. Deze verhouding kan worden geïnterpreteerd als een maat voor de hoeveelheid reservoir compactie, die wordt omgezet in verplaatsingen langs de breuk. De verhouding is niet rechtstreeks vergelijkbaar met de partiticoëfficiënt gehanteerd door NAM (2013a,b). De partiticoëfficiënt van NAM bevat geen fysische processen, in tegenstelling tot deze methode, maar is zuiver empirisch. Het Diana model is een statisch model, waarbij het modelleren van het 'rupture proces' en het correct simuleren van het frictiegedrag van de breuk tijdens 'rupture' niet mogelijk is. Daarmee is het in dit

model niet mogelijk om de seismische slip te modelleren. Zowel de beschreven Diana modellen als de compactie modellen gebruikt in de seismische hazard analyse van de NAM (2013b) gaan daarnaast uit van een elastische compactie van het reservoirgesteente. Er wordt geen rekening gehouden met (de dissipatie van energie in) permanente plastische deformatie van het reservoirgesteente.

Uit Figuur 6.13 blijkt dat de grootste slip optreedt bij een verzet van 290 m, maar dat het 'slip moment' voor de vier geometrieën het grootst is bij een verzet van 100 m (groter oppervlak gereactiveerd). Bij een verzet van 0 m treedt nauwelijks slip op. In alle gevallen is het slip moment slechts een fractie van het reservoir moment ( $< 2 \cdot 10^{-3}$ ).

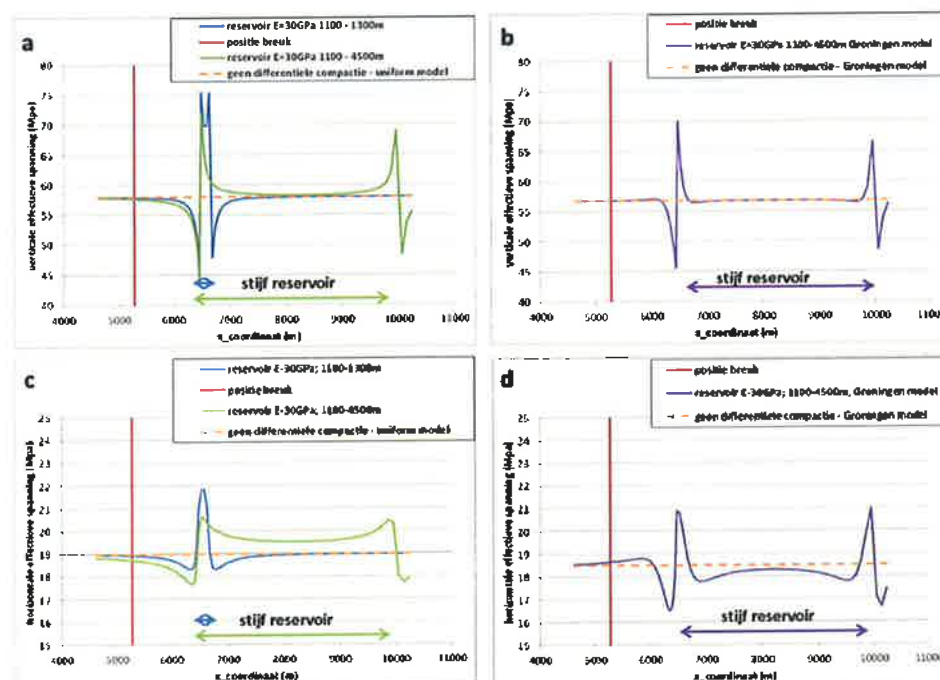


Figuur 6.13 Slip op de breuk tegen de diepte, voor 4 geometrieën: a) offset 0m, b) offset 50m, c) offset 100m, d) offset 290m. Voor elke geometrie is tevens de verhouding berekend tussen het reservoir moment en het 'slip moment' op de breuk.

#### 6.4.2 Differentiële compactie binnen reservoir compartimenten

In bovenstaande modellen is uitgegaan van een uniforme compactie van beide reservoir compartimenten aan weerszijden van de breuken (homogene materiaaleigenschappen, homogene depletie). Differentiële compactie vindt alleen plaats in de directe omgeving van de breuk, en is het directe gevolg van aanwezigheid van de breuk zelf (in dit geval door het aanwezige verzet van de reservoirblokken langs de breuk, maar deze differentiële compactie zou ook het gevolg kunnen zijn van drukverschillen over de breuk ('sealing' breuken, Ten Boer klei tegen reservoir zandsteen, etc.). Voor deze situatie geldt dat de breuk slechts de compactie (het reservoirdeel dat niet-uniaxiaal deformeert) in een beperkt deel van het reservoir 'voelt' (voor de gekozen geometrieën en materiaal parameters tot een afstand van maximaal 1100 m van de breuk).

In de tweede set modelruns worden de compactie-eigenschappen in een deel van het reservoir compartiment gevarieerd. In het rechter reservoir compartiment (Figuur 6.14) wordt een gebied gemodelleerd met een hoge stijfheid ( $E = 30$  GPa), wat lokaal leidt tot minder compactie dan in de omgeving. Dit zou in werkelijkheid een gebied kunnen zijn met lagere porositeit, of minder depletie). De grootte van het gebied varieert van 1100 m tot 1300 m afstand tot de breuk en 1100 tot 4500 m afstand tot de breuk. Figuur 6.14 toont het effect van zogenaamde 'arching' (boogwerking van spanningen) door differentiële compactie in het lagere reservoir compartiment op de verticale en horizontale spanningen in het reservoir. Figuur 6.14 toont resultaten voor zowel het model met uniforme materiaaleigenschappen als het model representatief voor Groningen, beide voor een breuk zonder verzet. Differentiële compactie leidt tot grote afwijkingen in spanningen op korte afstand van het stijvere reservoirsegment, effecten op grotere afstand zijn beperkt. In het uniforme model worden de spanningsveranderingen door differentiële compactie van het gebied tussen 1100 – 4500 m op de locatie van de breuk nog gevoeld, in

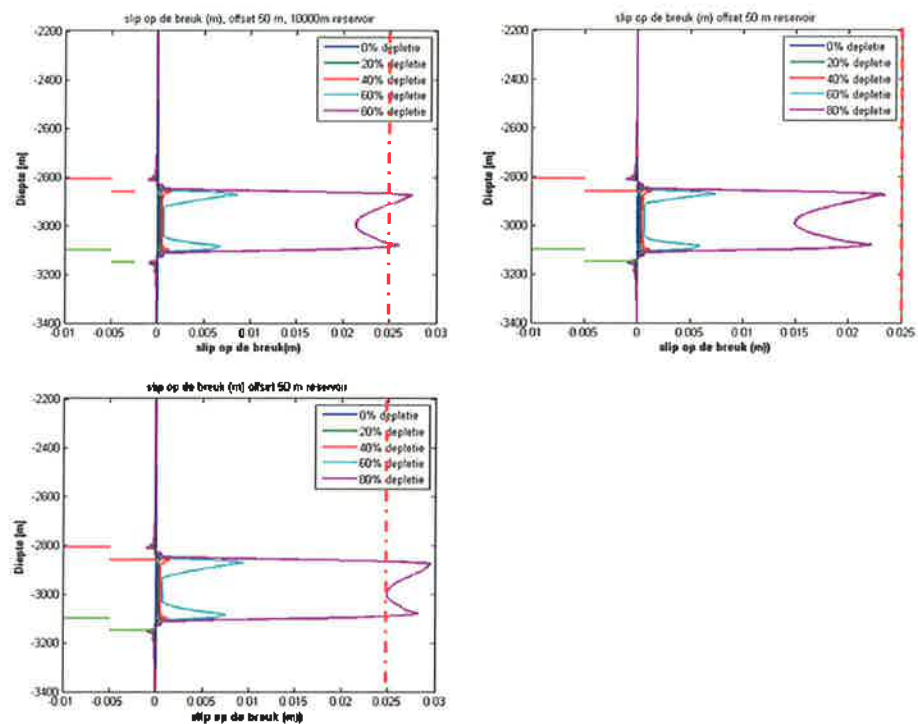


Figuur 6.14 Invloed van differentiële compactie in een reservoir compartiment nabij een breuk, zonder verzet, op de effectieve horizontale en verticale spanning in het reservoir gesteente. In het rechter reservoir compartiment is een gebied gemodelleerd met een hoge stijfheid ( $E=30$  GPa), wat lokaal leidt tot relatief minder compactie. De grootte van het gebied varieert van 1100 tot 1300m afstand tot de breuk (lichtblauwe lijn figuur a) en c), en van 1100 tot 4500m afstand tot de breuk (groene lijn figuur a) en c) en paarse lijn figuur b) en d)). De onderbroken oranje lijn geeft in alle gevallen de spanningen weer bij een uniforme compactie van het reservoir. De pijlen onderin de figuren geven de grootte van het reservoir-deel met afwijkende compactie weer. De verticale rode lijn geeft de positie van de breuk weer.

het model representatief voor Groningen is er nauwelijks invloed van het minder sterk compacterend gebied tussen 1100 – 4500 m op de spanningen op de breuk. Bij een kleiner gebied dat minder compacteert (1100 – 1300 m) is er geen effect op de spanningen nabij de breuk. Uit Figuur 6.14 blijkt dat het effect van boogwerking van spanningen door differentiële compactie in het reservoir tot een afstand van

circa 2 à 3 km aanwezig is. Hierbij wordt opgemerkt dat de berekeningen in 2D plane strain zijn uitgevoerd en dat in een 3D situatie de boogwerking van spanningen ook in de derde (horizontale) dimensie zullen optreden, en daarmee de uiteindelijke effecten op de breuk kleiner zullen zijn.

In Figuur 6.15 wordt de invloed van differentiële compactie binnen het lagere reservoir blok op de slip op de breuk getoond bij 80% depletie (voor uniforme reservoir eigenschappen, verzet 50 m). Figuur 6.15 toont drie situaties: een reservoir met homogene stijfheid, een reservoir met lokaal een hogere stijfheid (lage porositeit) en een reservoir met lokaal een lagere stijfheid (hoge porositeit). In het specifieke geval van een lokaal stijver gesteente neemt de verhouding schuif- en normaalspanning en de slip op de breuk toe; in het geval van een lokaal minder stijf reservoir neemt de slip op de breuk af. Lokale verschillen in compactie (door bijvoorbeeld verschillen in porositeit, reservoirdruk, lithologie) op enige afstand van de breuk kunnen de stabiliteit van de breuken in zowel positieve als negatieve zin beïnvloeden. Concluderend zijn niet alleen differentiële compactie over de breuk zelf, maar ook differentiële compactie binnen reservoir compartimenten en lokale 'arching' effecten van invloed op de breukstabiliteit.

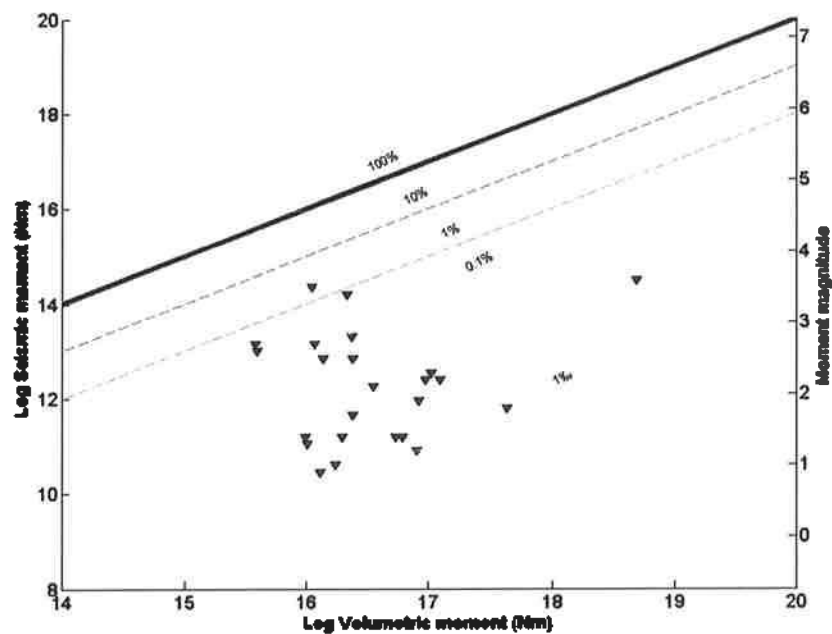


**Figuur 6.15** Invloed van differentiële compactie binnen een reservoir compartiment op de verplaatsingen gemodelleerd op de breuk. a) Lager gelegen reservoir blok met homogene stijfheid – geen differentiële compactie binnen reservoir compartiment (porositeit,  $E_{\text{young}} = 15$  GPa) b) lager gelegen reservoir blok met lokaal minder compactie door stijver reservoir segment ( $E_{\text{young}} = 30$  GPa) tussen 1100 en 4600 m, c) lager gelegen reservoir blok met lokaal meer compactie door minder stijf reservoir segment ( $E_{\text{young}} = 7,5$  GPa) tussen 1100 en 4500 m afstand van de breuk.



### 6.4.3 Relatie tussen het compactievolume en het seismisch moment in overige Nederlandse velden

Figuur 6.16 geeft de relatie tussen het 'volumetrisch moment' en het cumulatief seismisch moment van de aardbevingen in alle Nederlandse gasvelden weer (Buijze, in prep.). Het volumetrisch moment is berekend op basis van de vergelijking  $2GdV_{res}$  (McGarr, pers.comm, 2013) waarin  $G$  de schuifmodulus van het specifieke reservoirgesteente en  $dV_{res}$  het compactievolume voor het hele reservoir. Uit Figuur 6.16 kan voor de Nederlandse gasvelden worden afgelezen dat het seismisch moment van de grootste beving ( $M_{max}$ ) over het algemeen minder dan 1% bedraagt van het volumetrisch moment door reservoircompactie. Hierbij wordt opgemerkt dat een aantal van deze gasvelden reeds uitgeproduceerd is. De vergelijking gebruikt voor de berekening van het volumetrisch moment is vergelijkbaar met het reservoir moment, door NAM (2013a,b) gebruikt om de partiticoëfficiënt te bepalen.



Figuur 6.16 Relatie tussen het 'volumetrisch moment' en het seismisch moment van de grootste aardbevingen in de Nederlandse gasvelden (Buijze, in prep.). Het volumetrisch moment  $dV_{res}$  is berekend op basis van de vergelijking  $2GdV_{res}$ , met  $G$  de schuifmodulus van het specifieke reservoirgesteente,  $dV_{res}$  de volume verandering door compactie, berekend met de drukval  $dP \cdot C_m$  ( $dP$  is hierbij benaderd door aan te nemen dat  $dP/P_{init}$  is  $dV_{gas}/V_{gas,init}$ ).  $C_m$  is de gemiddelde compactiecoëfficiënt voor het specifieke gasveld,  $P_{init}$  de initiële reservoirdruk,  $dV_{gas}$  Volume gas geproduceerd en  $V_{gas,init}$  het oorspronkelijke gasvolume.

## 6.5 Conclusies en aanbevelingen

### 6.5.1 Conclusies

- Zowel de differentiële compactie over de breuk zelf, als de differentiële compactie binnen de reservoir compartimenten aan weerszijden van de breuk, die optreedt tijdens depletie van het reservoir leidt tot breukreactivatie en slip. De afstand waarover compactie de spanningen op de breuk beïnvloedt is beperkt. Voor de gemodelleerde geometrieën, met representatieve waarden voor Groningen, is de reservoir compactie tot een afstand van circa twee km nog van invloed op de spanningscondities en verplaatsingen op de breuk.
- Vooral differentiële compactie (niet-uniaxiaal) beïnvloedt de spanningsveranderingen en verplaatsingen op de breuken in het reservoir. In de seismische hazard analyse gebaseerd op de 'finite strain limit' (NAM, 2013a,b) wordt de partiticoëfficiënt berekend uit het reservoir moment op basis van compactie uit een uni-axiale modelberekening. Differentiële compactie zal toenemen bij een toename van de depletie en compactie van het reservoir – maar een verdergaande koppeling tussen de methode van NAM (2013a,b) en de 2D-geomechanische modellen is op dit moment niet mogelijk. De extrapolatie van de partiticoëfficiënt naar grotere compactie is daarmee onzeker. Daarnaast is op dit moment geen basis om de partiticoëfficiënt, en zijn onzekerheid, te kunnen reduceren.
- De verhouding tussen het slip moment (in NAM (2013b) genoemd 'de energie die op de breuk dissipeert') en het reservoir moment berekend in het reservoirgedeelte dat bijdraagt aan de spanningsveranderingen op de breuk is klein. Deze verhouding kan worden geïnterpreteerd als een maat voor de hoeveelheid reservoircompactie, die wordt omgezet in verplaatsingen langs de breuk. De verhouding is niet rechtstreeks vergelijkbaar met de partiticoëfficiënt gehanteerd door NAM (2013a,b). Het Diana-model is een statisch model, waarbij het modelleren van de aardbeving zelf en het correct simuleren van het frictiegedrag van de breuk tijdens de aardbeving niet mogelijk is.
- Zowel de beschreven Diana modellen als de compactie modellen gebruikt in de seismische hazard analyse van de NAM (2013b) gaan uit van een elastische compactie van het reservoirgesteente. Er wordt geen rekening gehouden met (de dissipatie van energie in) permanente plastische deformatie van het reservoirgesteente.
- De aanname in de seismische hazard analyse, gebaseerd op de 'finite strain limit', dat het gehele reservoir moment, berekend uit het compactie volume voor het hele Groningen veld (oppervlakte circa 25kmx45km), in één keer vrij kan komen als seismisch moment op één breuk ( $M_{max}$ ) lijkt erg overdreven. Dit wordt bevestigd door waarnemingen in overige Nederlandse gasvelden, waar de verhouding van het cumulatief seismisch moment van de bevingen over het algemeen minder dan 1% bedraagt van het volumetrisch moment door reservoir compactie.
- In de seismische hazard analyse in NAM (2013b) gebaseerd op de 'finite strain limit' wordt geen rekening gehouden met het feit dat ook schuifspanningen buiten het reservoir gemobiliseerd kunnen worden tijdens een beving (met

name bij aanwezigheid van breuken met kritieke spanningscondities (Garagash et al., 2012). De potentiële reactivatie van het breukoppervlak op grotere afstanden van het reservoir kan alleen correct gemodelleerd worden wanneer ook het frictiegedrag van de breuk (het snelheidsafhankelijk gedrag van de frictie) in de modellering wordt geïmplementeerd.

#### 6.5.2 Aanbevelingen

Meer inzicht in de interactie tussen depletie, (elastische- en plastische) compactie van het reservoir en spanningsveranderingen op de breuk en een verdere fysische onderbouwing van de reactie van het reservoir en de breuken op verdergaande depletie van het veld is zeer wenselijk. Meer inzicht kan verkregen worden door:

- Uitbreiding van de modellen naar dynamische modelleringen en analyse van het 'rupture proces' tijdens de aardbeving.
- Onderzoek naar de rol van tijdsafhankelijke en niet-elastische processen, zoals kruip van gesteentezout, compactie van het reservoirgesteente en diffusie van poriëndrukken.
- Verdere onderbouwing van de modellen op basis van experimenteel onderzoek (compactiegedrag van reservoirgesteente, frictiegedrag van de breuken).
- Uitgebreide validatie van geomechanische modellen op basis van monitoringsgegevens is noodzakelijk (monitoring van de spanningsontwikkeling in het reservoir, micro-seismische monitoring, monitoring van bodemdaling).

## 7 Seismische hazard analyse

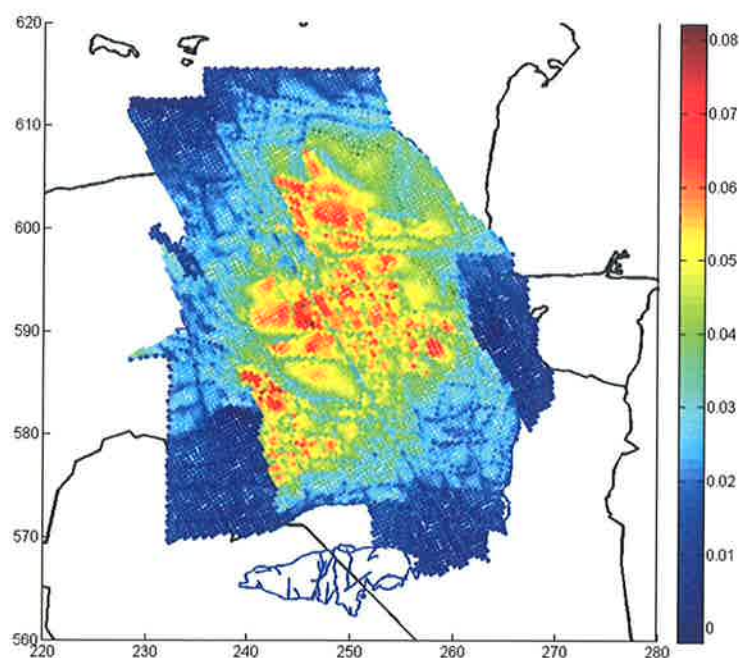
In dit hoofdstuk wordt de seismisch hazard analyse beschreven. Hierbij wordt vooral de rol van de partiticoëfficiënt op de hazard analyse benadrukt en geanalyseerd.

### 7.1 Methodiek

Voor de seismische hazard analyse wordt de methode van NAM (2013a,b) gebruikt. Deze methode beschrijft hazard berekeningen gebaseerd op een Monte Carlo systematiek waarin de parameters inclusief hun onzekerheidsbandbreedte worden meegenomen. Voor een beschrijving van de methode zie NAM (2013a,b). De methodiek wordt in 7 stappen beschreven:

1. Totaal seismisch moment
2. Aardbevingsdichtheidkaart
3. Magnitude
4. Catalogus
5. Versnelling aan het oppervlak
6. Hazard
7. Statistieken

Deze methode wordt gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse van de gepresenteerde hazard resultaten, berekend door NAM, in de technische bijlage in het winningsplan Groningen 2013 (NAM 2013d). Hieronder worden de zeven stappen beschreven en geïllustreerd.



Figuur 7.1 Compactie in het interval 2013-2023 voor het marktvaag scenario en berekend met het RTCM model.

### 7.1.1 Totaal seismisch moment

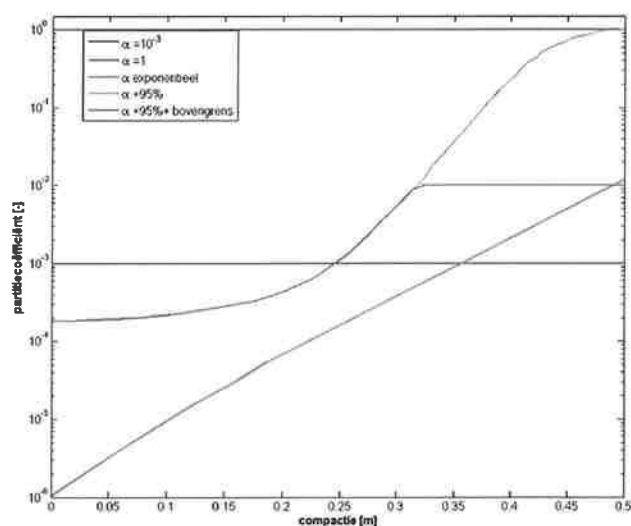
In deze stap wordt het seismisch moment berekend ten gevolge van compactie in een bepaald interval. Hiervoor wordt eerst de cumulatieve compactie berekend in de start van het interval en aan het einde van het interval. Deze cumulatieve compactie wordt dan omgezet in seismisch moment op de twee tijdstippen. Daarna wordt het seismisch moment aan het einde van het interval van het begin afgetrokken. Wat over blijft is het seismisch moment in het interval.

De compactie in het tijdinterval 2013 – 2023 is gegeven in Figuur 7.1. NAM (2013a&b) gebruikt de partiticoëfficiënt voor de omrekening van reservoirmoment (gegeven door compactie) naar seismisch moment. De partiticoëfficiënt beschrijft de relatie tussen de cumulatieve compactie van het reservoirgesteente en de hoeveelheid seismisch moment die bij een bepaalde hoeveelheid cumulatieve compactie vrijkomt (NAM, 2013b). De partiticoëfficiënt en de daaraan gerelateerde onzekerheid bepaalt in belangrijke mate de seismische hazard, ofwel de kans op het overschrijden van bepaalde versnellingen aan het oppervlak.

Tabel 7.1 Het totaal aan seismisch moment (Nm) wat kan vrijkomen in de periode 2013-2023 voor verschillende aannames van de relatie van de partiticoëfficiënt met de compactie. Als dit seismisch moment in één keer zou vrijkomen zou dat leiden tot de maximale magnitude in kolom 3.

Partiticoëfficiënt	Seismisch moment (Nm)	Maximale magnitude
Constant ( $10^{-3}$ )	$1,1 \cdot 10^{15}$	4,0
Constant (1,0)	$1,1 \cdot 10^{18}$	6,0
Exponentieel	$7,6 \cdot 10^{15}$	4,5
+95% betrouwbaarheid	$4,4 \cdot 10^{16}$	5,0
+95% en bovengrens 1%	$1,1 \cdot 10^{16}$	4,6

In tegenstelling tot NAM (2013a,b) wordt in deze analyse geen distributie van de partiticoëfficiënt aangenomen maar enkele mogelijke afhankelijkheden van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.2), namelijk: 1) constant met een waarde van  $10^{-3}$ , 2) exponentieel, 3) +95% betrouwbaarheidsinterval en 4) +95% betrouwbaarheidsinterval met een bovengrens van 1%. De grens van 1% is gekozen omdat voor de Nederlandse gasvelden het seismisch moment van de grootste beving ( $M_{max}$ ) over het algemeen minder dan 1% bedraagt van het reservoirmoment door compactie (Figuur 6.16). Het totaal beschikbare seismisch moment voor de komende tien jaar (2013-2023) wordt dan gegeven door het verschil in seismisch moment tussen 2013 en 2023. Aangezien de compactie in de tijd toeneemt en daardoor ook de partiticoëfficiënt, zal het gedeelte van het reservoirmoment dat beschikbaar is in de vorm van seismisch moment toenemen. Het totaal aan seismisch moment, en dus ook de maximale magnitude, voor de komende 10 jaar is afhankelijk van de aanname van de partiticoëfficiënt (Tabel 7.1). Als het totale reservoirmoment in één beving vrij zou komen in de vorm van seismische energie – wat zeer onwaarschijnlijk is – dan is de maximale magnitude daarvan 6,0 op de schaal van Richter. Als de partiticoëfficiënt echter niet zou stijgen ten opzichte van dit moment (constant met een waarde van  $10^{-3}$ ) en alle seismische energie in één keer vrijkomt, dan zou de maximale magnitude 4,0 zijn.

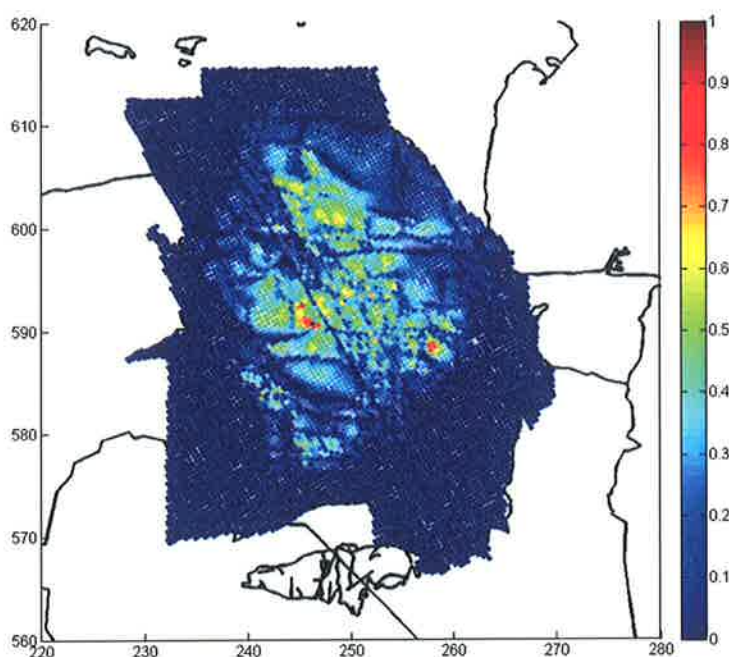


Figuur 7.2 Vier partiticoëfficiënt relaties met compactie: een constante coëfficiënt (blauw), exponentieel (rood), +95% betrouwbaarheidsinterval interval (lichtblauw) en +95% betrouwbaarheidsinterval met een bovengrens op 1% (paars).

Opmerkelijk hierbij is dat alleen de toename van de partiticoëfficiënt in de tijd toestaat dat er meer energie vrijkomt dan dat er beschikbaar is binnen het interval. Het reservoirmoment dat niet is vrijgekomen als seismisch moment wordt daardoor beperkt meegenomen. Hierdoor zijn hogere magnitudes, dan die berekend voor het specifieke interval, niet uit te sluiten. Naar mening van TNO-AGE zou het beter zijn om het totale seismisch moment te bepalen uit het seismisch moment aan het eind van het interval minus het geobserveerde cumulatieve seismisch moment in het begin van het interval (alle bevingen die tot het begin van het interval hebben plaatsgevonden).

### 7.1.2 Aardbevingsdichtheidkaart

De verwachte dichtheid van geïnduceerde bevingen voor het te analyseren interval wordt verkregen door de compactie over een tijdsinterval te nemen en deze om te zetten naar een waarde voor seismische energie. Deze wordt vervolgens genormaliseerd tot waarden tussen nul en één (Figuur 7.3). Voor de hazard analyse is uitgegaan van het marktvaag productiescenario (Paragraaf 3.3) voor de komende 10 jaar, waarbij de compactie is berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5).



Figuur 7.3 Aardbevingsdichtheidskaart voor het marktvaag scenario berekend met het RTCM compactiemodel gebaseerd op een genormaliseerde seismische energiedichtheid berekend uit de compactie voor het interval 2013-2023.

### 7.1.3 Magnitude

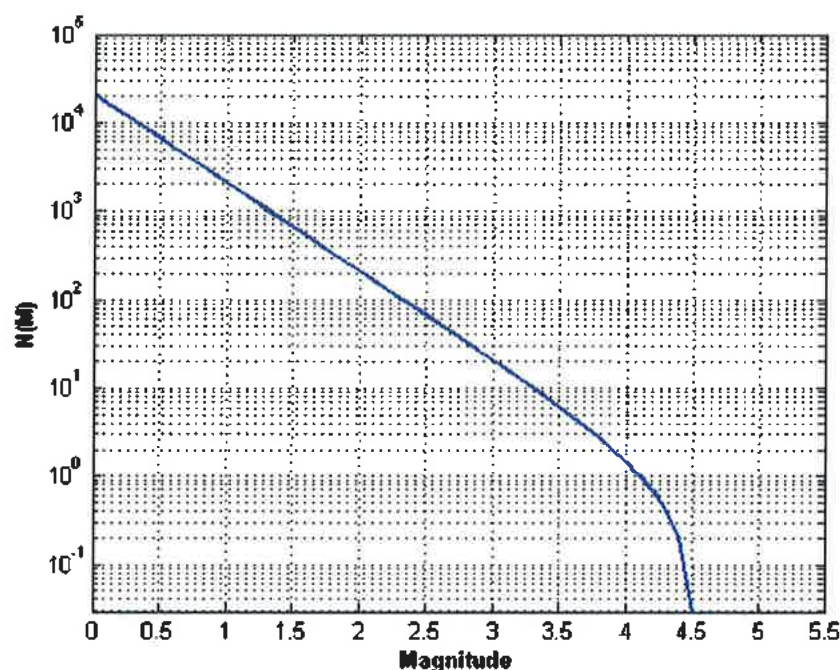
Met behulp van de maximale magnitude berekend in de eerste stap en de minimale magnitude die gegeven wordt door de zogenaamde magnitude van compleetheit van de seismische catalogus wordt een Cornell-Vanmarcke distributie berekend. Deze is gegeven door:

$$N(M) = N(M_{\min}) \frac{e^{-\beta(M-M_{\min})} - e^{-\beta(M_{\max}-M_{\min})}}{1 - e^{-\beta(M_{\max}-M_{\min})}} \quad (7.1)$$

met

$$\beta = b \ln 10 \quad (7.2)$$

Voor Groningen geldt  $b = 1$  (NAM, 2013a; Dost en Kraaijpoel, 2013) en de magnitude van compleetheit voor de seismische catalogus vanaf 1996 van  $M_{\min} = 1,5$  (Figuur 7.4). De maximale magnitude is gegeven door het totale seismische moment van Paragraaf 7.1.



Figuur 7.4 Cornell-Vanmarcke distributie met  $b=1$ ,  $M_{min}=1,5$  en  $M_{max}=4,5$  (exponentiële toename van de partiticoëfficiënt (Tabel 7.1)).

#### 7.1.4 Catalogus

Met de Cornell-Vanmarcke distributie uit stap drie wordt eerst een catalogus opgebouwd voor de magnitudes van de bevingen. Hierbij wordt de maximale magnitude uit de distributie aangepast zodanig dat geen magnitude kan worden getrokken waarbij de totale beschikbare seismische energie, verkregen in Paragraaf 7.1, overschreden wordt. Daarna wordt voor elke magnitude een locatie bepaald door random een locatie te trekken uit het aardbevingsdichtheidgrid. Als de aardbevingsdichtheid groter is dan een random trekking tussen nul en één dan wordt de locatie geaccepteerd. Als dit niet het geval is, wordt de locatie niet geaccepteerd en wordt er opnieuw een waarde getrokken. Op deze manier wordt een verdeling van de bevingen over het veld getrokken die vergelijkbaar is met de aardbevingsdichtheidkaart.

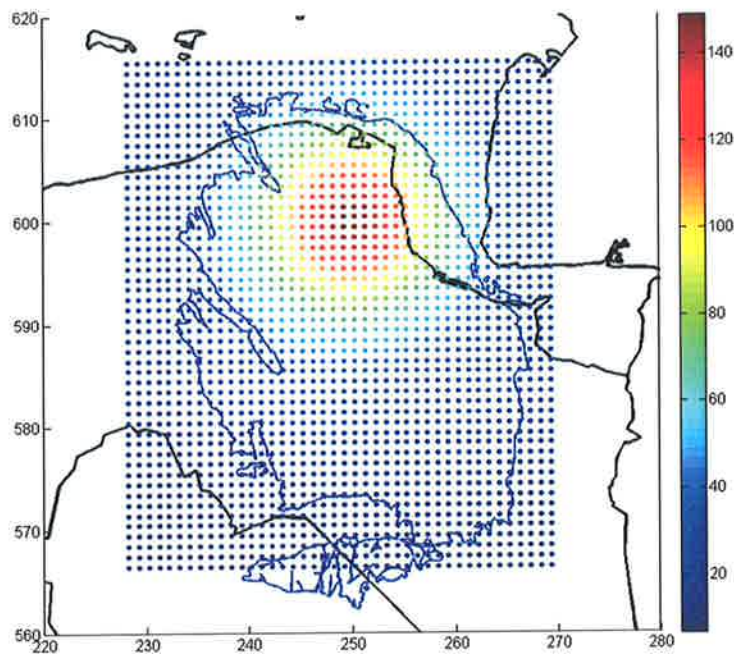
Het is opmerkelijk dat het trekken van magnitudes en locaties binnen de methode van de NAM (NAM 2013a,b) niet gekoppeld is. Hierdoor is het mogelijk dat bevingen met hogere magnitudes kunnen voorkomen op locaties met lage compactie (lage aardbevingsdichtheid). Gezien het patroon en de evolutie van de geobserveerde seismiciteit (Muntendam-Bos en De Waal, 2013; Dost en Kraaijpoel, 2013; NAM, 2013a) is dit onwaarschijnlijk. Een direct gevolg hiervan is dat de seismische hazard analyse niet kan differentiëren tussen verschillende productiefilosofieën. De hazard wordt bepaald door de hogere magnitude, die met de gebruikte methode in het gehele veld kunnen voorkomen. Hierdoor wordt de cumulatieve hazard voor een groot aantal catalogi (zoals berekend in NAM, 2013b) verspreid over het gehele Groningen veld zonder differentiatie naar compactie.



Het trekken van willekeurige getallen in een interval is voor computers in het algemeen niet echt willekeurig. Dat wil zeggen: het gaat meestal om pseudo-random getallen: bij een herhaling zonder verandering van de "seed" krijgt men steeds weer dezelfde reeks getallen. Voor de trekking van magnitudes en locaties is hier steeds dezelfde "seed" gebruikt.

### 7.1.5 Versnelling aan het oppervlak

Voor de gehele catalogus wordt de versnelling aan het oppervlak berekend met aangepaste GMPE ('Ground motion prediction equation', vergelijking 7 van Bommer, 2013) voor bevingen tot een magnitude van 4,2 in Groningen. Voor bevingen met grotere magnitudes worden de Akkar et al. (2013) GMPEs gebruikt. Uit de GMPEs wordt random een waarde getrokken uit de standaard deviatie voor de versnelling van de beving (Figuur 7.5).



Figuur 7.5 Versnelling aan van het aardoppervlak voor een beving met een sterkte van  $M=4.0$  op de Richter schaal voor één gekozen locatie in het Groningen veld.

### 7.1.6 Hazard

In deze stap wordt op basis van de berekende versnellingen een overschrijdingscurve samengesteld die beschrijft hoe vaak een bepaalde waarde voor de grondversnelling overschreden wordt. Na normalisatie van deze overschrijdingscurve, waarbij het totale oppervlak onder de curve gelijk wordt gesteld aan één, wordt de overschrijdingskans bepaald. Een overschrijdingskans van bijvoorbeeld 2% wordt dan gegeven door dat deel van de curve waar het oppervlak onder de curve vanuit de hogere versnellingen gelijk is aan 0,02.

### 7.1.7 Statistieken

Alle stappen worden herhaald voor een groot aantal catalogi. Dit aantal catalogi moet zodanig gekozen worden dat de overschrijdingskansen stabiel zijn.

## 7.2 Gevoeligheid seismische hazard analyse

De seismisch hazard analyse is opgezet in Matlab code voor een aantal catalogi. Om redenen van tijdefficiëntie is gekozen om de analyses op drie locaties uit te voeren verspreid over het Groningen veld (Figuur 7.6). Tabel 7.2 tot Tabel 7.4 geven aan voor de overschrijdingskansen van 2%, 10% en 50% dat de waarden voor PGA verschillend zijn voor het meenemen van het aantal catalogi. De resultaten voor 100 catalogi zijn duidelijk niet geconvergeerd. Voor 10.000 catalogi zijn de overschrijdingskansen van 50% en 10% redelijk geconvergeerd. De 2% overschrijdingskansen laten de meeste verschillen zien tussen de verschillende aantallen catalogi. Het is, op dit moment, onduidelijk bij welk aantal catalogi de 2% overschrijdingskansen wel geconvergeerd zijn.

Tabel 7.2. Overschrijdingskansen voor PGA in  $\text{cm/s}^2$  voor de locatie in het centrum (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5).

Overschrijdingskans	100 catalogi	200 catalogi	1.000 catalogi	10.000 catalogi
2 %	230	271	282	302
10 %	165	190	167	180
50 %	75	79	72	72

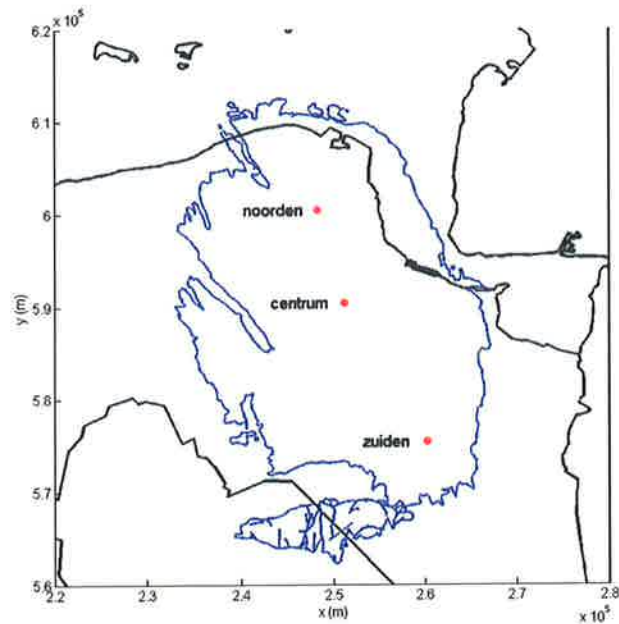
Tabel 7.3. Overschrijdingskansen voor PGA in  $\text{cm/s}^2$  voor de locatie in het noorden (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5).

Overschrijdingskans	100 catalogi	200 catalogi	1.000 catalogi	10.000 catalogi
2 %	262	263	409	383
10 %	203	183	239	243
50 %	113	102	117	118

Tabel 7.4. Overschrijdingskansen voor PGA in  $\text{cm/s}^2$  voor de locatie in het zuiden (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5).

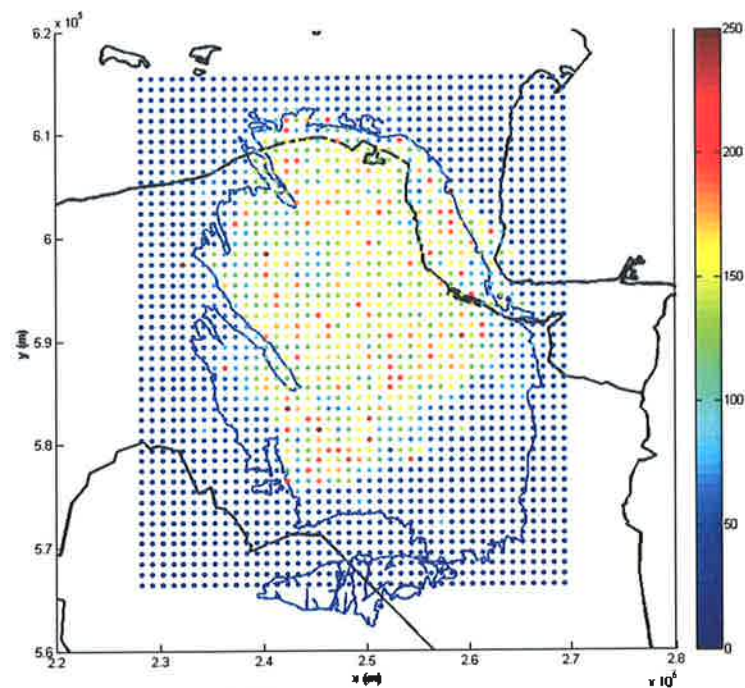
Overschrijdingskans	100 catalogi	200 catalogi	1.000 catalogi	10.000 catalogi
2 %	86	34	91	98
10 %	79	28	56	60
50 %	47	12	18	18

NAM (2013a,b) gebruiken 100.000 catalogi. Dit is vanwege redenen van tijdefficiëntie op dit moment niet haalbaar. Aangezien NAM (2013a,b), in tegenstelling tot de analyse van TNO-AGE, de partiticoëfficiëntverdeling in zijn geheel meenemen, wordt ook niet verwacht dat 100.000 catalogi nodig zijn voor convergentie. De meeste catalogi bevatten meer dan 1.000 bevingen met  $M > 1,5$ . Met dit aantal bevingen per catalogus wordt de Cornell-Vanmarcke distributie (Paragraaf 7.1.4) goed benaderd.

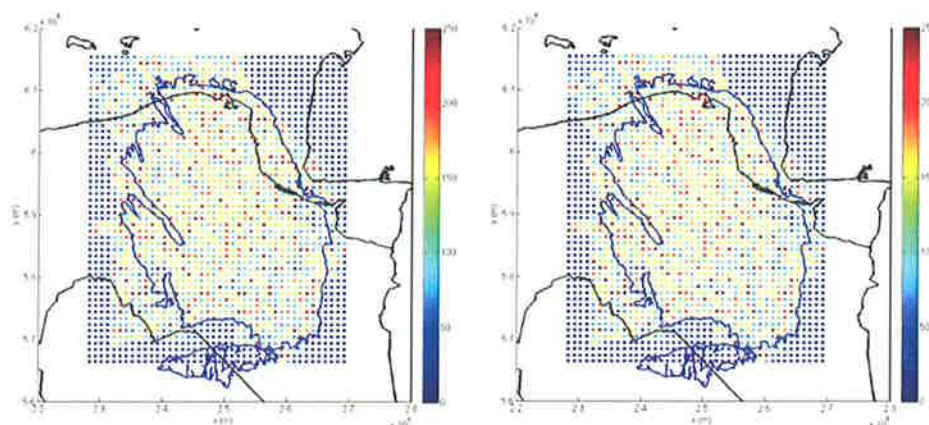


Figuur 7.6 Drie locaties (noord, centrum, zuid) welke gebruikt worden in de seismische hazard analyse.

De oorzaak voor het ontbreken van convergentie bij 100 catalogi ligt in de verdeling van de grotere bevingen over het veld. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 7.7 waar hogere PGA waarden verspreid over het veld voorkomen en voor 100 catalogi geen uniforme distributie wordt verkregen.



Figuur 7.7 2% overschrijdingskans voor de gegeven grondversnellingen (PGA in  $\text{cm/s}^2$ ), voor de exponentiële partiticoëfficiënt compactie functie en de komende 10 jaar.



Figuur 7.8 2% overschrijdingskans voor de gegeven grondversnellingen (PGA in cm/s<sup>2</sup>), voor de constante partiticoëfficiënt compactie functie (links) en de +95% betrouwbaarheidsgrens partiticoëfficiënt compactie functie (rechts) voor de komende 10 jaar.

Het voordeel, in dit geval, van het gebruik van dezelfde "seed" van de trekking van willekeurige getallen is dat Figuur 7.8 vergelijkbare patronen laat zien tussen het constante partiticoëfficiënt scenario en het +95% betrouwbaarheidsinterval scenario (Figuur 7.2). In de vergelijking tussen Figuur 7.7 en Figuur 7.8 valt op dat er in het geval van de exponentiële partiticoëfficiënt functie (Figuur 7.7) nauwelijks bevingen worden voorspeld in het zuidoostelijke deel van het veld terwijl hier met de constante en +95% betrouwbaarheidswaarde partiticoëfficiënt functie (Figuur 7.8) een patroon van bevingen wordt voorspeld dat vergelijkbaar is met de overige delen van het veld. Uit Figuur 7.2, Figuur D.6.1 en Figuur D.7.1 blijkt dat de cumulatieve compactie tot 2023 in het zuidoosten van het Groningen veld voor het marktvaag productiescenario niet meer dan 20 cm bedraagt. Voor deze compactiewaarden varieert de partiticoëfficiënt voor de exponentiële relatie tussen de  $10^{-6}$  en  $10^{-4}$  (Figuur 7.2), terwijl het '95% betrouwbaarheidsgrens' scenario resulteert in partiticoëfficiënten die variëren tussen  $10^{-4}$  en  $10^{-3}$  en het constante scenario een partiticoëfficiënt heeft van  $1 \cdot 10^{-3}$ . Dit geeft een factor 100 tot 1000 hogere waarden voor de partiticoëfficiënt dan voor de exponentiële relatie. Bij hogere waarden voor de partiticoëfficiënt wordt meer reservoirmoment omgezet in seismische energie. Dit verschil is belangrijk voor de berekening van de seismische hazard in de komende jaren. Als blijkt dat de partiticoëfficiënt compactiefunctie een exponentieel verloop heeft (zoals beschreven in NAM, 2013a), dan zal de seismische hazard voor het marktvaag productiescenario (of scenario's met lagere productie) in het zuidoostelijke deel van het Groningen veld significant lager zijn dan de hazard in de overige delen van het veld. Zelfs bij verplaatsing van de productie (en dus ook compactie) naar het zuidelijke deel van het veld (bijvoorbeeld 30 bcmA4 scenario), zal de partiticoëfficiënt met een waarde van  $2 \cdot 10^{-4}$  bij 0,25 cm compactie nog steeds ver onder de waarde van de +95% betrouwbaarheidsgrens en de constante partiticoëfficiënt ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) liggen.

Tabel 7.5 laat de overschrijdingskansen zien op de locatie in het centrum van het veld (Figuur 7.6) voor 1000 catalogi en verschillende partiticoëfficiënt compactie relaties. Deze waarden zijn niet geconvergeerd en derhalve kunnen geen conclusies worden getrokken uit de absolute waarden. Aangezien de random waarden zijn getrokken op basis van een zelfde 'seed' (pseudo-random getallen)

kunnen de uitkomsten wel relatief met elkaar worden vergeleken. Uit deze vergelijking blijkt dat de constante partiticoëfficiëntwaarde ( $1 \cdot 10^{-3}$ ) altijd hogere overschrijdingskansen voor grondversnellingen geeft dan de partiticoëfficiënt op basis van de exponentiële relatie. Dit komt voort uit het feit dat voor een compactie tot 35 cm (het grootste gedeelte van het veld) de partiticoëfficiënt op basis van de exponentiële relatie, lager is dan  $10^{-3}$ . Voor de +95% betrouwbaarheidsgrens zullen de overschrijdingskansen nog hoger uitvallen vanwege de hogere waarden voor de partiticoëfficiënten bij gelijke compactie.

Tabel 7.5. Overschrijdingskansen voor PGA in  $\text{cm/s}^2$  voor de locatie in het centrum (Figuur 7.6) en 1.000 catalogi, uitgerekend voor een constante functie van de partiticoëfficiënt en de exponentiële functie (Figuur 7.5).

Partiticoëfficiënt	2%	10%	50%
1) constant $10^{-3}$	313	198	85
2) exponentieel	293	182	74

### 7.3 Partiticoëfficiënt

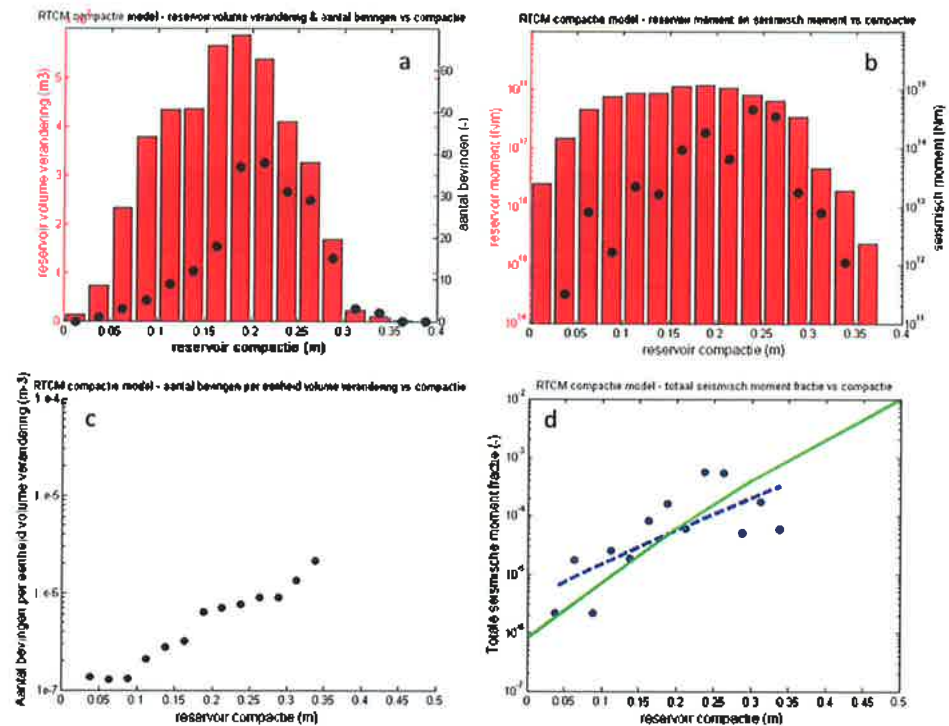
In deze paragraaf wordt ingegaan op de afhankelijkheid tussen de partiticoëfficiënt en de compactie. De relatie voor de partiticoëfficiënt wordt voor het marktvaagscenario berekend met het RTCM compactiemodel. Deze relatie wordt vergeleken met de relatie die door NAM (2013b) is bepaald. Daarnaast wordt een partiticoëfficiënt voor een aantal specifieke deelgebieden afgeleid die door een, min of meer, uniforme cumulatieve compactie worden gekenmerkt. Hiermee wordt geanalyseerd in hoeverre er binnen het Groningen veld sprake is van een ruimtelijk variërende partiticoëfficiënt.

#### 7.3.1 Afleiding van de relatie voor de partiticoëfficiënt voor het hele Groningen veld

De partiticoëfficiënt is bepaald op basis van het cumulatieve compactiegrid uit het RTCM model op datum eind 2011. Het compactiegrid voor 2011 bestaat uit 9070 gridcellen ( $i$  rijen  $\times$   $j$  kolommen), die elk gekarakteriseerd worden door een waarde voor de cumulatieve compactie ( $dH_{i,j}$ ) en een cumulatief compactievolume ( $dV_{i,j}$ ) voor eind 2011. De gridcellen worden op basis van de cumulatieve compactie waarde toegekend aan een specifiek compactie-interval ( $[dH_{\text{start}}-dH_{\text{eind}}]$ ). Hiermee worden in totaal 16 compactie-intervallen onderscheiden, vergelijkbaar met de methode in NAM (2013a,b). De breedte van elk compactie-interval is 0,025 m. Vervolgens wordt per compactie-interval een cumulatief compactievolume of reservoirvolume-verandering ( $dV_{\text{res}}$ ) berekend uit de individuele compactievolumes van alle gridcellen binnen dit interval. Het reservoirmoment wordt berekend uit de relatie  $M_{\text{res}}=2 \cdot G \cdot dV_{\text{res}}$ , waarbij  $G$  de schuifmodulus van het reservoir gesteente ( $G=10$  GPa) beschrijft. De verandering van het reservoirvolume en het reservoirmoment wordt weergegeven in Figuur 7.9 a en b (linker as).

Voor elke aardbeving in het Groningen gasveld na 1995 waarvan de magnitude  $M_L$  groter dan 1,5 is, wordt de dichtstbijzijnde gridcel ( $i,j$ ) geselecteerd en de bijbehorende cumulatieve compactie  $dH_{i,j}$  (totale compactie eind 2011) bepaald. Voor elk compactie-interval  $[dH_{\text{start}}-dH_{\text{eind}}]$  wordt het totaal aantal bevingen (opgetreden na 1995 en met  $M_L > 1,5$ ) berekend en het cumulatieve seismische moment bepaald. Het totale aantal bevingen ( $N_{\text{seis}}$ ) per compactie-interval is geplott in Figuur 7.9a. Het cumulatieve seismische moment ( $M_{\text{seis}}$ ) per compactie-interval

wordt geplot in Figuur 7.9b (rechter as). Voor elk interval wordt het aantal bevingen per eenheid volumeverandering bepaald en geplot in Figuur 7.9c. Tenslotte wordt voor elk compactie-interval de verhouding van het totale seismische moment en het reservoirmoment ( $M_{\text{seis}}/M_{\text{res}}$ ) berekend. Deze fractie (ook wel de totale seismische moment fractie of partiticoëfficiënt genoemd) is weergegeven in Figuur 7.9d.



Figuur 7.9 a) Verandering in het (cumulatief) reservoir volume en aantal bevingen per compactie-interval b) cumulatief reservoirmoment en cumulatief seismisch moment per compactie-interval c) aantal bevingen per eenheid volume verandering weergegeven per compactie-interval d) totale seismisch moment fractie per compactie-interval. Doorgetrokken groene lijn is de relatie voor de partiticoëfficiënt van NAM (2013b) voor het time decay compactiemodel (2013). De onderbroken blauwe lijn geeft de relatie tussen de partiticoëfficiënt en de cumulatieve compactie weer berekend voor het RTCM model.

Ter vergelijking met de 'best fit' voor het RTCM compactiemodel is in Figuur 7.9d tevens een 'best fit' lijn weergegeven die gebaseerd is op de compactieberekeningen voor het 'time decay' model (figuur 4.7c, NAM (2013b)). De 'best fit' is verkregen middels de Matlab-functie *fminsearch*, waarbij is aangenomen dat de geobserveerde fractie van de totale compactie die wordt geacommodeerd door seismische slip een exponentiële trend volgt. De 'best fit' lijn volgt vergelijking 45 op pagina 41 in NAM (2013a,b):

$$\alpha_f' = e^{f+g\Delta h} * (1 - \gamma e^{-g\Delta h(1-\gamma)})$$

waarbij  $\alpha_f'$  de totale seismische moment fractie of partiticoëfficiënt is,  $f$  en  $g$  modelparameters zijn,  $\Delta h$  compactie is en  $\gamma = 0,75$  de fractie van reservoircompactie beschrijft die heeft plaats gevonden voor 1995 (NAM, 2013a,b).

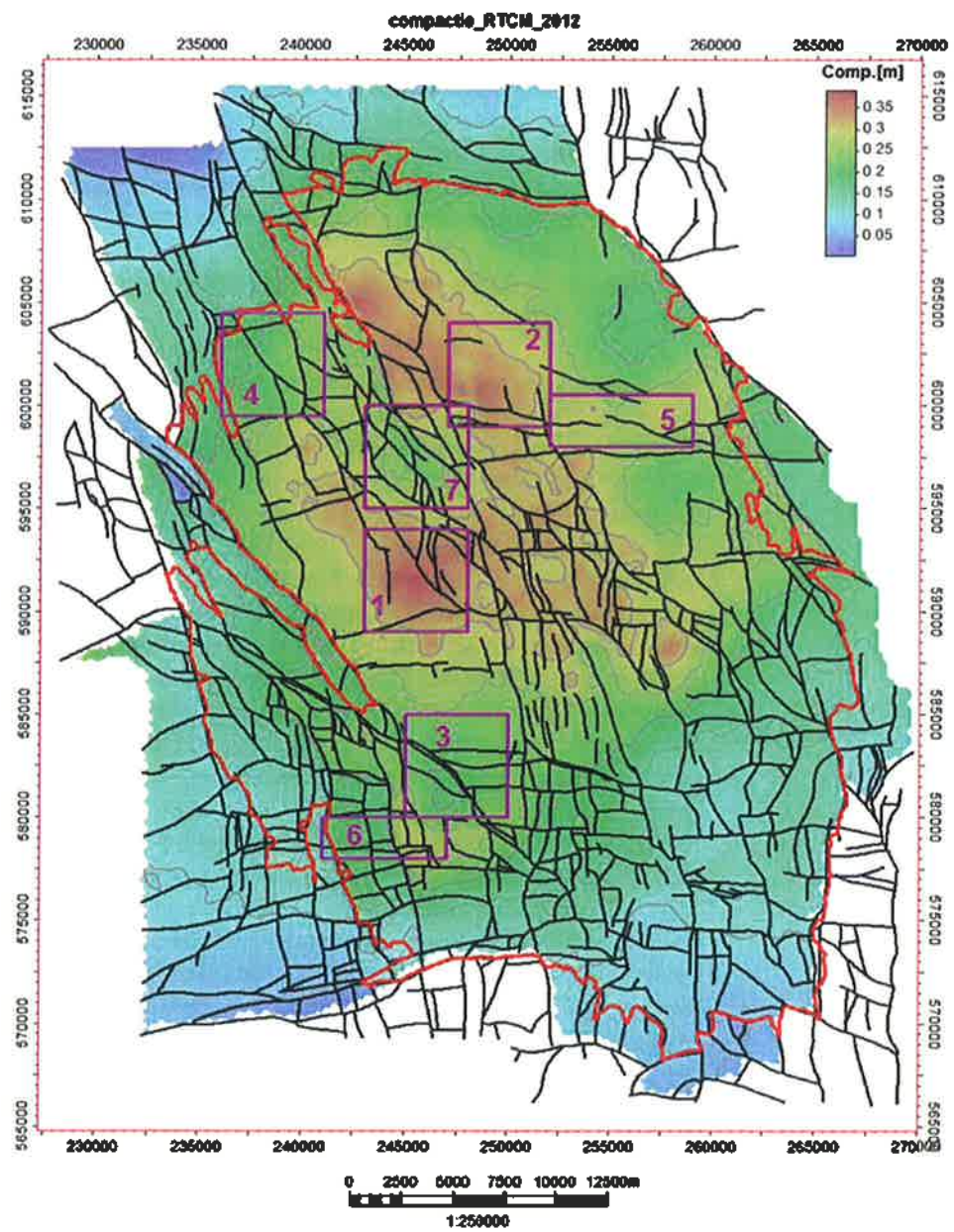
Compactie-intervallen waarbinnen geen aardbevingen zijn geobserveerd (oftewel geen seismisch moment) zijn niet in de data-fit meegenomen.

De functie voor de partiticoëfficiënt die berekend is op basis van het RTCM model wijkt enigszins af van de functie zoals berekend op basis van het NAM 'time decay' model en toont gemiddeld hogere waarden bij lagere cumulatieve compactie en gemiddeld lagere waarden bij hogere cumulatieve compactie. De onzekerheidsmarges voor de partiticoëfficiënt zijn echter groot en de hier berekende waarden voor de partiticoëfficiënt vallen derhalve binnen de onzekerheidsmarges, zoals gepresenteerd in NAM (2013b).

### 7.3.2 *Afleiding van de relatie voor de partiticoëfficiënt voor deelgebieden in het Groningen veld*

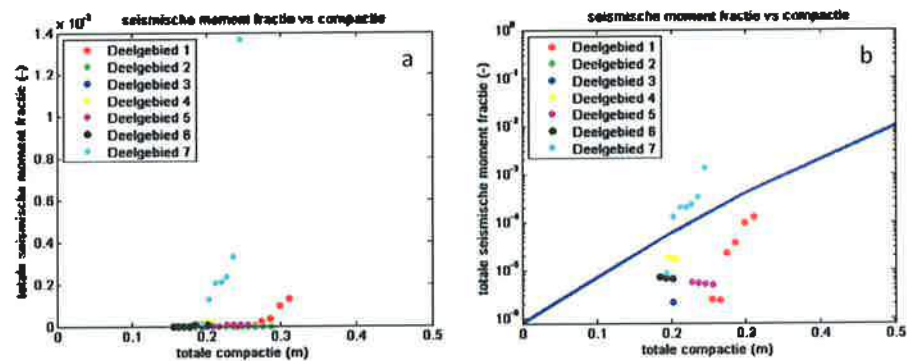
De relatie tussen cumulatieve compactie en seismiciteit is geanalyseerd voor een aantal deelgebieden in het Groningen veld. Hiermee wordt inzicht verkregen in de ruimtelijke kenmerken van de partiticoëfficiënt. De deelgebieden zijn weergegeven in Figuur 7.10. De individuele deelgebieden zijn (op het oog) uitgekozen voor beperkte variatie in compactie om lokale verschillen in partiticoëfficiënt te analyseren. De tijdsperiode van 1996-2012 is opgedeeld in acht tijdsintervallen van ieder twee jaar ( $t_{\text{start}} - t_{\text{eind}}$ ). Voor elk deelgebied en tijdsinterval ( $t_{\text{start}} - t_{\text{eind}}$ ) wordt de gemiddelde cumulatieve compactie binnen het gebied bepaald. Vervolgens wordt voor elk deelgebied en tijdsinterval het totale aantal aardbevingen ( $M_L > 1,5$ ) voor het einde van het tijdsinterval ( $t_{\text{eind}}$ ) geteld en het cumulatieve seismische moment van deze bevingen berekend. Ook wordt voor elk tijdsinterval ( $t_{\text{start}} - t_{\text{eind}}$ ) en deelgebied het totale cumulatieve compactie volume in het deelgebied tot  $t_{\text{eind}}$  bepaald. Op een vergelijkbare wijze wordt hieruit het reservoirmoment en de seismische moment fractie (partiticoëfficiënt) bepaald.

In Figuur 7.11 is per deelgebied de seismische moment fractie of partiticoëfficiënt weergegeven tegen de gemiddelde cumulatieve compactie in het gebied. Hieruit blijkt duidelijk dat de waarde voor de partiticoëfficiënt sterk beïnvloed wordt door de relatief lage cumulatieve compactie en hoge seismiciteit in deelgebied 7. In Hoofdstuk 2 is reeds vermeld dat aan het reservoir in deelgebied 7 – waarschijnlijk ten gevolge van het gebruik van maar één realisatie van het porositeitsmodel – een lage porositeit is toegekend. Het is zeer waarschijnlijk dat het reservoir in werkelijkheid een hogere porositeit heeft en daarmee ook meer cumulatieve compactie kent dan in de modellen wordt berekend. Bij een hogere porositeit en hogere cumulatieve compactie komt de 'best-fit' lijn voor de partiticoëfficiënt voor deelgebied 7 lager te liggen en wordt de spreiding in de datapunten in Figuur 7.11 kleiner. Op basis van het huidige porositeits- en compactiemodel wordt de waarde voor de partiticoëfficiënt waarschijnlijk overschat.



Figuur 7.10 Locatie van de deelgebieden ter bepaling van de lokale relatie tussen cumulatieve compactie en seismisch moment.



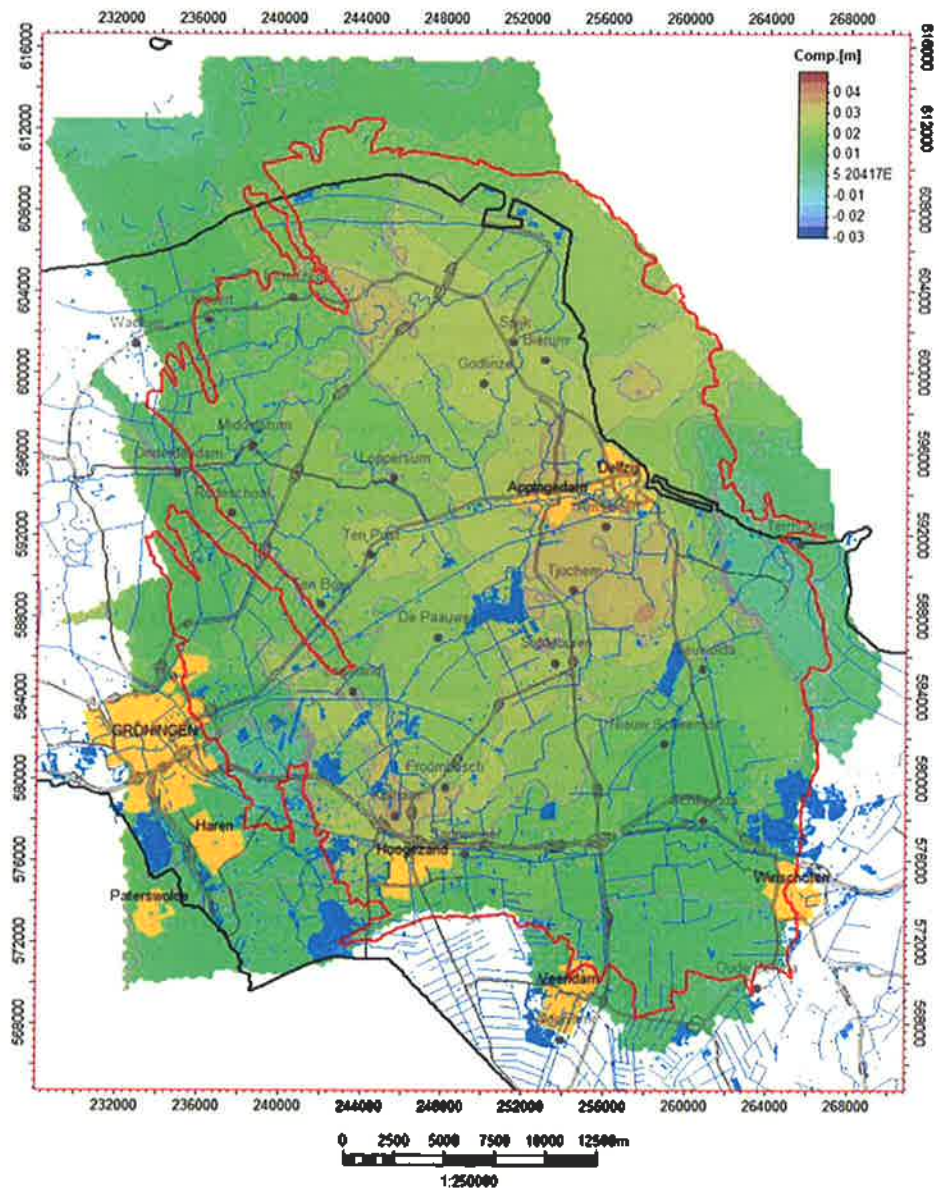


Figuur 7.11 Totale seismische moment fractie of partiticoëfficiënt versus compactie voor 7 deelgebieden in het Groningen gasveld. Locatie van de deelgebieden wordt weergegeven in Figuur 7.10. De blauwe lijn in b) geeft de oorspronkelijke best-fit weer van het 'time decay' compactie model beschreven in NAM (2013b).

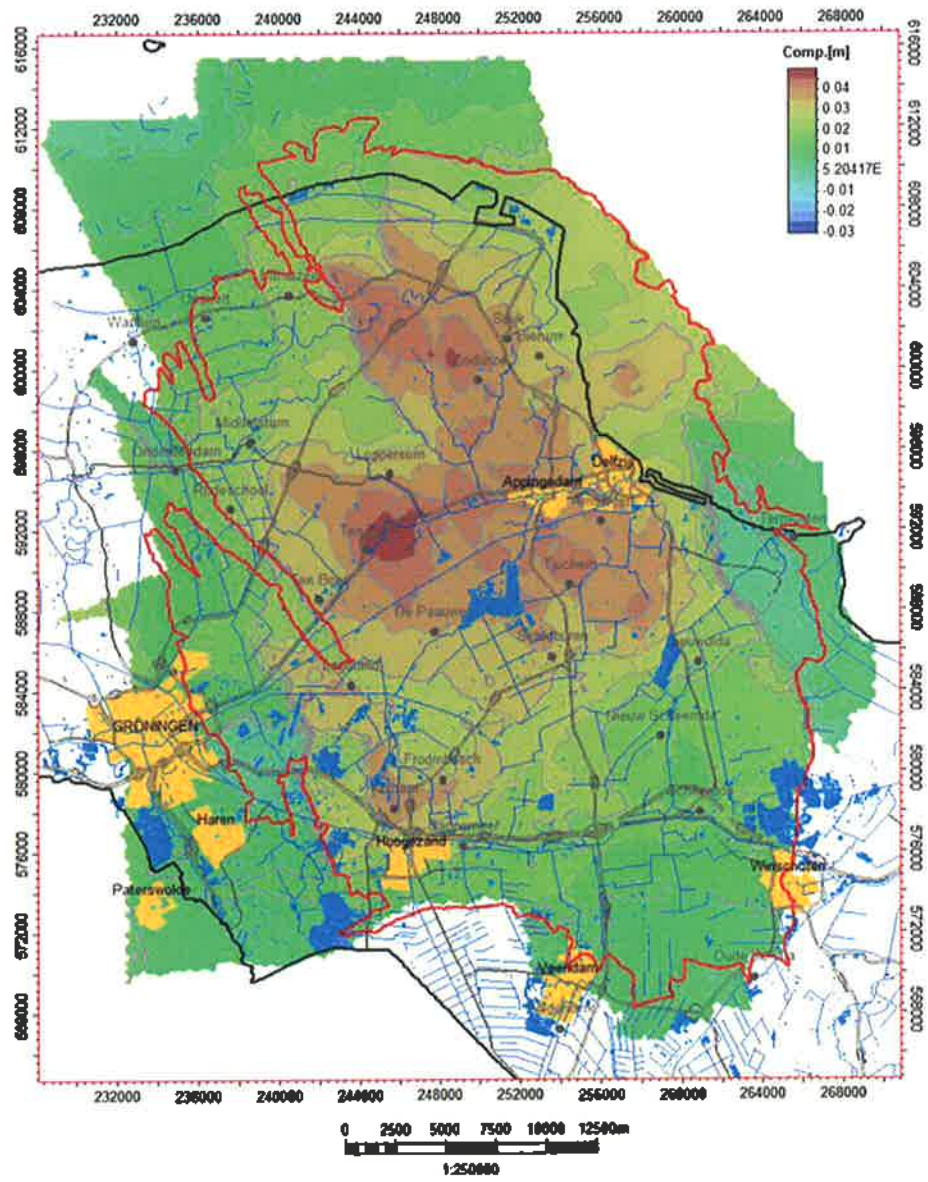
#### 7.4 Seismisch hazard naar seismisch risico

Dit rapport behandelt de verschillende productie- en compactiescenario's, maar geeft geen berekening van het seismisch risico. Hiervoor moet de seismische hazard worden vermenigvuldigd met de effecten (risico = kans x effect). In andere studies wordt wel ingegaan op het seismisch risico (ARUP 2013). In het algemeen zal het seismisch risico hoger zijn in meer stedelijke gebieden vanwege het risico van schade aan bouwwerken. In NAM (2013a,b,d) wordt een directe relatie verondersteld tussen compactie en seismische hazard. Deze paragraaf zal daarom verschillende scenario's vergelijken in termen van compactie, waarbij aangenomen wordt dat compactie direct gerelateerd is aan seismische hazard en daarmee aan seismisch risico.

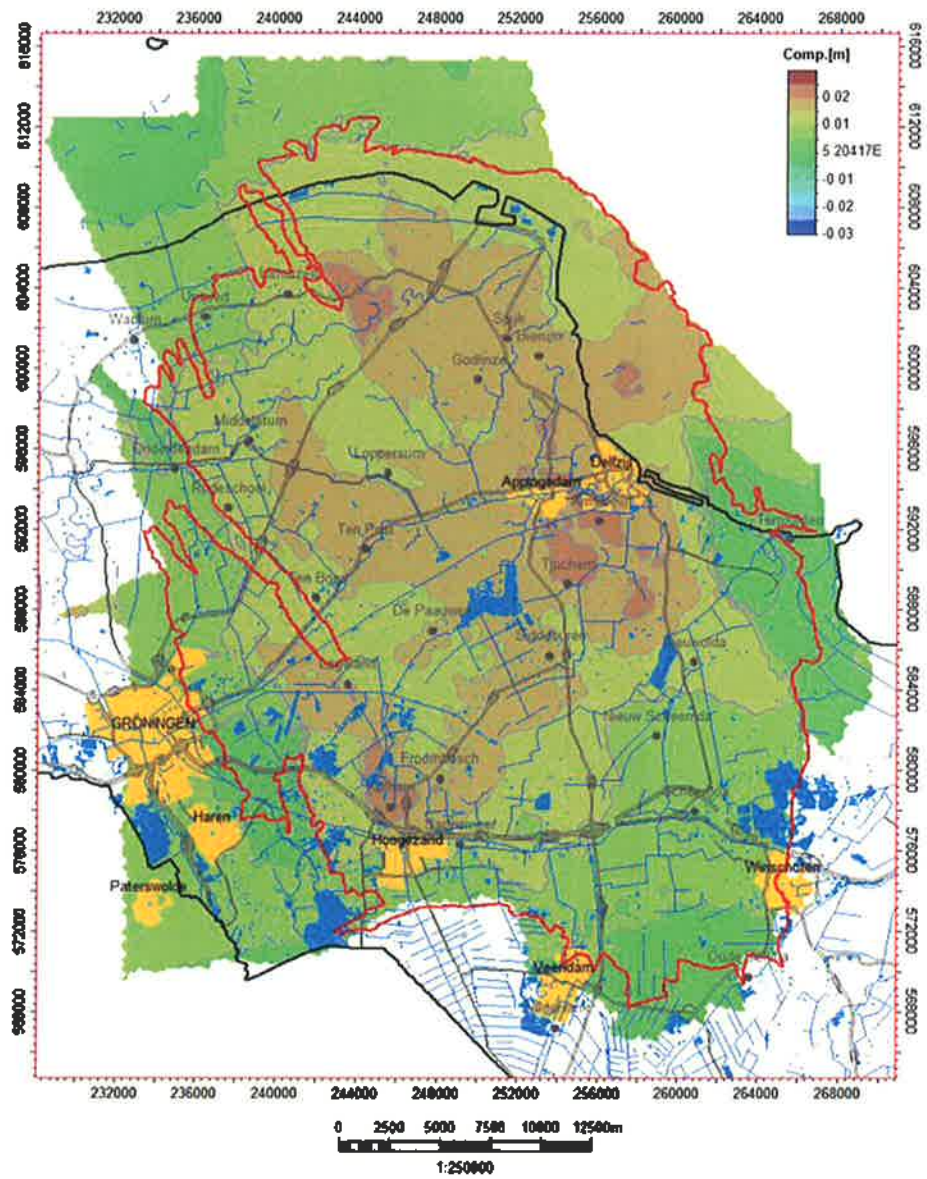
In Figuur 7.12 en Figuur 7.13 worden twee productiescenario's vergeleken in termen van compactie nl. 1) het marktvraag scenario en 2) het 30 bcm/jaar scenario met een stop in de productie voor 5 clusters in het Loppersum gebied (30 bcm A4), voor het tijdsinterval 2013 tot 2018. Deze compactiescenario's zijn geprojecteerd op de topografie van Groningen om inzicht te krijgen in het seismisch risico voor deze scenario's. Het 30 bcm A4 productiescenario (Figuur 7.12) resulteert niet alleen in een gemiddeld lagere compactie maar leidt ook tot ruimtelijke verschillen over het veld. Vooral in het Loppersum – Middelstum gebied leidt dit scenario tot 3 cm minder compactie dan het marktvraag productiescenario. Verder is ook duidelijk dat met het aangepaste productiescenario de compactie in de buurt van Groningen stad en in de buurt van Delfzijl/Appingedam wordt verminderd. Aangezien de seismisch hazard volgens de methode van NAM (2013b) direct gecorreleerd is met de berekende compactie, zal het verminderen van de compactie ook een vermindering van de seismische hazard tot gevolg hebben, zij het mogelijk met enige vertraging. Deze vertraging kan optreden ten gevolge van de lokale response van compactie op drukdaling alsook van drukkivellerende effecten op veldschaal. Figuur 7.14 en Figuur 7.15 tonen de berekende compactie voor de beide onderzochte scenario's over de periode van 2013 tot 2016. Hiervoor gelden dezelfde conclusies als eerder.



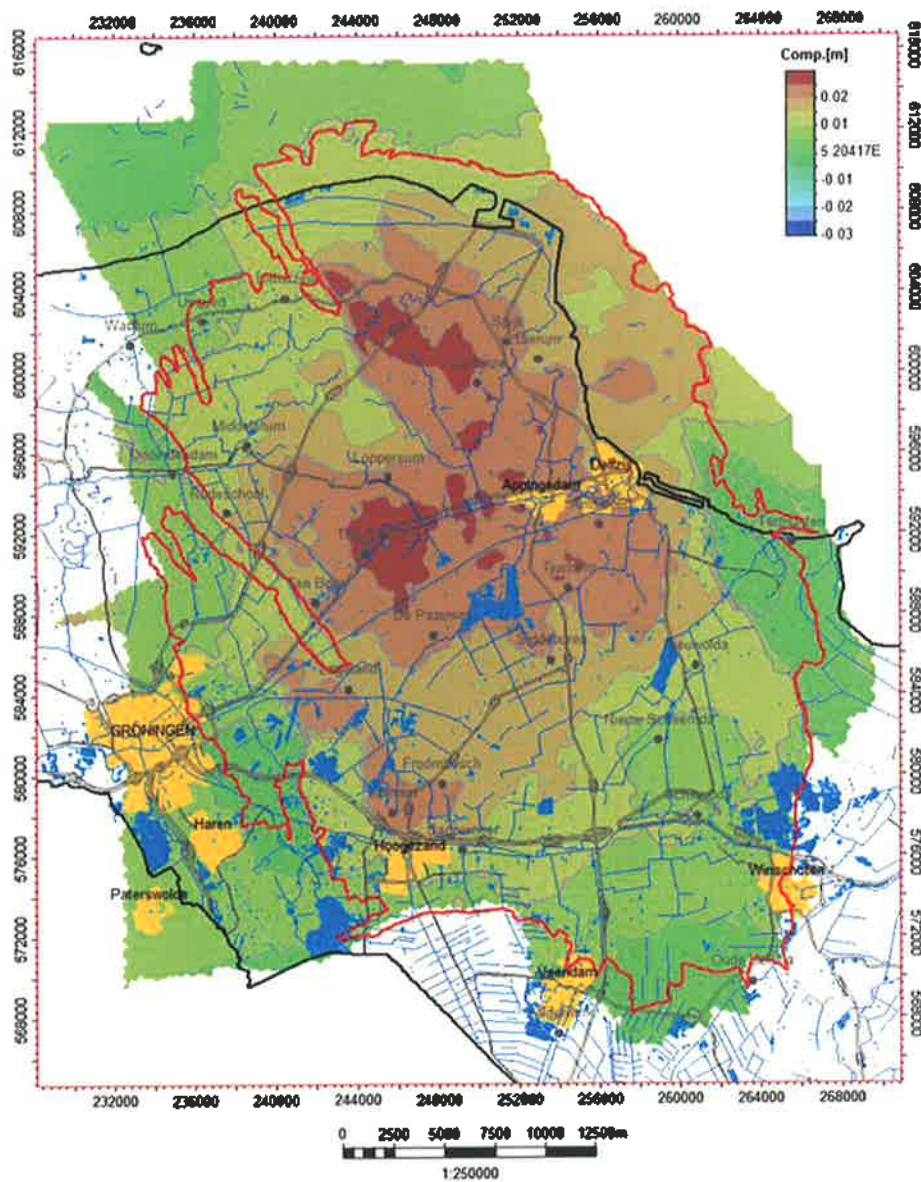
Figuur 7.12 Compactie in het interval 2013 tot 2018 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2).



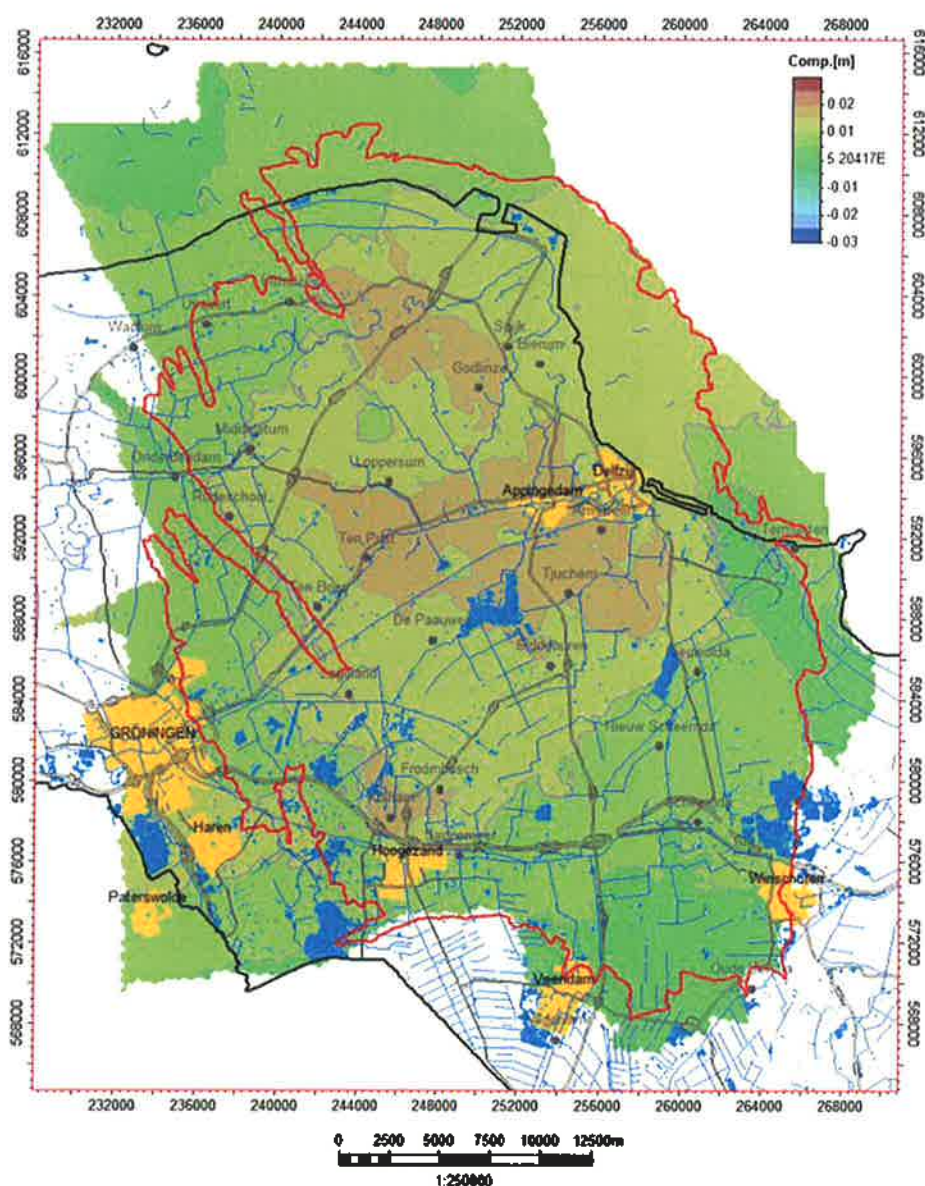
Figuur 7.13 Compactie in het interval 2013 tot 2018 voor het marktvaag scenario (Tabel 3.2).



Figuur 7.14 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2).



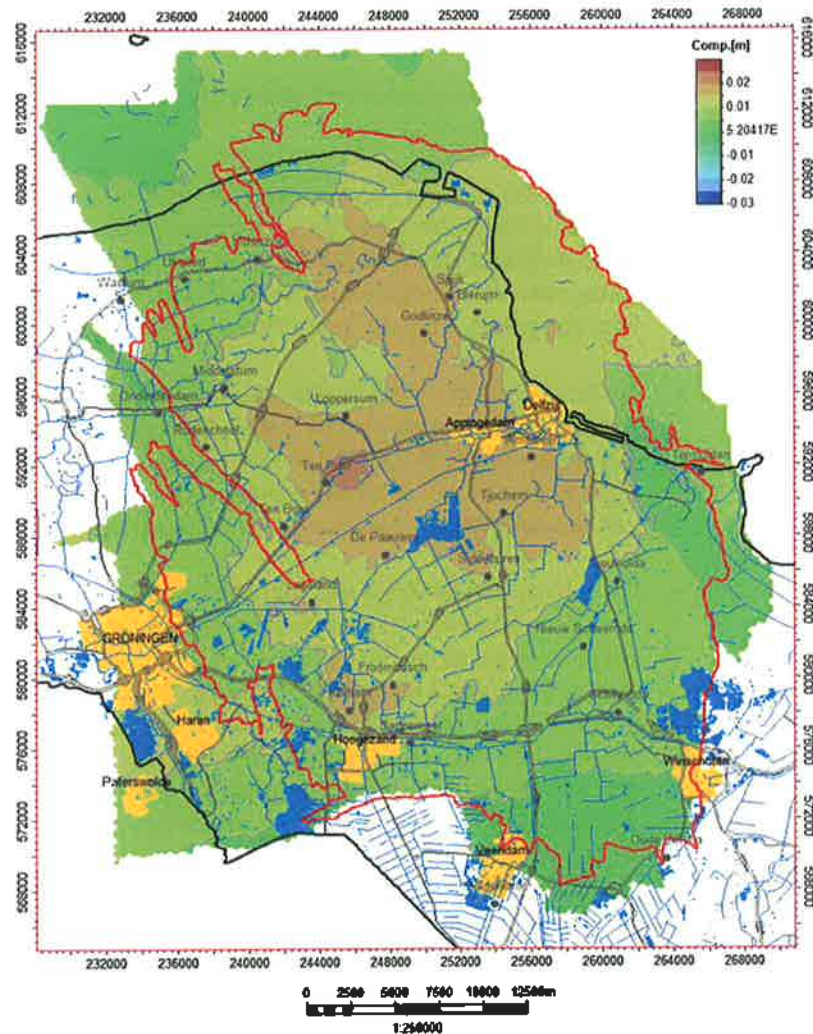
Figuur 7.15 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het marktvaag scenario (Tabel 3.2).



Figuur 7.16 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2) en berekend met het Time-Decay compactiemodel.

Figuur 7.12 tot Figuur 7.15 zijn berekend op basis van het RTCM compactiemodel. Wanneer het Time-Decay model wordt gebruikt, worden voor het 30 bcm A4 scenario en het marktvaagscenario over de periode 2013 tot 2016 compactiewaarden berekend zoals weergegeven in Figuur 7.16 en Figuur 7.17. Hierbij valt op dat de compactie voor beide scenario's een stuk lager is dan de compactie berekend met het RTCM compactiemodel. Hiervoor zijn twee oorzaken aan te wijzen: Ten eerste wordt in Figuur 7.16 en Figuur 7.17 de compactie volgens de beste fit voor het Time-Decay model weergegeven zoals die is herleid in Hoofdstuk 5. Bij deze fit wordt de maximum bodemdaling onderschat en dus ook de maximum compactie. Dit is dus niet vergelijkbaar met de compactie zoals die in het winningsplan Groningen op basis van het Time-Decay model wordt berekend, en

waarbij de maximum compactie goed wordt gefit maar er aan de randen van het veld sprake is van overschatting. Ten tweede zit er een vertragende tijdsconstante in het Time-Decay model van 4,85 jaar (Hoofdstuk 5) die ervoor zorgt dat de effecten van hoge productie pas later in de tijd zichtbaar worden. Dit effect zal nog uitdrukkelijker plaatsvinden in bij het Time-Decay model in het winningsplan Groningen omdat daar een tijdsconstante van 7,3 jaar wordt gerapporteerd. Hierdoor worden veranderingen in productie uitgespreid over langere perioden (5-15 jaar). Voor beide compactiemodellen en beide perioden zal gelden dat het seismische hazard omlaag wordt gebracht door het 30 bcm A4 scenario. De verschillen zijn echter minder groot wanneer wordt uitgegaan van het Time-Decay compactiemodel.



Figuur 7.17 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het marktvaag scenario (Tabel 3.2), berekend met het Tim-Decay compactiemodel.

De resultaten van deze paragraaf geven slechts een indicatie van de vermindering van de seismische hazard. Voor definitieve uitspraken omtrent de mogelijke vermindering van de seismische hazard, moet de rekenmethode zoals besproken in Paragraaf 7.1 worden toegepast en de resultaten voor deze productiescenario's worden vergeleken.

## 7.5 Conclusies en aanbevelingen

### 7.5.1 Conclusies

Voor de seismische hazard kan het volgende geconcludeerd worden op basis van de besproken uitkomsten en analyses in deze paragrafen:

- De partiticoëfficiënt vertaalt reservoirmoment naar seismisch moment en is dus in sterke mate bepalend voor de seismische hazard.
- Het reservoirmoment dat nog niet is vrijgekomen als seismisch moment in eerdere jaren, wordt maar beperkt meegenomen. Hierdoor zijn hogere magnitudes, dan die voor het specifieke interval, niet uit te sluiten.
- Reductie van de onzekerheid van de partiticoëfficiënt zal de seismische hazard mogelijk reduceren.
- De seismische hazard analyse kan niet differentiëren tussen verschillende productiefilosofieën. Dit wordt veroorzaakt door de trekkingen in de Monte Carlo methode van NAM (2013a,b) voor magnitude en locatie. Deze zijn niet gekoppeld, zodat hogere magnitudes kunnen plaatsvinden in gebieden met lage compactie, hetgeen zeer onwaarschijnlijk is.
- De keuze voor de relatie tussen compactie en partiticoëfficiënt leidt tot verschillende waarden van de maximale magnitudes die voor de komende 10 jaar variëren tussen 4,0 en 6,0. Hierbij geldt de aanname dat de beschikbare energie (fractie van de totale energie van het systeem gegeven door de partiticoëfficiënt) in één keer wordt omgezet in seismische energie.
- De kans op het optreden van een beving met maximale magnitude van 6,0 binnen de komende 10 jaar is verwaarloosbaar aangezien deze magnitude volgt uit de aanname dat de ratio tussen reservoirmoment en seismisch moment één is (partiticoëfficiënt is één) en dat dus alle energie in het systeem in één keer vrij zal komen. Naast het feit dat de partiticoëfficiënt in het centrum van het veld momenteel een waarde van ca.  $1 \cdot 10^{-3}$  heeft (en dus veel lager is dan één), is het zeer onwaarschijnlijk dat alle beschikbare energie in het systeem over de komende 10 jaar vrijkomt in één beving.
- Op basis van de huidige porositeit en compactiemodel wordt de partiticoëfficiënt overschat. De partiticoëfficiënt wordt sterk beïnvloed door het compactiemodel en daarmee ook door het porositeitsmodel. Het gebied met lage compactie en hoge seismiciteit (deelgebied 7) trekt de partiticoëfficiënt omhoog, terwijl de lage porositeit in dit gebied discutabel is.
- Scenario 30 bcm A4 leidt over het hele veld tot minder compactie door lagere productie. Door het stopzetten van de 5 productieclusters in het Loppersumgebied zal met name hier compactie nog lager zijn.
- Het Time-Decay model geeft minder grote verschillen tussen beide scenario's vanwege de in het winningsplan aangenomen tijdsvertraging van 7,3 jaar die schommelingen in productie uitspreid over langere periodes van 5-15 jaar.



- Het is aannemelijk dat scenario 30 bcm A4 leidt tot een lagere seismische hazard vanwege de directe relatie met compactie.

#### 7.5.2 Aanbevelingen

TNO-AGE beveelt op basis van deze bevindingen aan dat:

- de trekkingen in de Monte Carlo methode voor magnitude en locatie worden gekoppeld, zodat voorkomen wordt dat hogere magnitudes plaatsvinden in gebieden met lage compactie, hetgeen zeer onwaarschijnlijk is. Hierdoor wordt differentiatie tussen verschillende productiefilosofieën mogelijk.
- de berekeningen voor de seismisch hazard worden uitgevoerd voor alle scenario's op basis van de verschillende compactie-partiticoëfficiënt functies.
- De berekening van het totaal seismisch moment zou bepaald moeten worden uit het beschikbare seismisch moment aan het eind van het interval minus het geobserveerde cumulatieve seismisch moment in het begin van het interval (alle bevingen die tot het begin van het interval hebben plaatsgevonden). Hierdoor zou reservoir moment wat tot nu toe nog niet vrijgekomen is als seismisch moment alsnog kunnen worden vrijgegeven in een beving.
- een studie wordt uitgevoerd waarmee de onzekerheidsbandbreedte van de partiticoëfficiënt kan worden verminderd.
- een studie wordt verricht waarmee meer inzicht wordt verkregen in de compactie-partiticoëfficiënt relatie en het effect op het seismische hazard voor verschillende deelgebieden van het Groningen veld.

## 8 Discussie en Conclusies seismische hazard

In het rapport zijn reeds per hoofdstuk in detail conclusies en aanbevelingen gegeven. Hier wordt eerst een samenvatting gegeven van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen, die uit het uitgevoerde onderzoek naar voren zijn gekomen ten aanzien van de diverse modellen. Vervolgens worden daaruit conclusies getrokken voor de onderwerpen bodemdaling en seismische hazard, zoals te behandelen in het winningsplan.

### 8.1 Modellen

#### **Statisch reservoirmodel**

Het door de NAM aangeleverde statisch reservoirmodel is op twee manieren bekeken. Ten eerste is de architectuur van het reservoirmodel beoordeeld tegen de achtergrond van fundamentele concepten voor afzetting van sediment.

TNO-AGE meent dat het concept van 'onlap' moet worden doorgevoerd. Mogelijk kan dit leiden tot een andere reservoirindeling met name in het zuidelijke deel van het veld. Het effect daarvan op de ruimtelijke verdeling van reservoir eigenschappen (en daarmee op compactie) is nu niet in te schatten.

Aanbevolen wordt verder de uit seismische data afgeleide Akoestische Impedantie (AI) als extra informatie te betrekken in het modelleren van de reservoirarchitectuur en de verdeling van reservoir eigenschappen (met name de porositeit).

Ten tweede is gekeken naar lokale discrepanties tussen de gemodelleerde bodemdaling en de gemeten bodemdaling (gebied bij Delfzijl en de uiterste noordwest hoek). TNO-AGE concludeert dat de door de NAM toegepaste methode voor het bepalen van de ruimtelijke verdeling van reservoir eigenschappen (en dan met name de porositeit) niet voldoende de onzekerheden toont.

Aanbevolen wordt om de onzekerheidsmarge in de ruimtelijke interpolatie te betrekken in de analyse van de discrepanties tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling. Mogelijk kan informatie uit compactie en bodemdaling (samen met AI) bijdragen tot een verbeterd reservoirmodel.

#### **Dynamisch reservoirmodel**

Het door de NAM aangeleverde dynamisch reservoirmodel is op twee manieren bekeken. Ten eerste is beoordeeld of de passing van het model ('history match') aan gemeten data van gasproductie, drukken en waterinflux adequaat is uitgevoerd. Voor het traditionele doel van het maken van materiaal-balans analyse (GIIP) en het opstellen van productieprognoses is het model geschikt. Het gaat dan om de schaal, die wordt 'gevoeld' door de productie- en observatieputten. Echter, het model is niet in staat om drukken meer lokaal betrouwbaar te modelleren, vanwege het beperkte ruimtelijke oplossend vermogen van de productie-gegevens. In het dynamisch reservoirmodel zijn aquifers deels numeriek gerepresenteerd en deels door analytische functies. Het is opmerkelijk dat de equivalent van de Ameland Kleisteen over het gehele reservoirmodel is gekarakteriseerd met een factor  $1,5 \cdot 10^{-8}$  op de verticale permeabiliteit, ook daar waar de Ameland Kleisteen lithologisch geen kleisteen meer is.

Ten tweede is gekeken naar discrepanties tussen de gemodelleerde en de gemeten bodemdaling. Een van de discrepanties is in het noordwesten rond Usquert. De NAM heeft twee dynamische modelvarianten berekend die hier

verschillende resultaten geven. Het eerste is een model met zwakke aquifer, het tweede een model met sterke aquifer. TNO-AGE meent, dat de sterke aquifer variant niet realistisch is. De analytisch aquifer is dermate groot gekozen, dat hij fysiek niet mogelijk is. Daarnaast geeft dit model geen goede passing van het gas-water contact en de gemeten drukken in het noordwesten van het veld. Er zijn mogelijke alternatieve verklaringen voor de slechte fit van de gemodelleerde aan de geobserveerde bodemdaling. Ten eerste is de controle op het porositeitsmodel in het noordwesten beperkt vanwege geringe datadichtheid. Bovendien is in het noordwesten sprake van breuken met groot verzet, die van invloed zouden kunnen zijn op de gemodelleerde porositeitsverdeling. Ten tweede geven meetgegevens uit diverse putten in het Waddengebied aanwijzingen voor het bestaan van gas in de watervoerende laag onder het gas-water contact (de zgn. bodemaquifer). Daar waar dit optreedt heeft de aquifer een veel hogere compressibiliteit dan die van water. Dit verschijnsel zou de waargenomen discrepantie tussen gemodelleerde en gemeten bodemdaling in het noordwesten kunnen verklaren, zonder dat er significante invloed is op de drukverdeling in de rest van het veld (zoals dat met de sterke aquifer variant wel het geval is). TNO-AGE beveelt aan dit nader te onderzoeken.

#### **Compactie in het reservoir**

TNO-AGE heeft vanuit het isotachen-concept een aantal varianten van compactiemodellen opgezet en geanalyseerd en geeft de voorkeur aan het Rate Type Compactie Model (RTCM) opzet voor een isotachen formulering. Dit RTCM model fit de geobserveerde bodemdaling binnen twee standaard deviaties voor 78% van de peilmerken. Het RTCM (en ook het gelineariseerde isotachenmodel) heeft een elastisch component, die direct reageert op lokale drukveranderingen en een kruipcomponent, die vertraagd reageert. Deze directe component levert instantane verandering bij veranderingen in productie. Hierdoor kan het RTCM model differentiëren tussen verschillende productiescenario's (productiebeperkingen en andere productiefilosofieën)

Het door de NAM bij voorkeur gebruikte Time-Decay model is niet in staat om belastingwisselingen te representeren zoals gemeten op laboratorium schaal. Dit model kent een tijdsvertraging (7,3 jaar) die niet afhangt van reservoir eigenschappen of belastingsnelheid. Het gevolg hiervan is dat het Time-Decay model alleen met een vaste vertraging kan reageren op drukveranderingen. Verschillen tussen productiescenario's worden uitgesmeerd over periodes van 5-15 jaar. De reactie van het Time-Decay model op drukveranderingen is trager en globaler dan die van het RTCM model. Hierdoor kan geen conclusie worden getrokken over preferentiële productiescenario's berekend met het Time-Decay model.

Aanbevolen wordt nader onderzoek te doen naar ruimtelijke opschaling van compactiemodellen van laboratorium-schaal naar veldschaal.

#### **Bodemdaling**

Het analytische Geertsema-Van Opstel model voor de vertaling van compactie naar bodemdaling lijkt adequaat. TNO-AGE heeft geen aanwijzingen gevonden, dat inhomogeniteiten in de overburden van het Groningen veld (met name zoutstructuren) van significante invloed zijn geweest op de berekende bodemdaling.

Niet uit te sluiten is overigens, dat kruip van steenzout (zoals bekend uit de zoutmijnbouw) van invloed is op het tijdafhankelijk gedrag van de bodemdaling. Dit zou in numerieke geomechanische modellen nader onderzocht moeten worden.

Het RTCM model geeft volgens het marktvraag productiescenario als maximum bodemdaling 39,2 cm in 2025, 45,3 cm in 2050 en 46,7 cm in 2080. De contouren van de nog te verwachten bodemdaling (2013-2080) in de TNO-AGE analyse en de NAM analyse komen overeen met een maximum van 17 cm in het diepste punt.

TNO-AGE beveelt aan de primaire waterpassingen van 1978 en 1981 toe te voegen aan de differentiestaat. Zij bieden mogelijk belangrijke aanvullende informatie over het vertraagd op gang komen van de bodemdaling en daarmee over het fysisch mechanisme daarachter.

### **Geomechanische modellering**

Uit de 2-D geomechanische modellering is gebleken dat breukreactivatie en slip optreedt tijdens depletie bij zowel de differentiële compactie over de breuk, als de differentiële compactie binnen de reservoir compartimenten aan weerszijden van de breuk. Voor de gemodelleerde geometrieën, met representatieve waarden voor Groningen, is de reservoir compactie tot een afstand van circa twee km nog van invloed op de spanningscondities en verplaatsingen op de breuk.

Zowel de door TNO-AGE beschreven Diana modellen als de compactie modellen gebruikt in de seismische hazard analyse van de NAM gaan uit van een volledig elastische compactie van het reservoirgesteente. Er wordt geen rekening gehouden met (de dissipatie van energie in) permanente plastische deformatie van het reservoirgesteente. Het gevolg hiervan is dat de huidige geomechanische modellen geen uitspraak kunnen doen over eventuele beperking van de partiticoëfficiënt die de fractie aangeeft van het reservoirmoment dat omgezet kan worden in seismisch moment.

TNO-AGE beveelt aan te onderzoeken hoe reservoircompactie zich in de tijd ontwikkelt in elastische modus en inelastische modus. Resultaten daarvan zijn van groot belang voor het begrip van de 'opslag' van energie (via de inelastische modus) en het potentieel voor ontlading van energie via aardbevingen (via de elastische modus). Micro-fysisch onderzoek kan hier leiden tot beter inzicht in het tijd- of snelheidsafhankelijke gedrag van reservoircompactie en frictiegedrag van de breuken.

In de 'finite strain limit' gebruikt door NAM wordt geen rekening gehouden met het feit dat ook schuifspanningen buiten het reservoir gemobiliseerd kunnen worden tijdens een beving (met name bij aanwezigheid van breuken met kritieke spanningscondities (Garagash et al., 2012). De potentiële reactivatie van het breukoppervlak op grotere afstanden van het reservoir kan alleen correct gemodelleerd worden wanneer ook het frictiegedrag van de breuk (het snelheidsafhankelijke gedrag van de frictie) in de modellering wordt geïmplementeerd

### **Seismisch hazard**

De keuze van de NAM voor de relatie tussen compactie en partiticoëfficiënt leidt tot waarden voor de maximale magnitudes die voor de komende 10 jaar variëren

tussen 4,0 en 6,0. De kans op het optreden van een beving met maximale magnitude van 6,0 binnen de komende 10 jaar is verwaarloosbaar, aangezien deze magnitude volgt uit de aanname dat de ratio tussen reservoirmoment en seismisch moment één is (partiticoëfficiënt is één) en dat dus alle energie in het systeem in één keer vrij zou komen. Naast het feit dat de huidige gemeten partiticoëfficiënt in het centrum van het veld momenteel een waarde van ca  $1 \cdot 10^{-3}$  heeft (en dus veel lager is dan één), is het zeer onwaarschijnlijk dat alle beschikbare energie in het systeem over de komende 10 jaar vrijkomt in één beving. Dit wordt bevestigd door waarnemingen in overige Nederlandse gasvelden, waar de verhouding van het cumulatief seismisch moment van de bevingen over het algemeen minder dan 1% bedraagt van het reservoirmoment. Daarnaast wordt op basis van het huidige porositeit en compactiemodel de partiticoëfficiënt overschat. De partiticoëfficiënt wordt sterk beïnvloed door het compactiemodel en daarmee ook door het porositeitsmodel. Het gebied met lage compactie en hoge seismiciteit (deelgebied 7) trekt de partiticoëfficiënt omhoog, terwijl de lage porositeit in dit gebied discutabel is.

TNO-AGE beveelt aan dat een studie wordt uitgevoerd waarmee de onzekerheidsbandbreedte van de partiticoëfficiënt kan worden vermindert. Daarnaast beveelt TNO-AGE aan dat een studie wordt verricht waarmee meer inzicht wordt verkregen in de relatie tussen seismisch moment en compactie en het effect daarvan op het seismische hazard voor verschillende deelgebieden in het Groningen veld.

In de methode van NAM zijn de trekkingen voor magnitude en locatie zijn niet gekoppeld in de seismische hazard analyse, zodat hogere magnitudes kunnen plaatsvinden in gebieden met lage compactie, hetgeen zeer onwaarschijnlijk is. Het gevolg hiervan is dat de seismische hazard wordt uitgesmeerd over het veld. TNO-AGE beveelt aan de trekkingen voor magnitude en lokatie te koppelen.

Samenvattend is het seismisch hazard heel gevoelig voor een aantal onzekerheden en keuzes in de bepaling van de compactie en het seismische hazard. Voorbeelden van onzekerheden zijn de partiticoëfficiënt, het porositeitsmodel, en de invloed van aquifers die aan het reservoirmodel zijn gekoppeld. Daarnaast spelen verschillende keuzes nog een belangrijke rol zoals het compactiemodel en het productiescenario. Hieruit volgt dat de amplitude van de seismische hazard direct gekoppeld is aan de productie(beperking)scenario's. Lagere productie resulteert in een lagere seismische hazard. De door de NAM gebruikte methode is niet geschikt als differentiatie tussen verschillende productiefilosofieën (uit welke delen van het veld wordt geproduceerd). Aangezien seismische hazard direct gerelateerd is aan compactie kunnen verschillen tussen compactiescenario's worden vergeleken voor de verschillende productiefilosofieën. Hierbij wordt in het scenario waarbij de productie wordt verlaagd naar 30 bcm/jaar en de productie uit de putten rondom Loppersum per 01-01-2014 wordt gestopt (30 bcm A4 scenario) een reductie van 31% in compactie geconstateerd t.o.v. het 30 bcm scenario zonder alternatieve productie filosofie (oftewel handhaving van productie bij Loppersum).

## 8.2 Gevolgen voor bodembeweging (winningsplan)

### Dynamisch reservoirmodel

TNO-AGE beveelt aan het sterke aquifer model niet in te zetten als variant voor het winningsplan. Dit model geeft aanleiding tot significante, maar niet-realistische drukhandhaving in de prognoses van de drukontwikkeling (en dus compactie) in het noordwesten tot midden van het veld.

### Bodemdaling

Het RTCM model geeft volgens het marktvaag productiescenario als maximum bodemdaling 39,2 cm in 2025, 45,3 cm in 2050 en 46,7 cm in 2080. Deze waarden zijn berekend met het RTCM model, waarin een vrije vermenigvuldigingsfactor op de compactie-coëfficiënt is toegelaten. Als deze factor op de waarde 1 wordt vastgezet, dan resulteert een aanzienlijk grotere resterende bodemdaling, zoals de NAM in haar onderzoek laat zien.

De vorm van de nog te verwachten bodemdaling berekend met het RTCM model lijkt op die in het door NAM met het Time-Decay model berekende contouren, met het verschil dat de contouren in het centrum buiten die van de NAM liggen en aan de rand erbinnen in overeenkomst met de conclusies ten aanzien van het Time-Decay model dat de daling aan de rand overschat en in het centrum onderschat. De verschillen met de NAM contourkaart zijn maximaal ongeveer  $\pm 1$  cm.

### Seismisch hazard

Het 30bcmA4 scenario geeft tot 31% minder compactie in het centrum van de kom in de periode 2013-2023 in vergelijking met het 30bcm scenario.

Het scenario 30 bcm A4 leidt over het hele veld tot minder toename van de compactie door lagere productie. Door het stopzetting van de 5 productieclusters in het Loppersumgebied zal met name in dit gebied de toename van de compactie nog lager zijn. Het is aannemelijk dat scenario 30 bcm A4 leidt tot een lagere seismische hazard vanwege de directe relatie met compactie.

Het Time-Decay model geeft minder grote verschillen in compactie tussen het marktvaag en het 30 bcm A4 scenario. Dit komt door de in het NAM Time-Decay model aanwezige tijdsvertraging van 7,3 jaar, die het effect van variaties in productie op de compactie uitspreid over langere periodes van 5-15 jaar.

## 9 Referenties

- Aki, K., 1972. Earthquake mechanism. *Tectonophysics* 13 (1-4): p. 423-446.
- Akkar, S., Sandikkaya, M.A., Bommer, J.J., 2013. Empirical ground motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bull. of Earthquake Eng.*, DOI 10.1007/s10518-013-9461-4.
- ARUP, 2013. Seismic risk study – Earthquake Scenario-Based Risk Assessment. REP/229746/SR001. Draft 26 november 2013.
- Bommer, J., 2013. Proposals for new GMPEs for the prediction of PGA and PGV in the Groningen gas field. Draft 6 augustus 2013.
- Byerlee, J.D., 1978. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics* 116 (4-5): p. 615-626.
- Caro Cuenca, M., Hanssen, R.F., Hooper, A.J., Arikan, M., 2011. Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis. *Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry from ESA and 3<sup>rd</sup> party missions 'FRINGE 2011'*, Frascati, Italy, Sep 19-23 2011.
- Caro Cuenca, M. 2012., GMES-Service for Mapping and Monitoring Subsidence Hazards in Coastal Lowland Areas around Europe, FP-7-SPACE-2009-1 GA No. 242332.
- Cesca, S., Dahm, T., Juretzek, C., Kühn, D., 2011. Rupture process of the 2001 May 7 Mw 4.3 Ekofisk induced earthquake. *Geophysical Journal International* 187 (1): p. 407-413.
- Dahm, T., Krüger, F., Stammler, K., Klinge, K., Kind, R., Wylegalla, K., Grasso, J., 2007. The 2004 Mw 4.4 Rotenburg, Northern Germany, earthquake and its possible relationship with gas recovery. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 97 (3): p. 691-704.
- De Waal, J.A., 1986. On the rate type compaction behavior of sandstone reservoir rock, PhD thesis, Delft.
- Den Haan, E.J., 1994. Vertical compression of soils, PhD thesis, Delft University of Technology.
- Den Haan, E.J., 2003. Het a,b,c-isotachenmodel: hoeksteen van een nieuwe aanpak van zettingsberekeningen, *Geotechniek*, oktober 2003.
- Dewers, T., Hajash, A., 1995. Rate laws for water assisted compaction and stress-induced water-rock interaction in sandstones. *Journal of Geophysical Research*, Volume 100 (B7) p. 13093-13112.
- Dost, B., Kraaijpoel, D., 2013. The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen). De Bilt: KNMI.

- Garagash, D.I., Germanovich, L.N., 2012. Nucleation and Arrest of Dynamic Slip on a Pressurized Fault. *Journal of Geophysical Research*, Volume 117 (B10). Doi: 10.1029/2012JB009209.
- Geertsma, J., 1973. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs, J. *Petr. Tech.* p. 734-744.
- Grötsch, J., Sluijk, A., Van Ojik, K., De Keijzer, M., Graaf, J., Steenbrink, J., 2011. The Groningen Gas Field: Fifty years of exploration and gas production from a Permian dryland reservoir. *SEPM Special Publication No. 98*, ISBN 978-1-56576-300-5, p. 11-33.
- Haak, H.W., Dost, B., Goutbeek, F.H., 2001. Seismische analyse van de aardbevingen bij Alkmaar op 9 en 10 september en Bergen aan Zee op 10 oktober 2001. Technical Report No. TR-239. De Bilt: KNMI.
- Hanks, T.C., Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, Volume 84 (85).
- Hettema, M.H.H., Schutjens, P.M.T.M., Verboom, B.J.M., Gussinklo, H.J., 2000. Production-induced compaction of a sandstone reservoir: The strong influence of stress path. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering August*.
- Hoefnagels, A.A.J.V., 1995. Analyse van bewegingen van ondiep gefundeerde peilmerken boven het Groninger gasveld in de dertig jaar voorafgaand aan de gaswinning. *Memoir of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands*, no. 130.
- [REDACTED]
- Kanamori, H., Anderson, D.L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America* 65(5): p. 1073.
- Keverling Buisman, A.S., 1936. Results of long duration settlement tests. *Proceedings 1<sup>st</sup> international conference on soil mechanics and foundation engineering. Mass. Vol. 1*, p. 103-107.
- Kombrink, H., 2008. The carboniferous of The Netherlands and surrounding areas; a basin analysis. *Utrecht University*.
- Kostrov, V., 1974. Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock. *Physics of the Solid Earth*, Volume 1: p. 13-21.
- Leveille, G.P., Primmer, T.J., Dudley, G., Ellis, D., Allinson, G.J., 1997. Diagenetic controls on reservoir quality in Permian Rotliegendes sandstones, Jupiter Fields area, southern North Sea. *Geological Society, London, Special Publications 1997*; v.123; p. 105-122. Doi: 10.1144/GSL.SP.1997.123.01.07.
- Mijnlieff, H.F., Geluk, M., 2011. Palaeotopography-governed sediment distribution – a new predictive model for the Permian Upper Rotliegend in the dutch sector



of the Southern Permian Basin. SEPM Special Publication No. 98, ISBN 978-1-56576-300-5, p. 147-159.

Mossop, A., 2012. An explanation for anomalous time dependent subsidence, ARMA 12-518.

Mulders, F.M.M., 2003. Modeling of stress development and fault slip in and around producing gas reservoirs. PhD thesis, Delft University of Technology.

Muntendam-Bos, A., Breunese, J. N., Van Thienen-Visser, K., Peters, L., Juez-Larré, J., 2012. Toetsing van de belasting op de gebruiksruijnte in de kombergings-gebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning onder de Waddenzee, TNO report TNO-060-UT-2011-02035/C.

Muntendam-Bos, A.G., De Waal, J.A., 2013. Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field, including a position statement by KNMI. SodM, 16 January, 2013.

NAM, 2010. Bodemdaling door Aardgaswinning, NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, statusrapport 2010 en prognose tot het jaar 2070.

NAM, 2011a. Wijziging Winningsplan Ameland 2011, rev. 30-09-2011.

NAM, 2011b. Wijziging Winningsplan Anjum 2011, rev. 30-09-2011.

NAM, 2011c. Wijziging Winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011, rev. 30-09-2011.

[REDACTED]

NAM, 2012a. [REDACTED]\_for\_SodM.pet: versie van het statische model van NAM gebruikt door TNO.

[REDACTED]

NAM, 2012c. Slide\_pack [REDACTED]\_forTNO.pdf: Groningen Static Model. High-level static modeling overview. Clemens Visser, 16 november 2012, presentatie NAM.

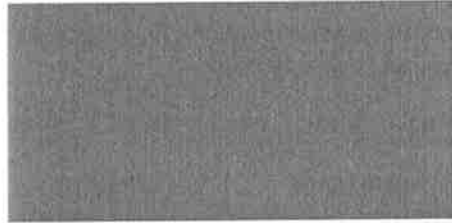
NAM, 2013a. Report to the technical guidance committee (TBO) on subsurface aspects of induced earthquakes in the Groningen field.

NAM, 2013b. Report to the technical guidance committee (TBO) on production measures. Part 1: Depletion scenarios and hazard analysis.

- NAM, 2013c. 1310\_TNO\_FAULTS\_TRANSFER: Petrel project met 1579 breuken, 25-10-2013 door NAM beschikbaar gesteld.
- NAM, 2013d. Wijziging winningsplan Groningen 2013, inclusief technische bijlage Groningen winningsplan 2013. Versie 29 november 2013.
- Nepveu, M., Kroon, I.C., Fokker, P.A., 2010. Hoisting a Red Flag, an Early Warning System for Exceeding Subsidence Limits. *Math. Geosciences*, Vol.42, 187-198
- Onyeagoro, U.O., Naruk, S.J., Van der Vlugt, F.F., Eikmans, D., Zijlstra, E., De Keijzer, D.M., Jolley, S.J., Wiersema, W., Kristensen, M., Reemst, P., Tixier, C., King, R., 2007. Fault seal functions: a tool for dynamic reservoir simulation. *EPTJ article 2007\_7006\_11*, December 2007, p. 55-64.
- Orlic, B., Wassing, B.B.T., 2012. Modeling stress development and fault slip in producing hydrocarbon reservoirs overlain by rock salt caprocks. 46th US rock mechanics / geomechanics symposium Chicago.
- Pruiksma, J. P., Breunese, J. N., Van Thienen-Visser, K., 2013. A general framework for rate dependent compaction models for reservoir rock, TNO report TNO 2013 R11405.
- Roest, J.P.A., Kuilman, W., 1994. Geomechanical analysis of small earthquakes at the Eleveld gas reservoir. *Rock mechanics in Petroleum Engineering*, 29-31, August 1994.
- Schöner, R., Gaupp, R., 2005. Contrasting red bed diagenesis: the Southern and Northern margin of the Central European Basin. *Int. J. Earth Sci (Geol. Rundsch.)* 94: p. 897-916. Doi: 10.1007/s00531-005-0004-3.
- Starr, A.T., 1928. Slip in a crystal and rupture in a solid due to shear. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 24(04): p. 489-500.
- TNO, 2009. Geïnduceerde aardtrillingen Groningen veld. TNO kenmerk: AGE 09-10.100)
- Van der Graaf, A., 2003. Groningen Contact movements, 2003 status. NAM200309001924.
- Van Ojik, K., Böhm, A.R., Cremer, H., Geluk, M.C., De Jong, M.G.G., Mijnlief, H.F., Djin Nio, S., 2011. The 3D scale for an integrated stratigraphic framework of the Upper Rotliegend depositional system in the Netherlands. *SEPM Special Publication No. 98*, ISBN 978-1-56576-300-5, p. 37-48.
- Van Opstal, G., 1974. The effect of base rock rigidity on subsidence due to compaction, *Proceedings of the Third Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Denver, Colorado, September 1-7, 1974. Volume II, part B, National Academy of Sciences, Washington, D.C..
- Wong, Th.E., Batjes, D.A.J., De Jager, J., 2007. *Geology of the Netherlands*. ISBN 978-906984-481-7.

## 10 Ondertekening

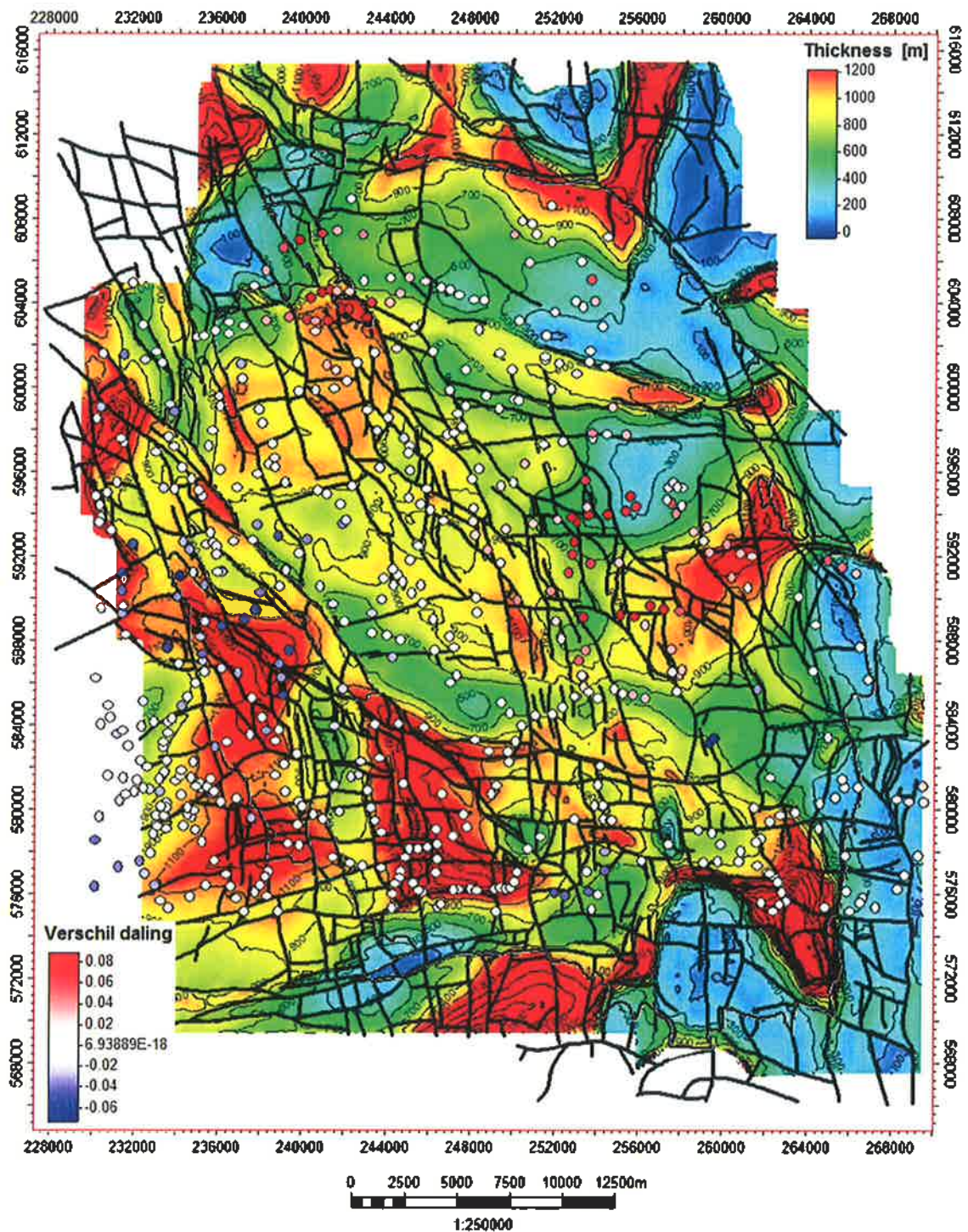
Utrecht, 23 december 2013



# 11 Appendices

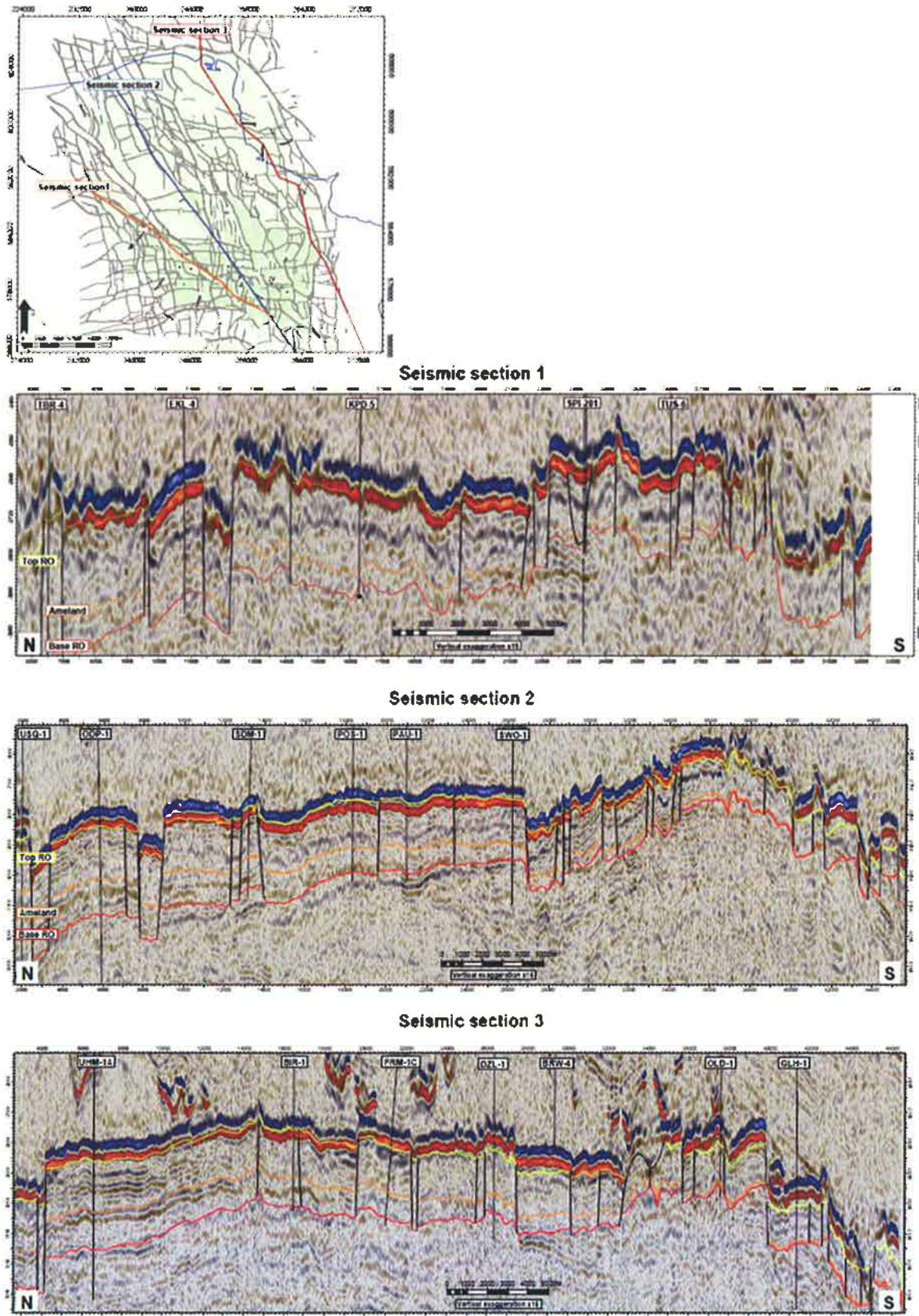
## Appendix A

### Appendix A.1: Discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling op de kaart van Zechstein dikte



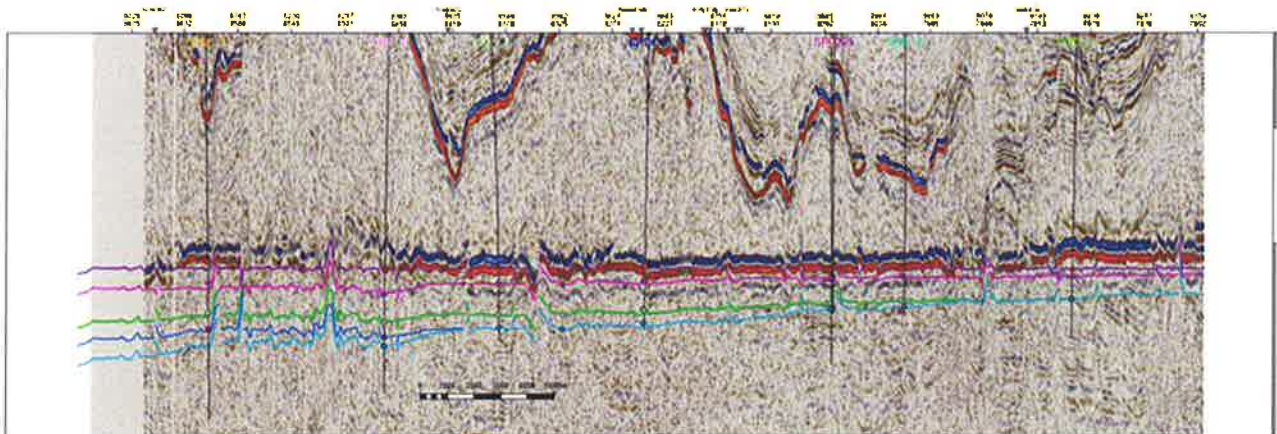
Figuur A.1.1 Diktekaart van de Zechstein formatie. Er is geen correlatie tussen de Zechstein dikte en de discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling.

Appendix A.2: Noord-zuid seismische doorsnedes.

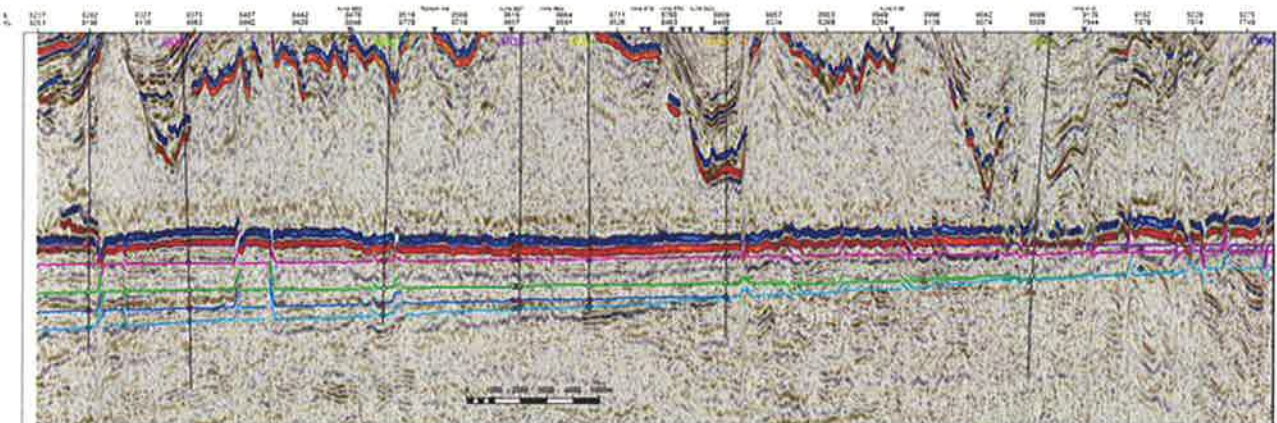


Figuur A.2.1 Noord-zuid seismische doorsnede.

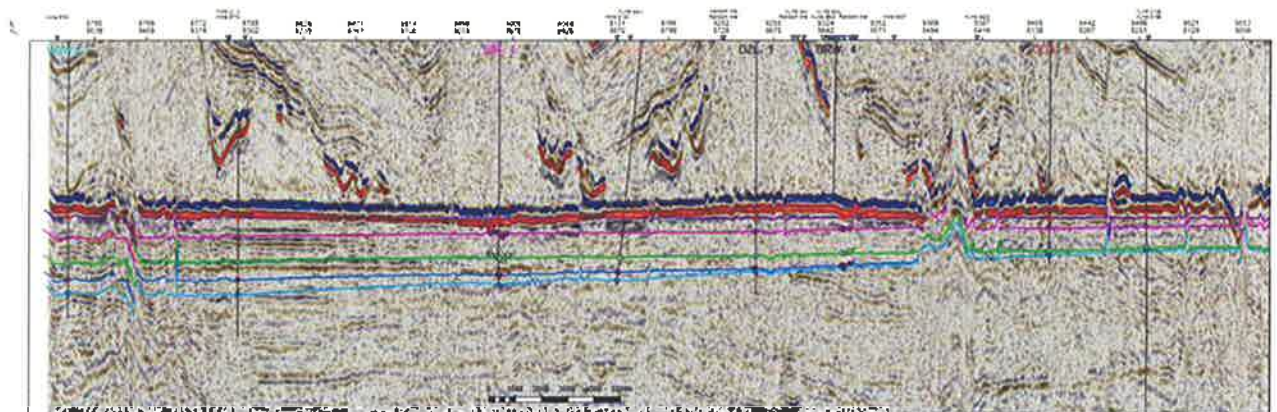
### Well Section 1 Flattened on modelled top Rotliegend



### Well Section 2 Flattened on modelled top Rotliegend

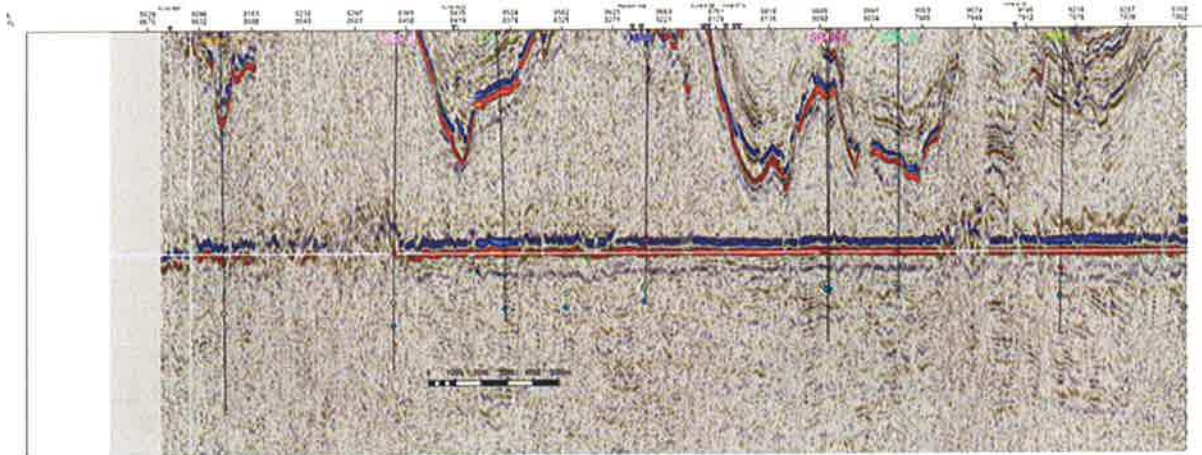


### Well Section 3 Flattened on modelled top Rotliegend

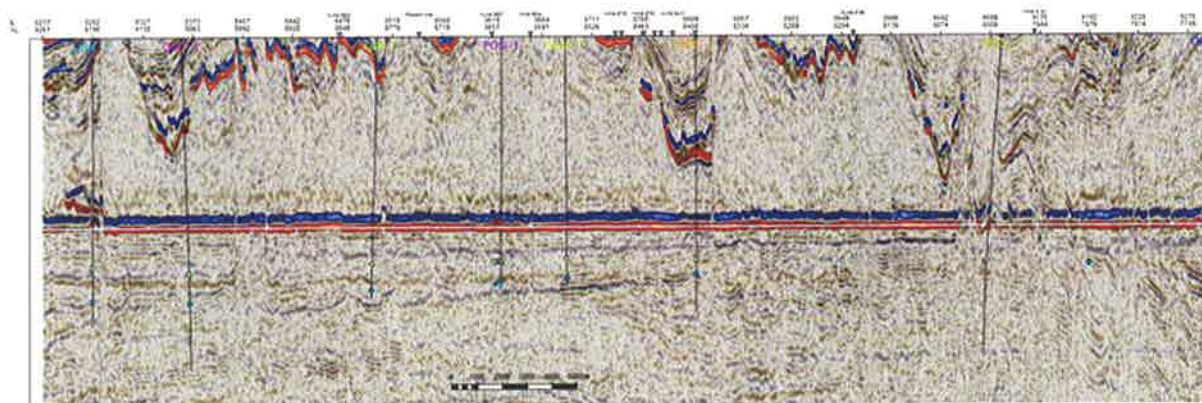


Figuur A.2.2 Noord-zuid seismische doorsnede (afgeplat op gemodelleerde top Rotliegend).

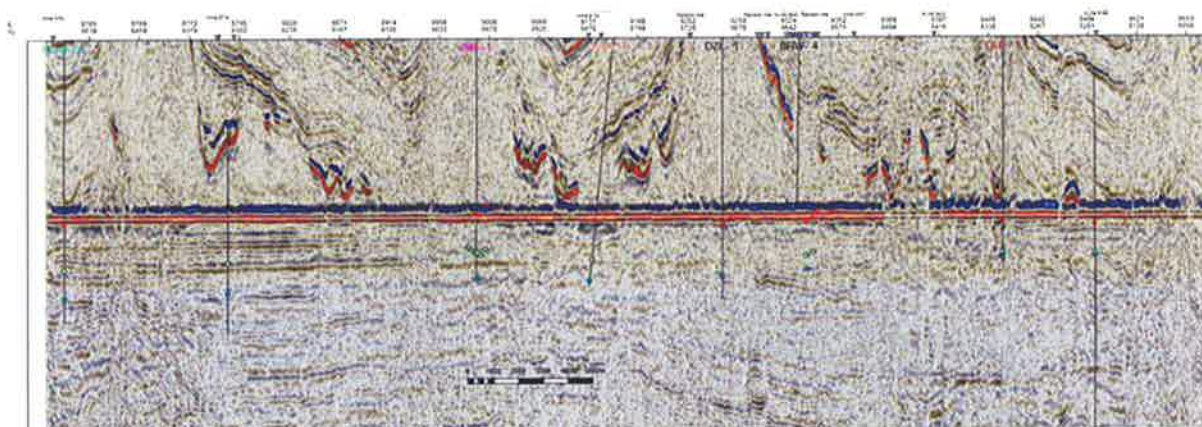
### Well Section 1 Flattened on Interpreted top Rotliegend



### Well Section 2 Flattened on Interpreted top Rotliegend

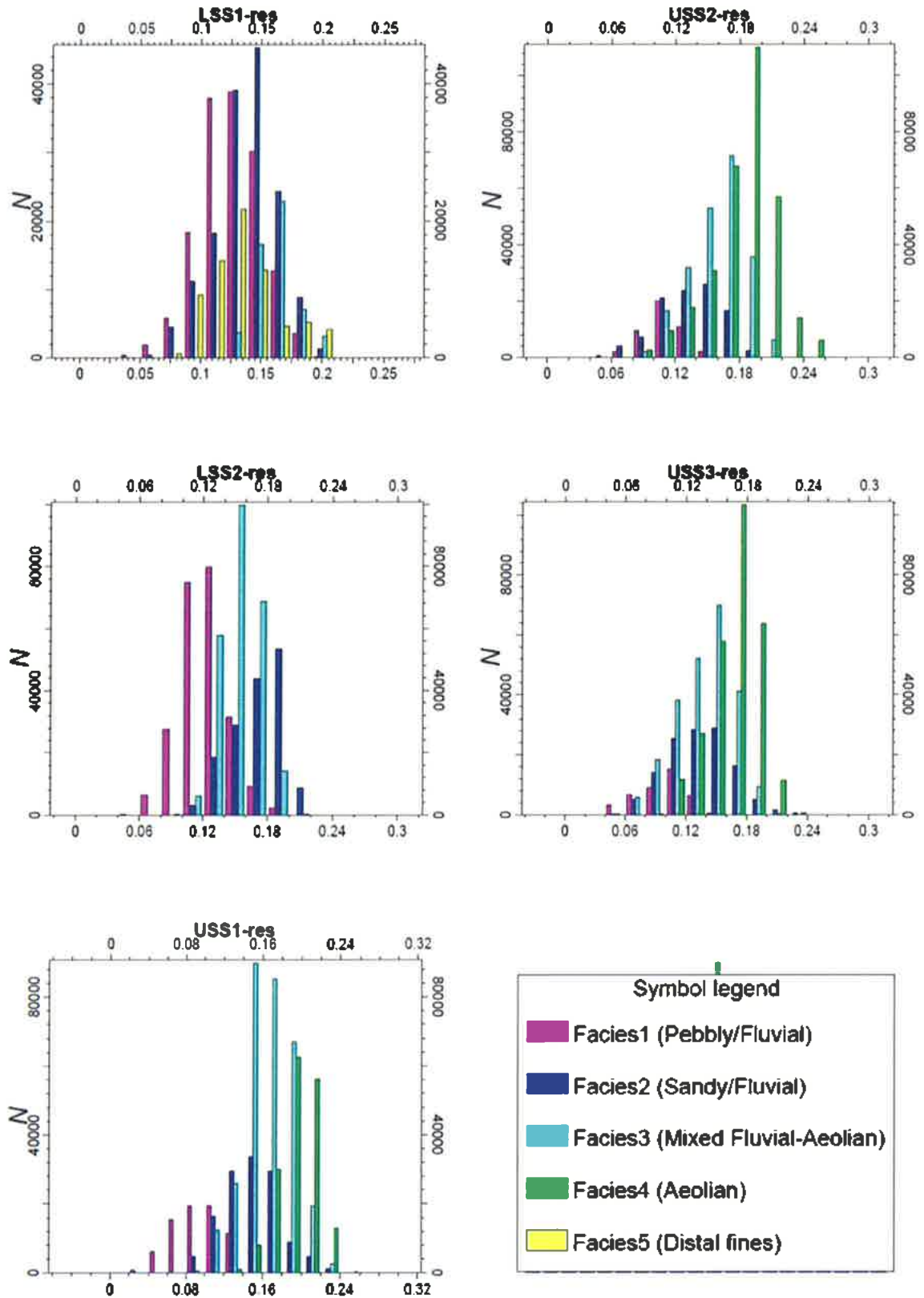


### Well Section 3 Flattened on Interpreted top Rotliegend



Figuur A.2.3 Noord-zuid seismische doorsnedes (afgeplat op in de seismiek geïnterpreteerde top Rotliegend).

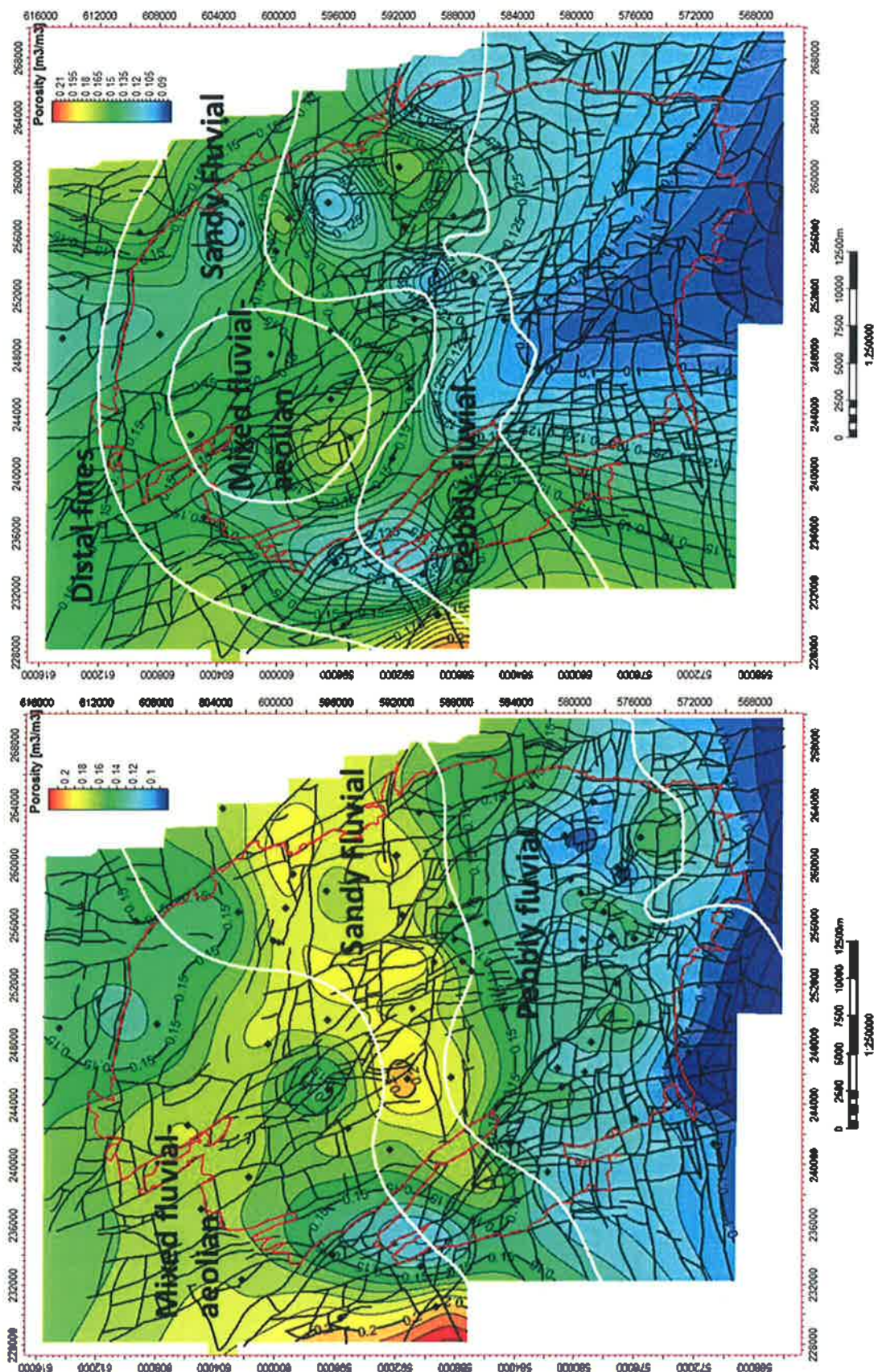
Appendix A.3: Porositeitsdistributie per faciesklasse



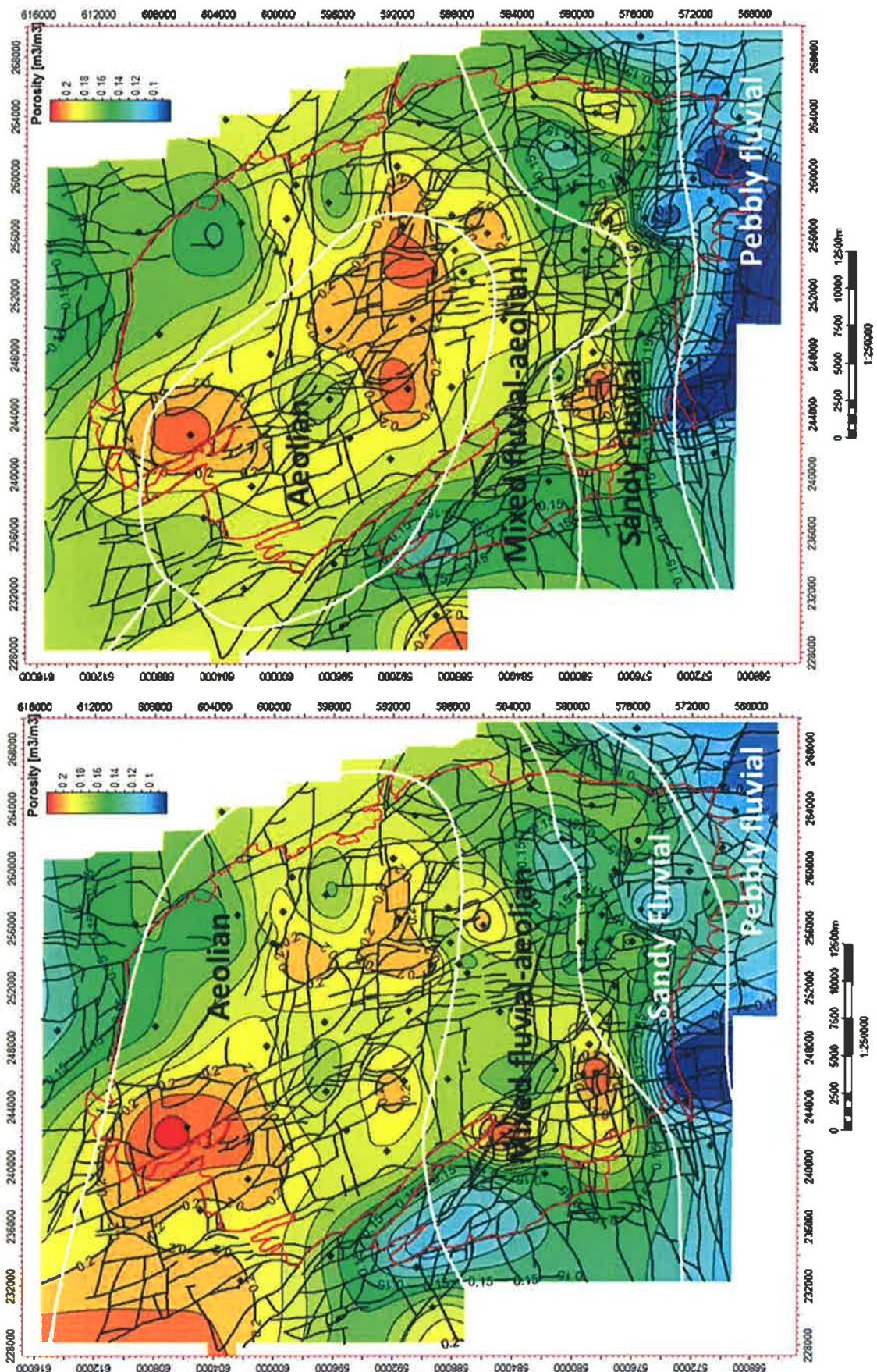
Figuur A.3.1 Porositeitsdistributie per faciesklasse voor de reservoirzones LSS1-res, LSS2-res, USS1-res, USS2-res en USS3-res.



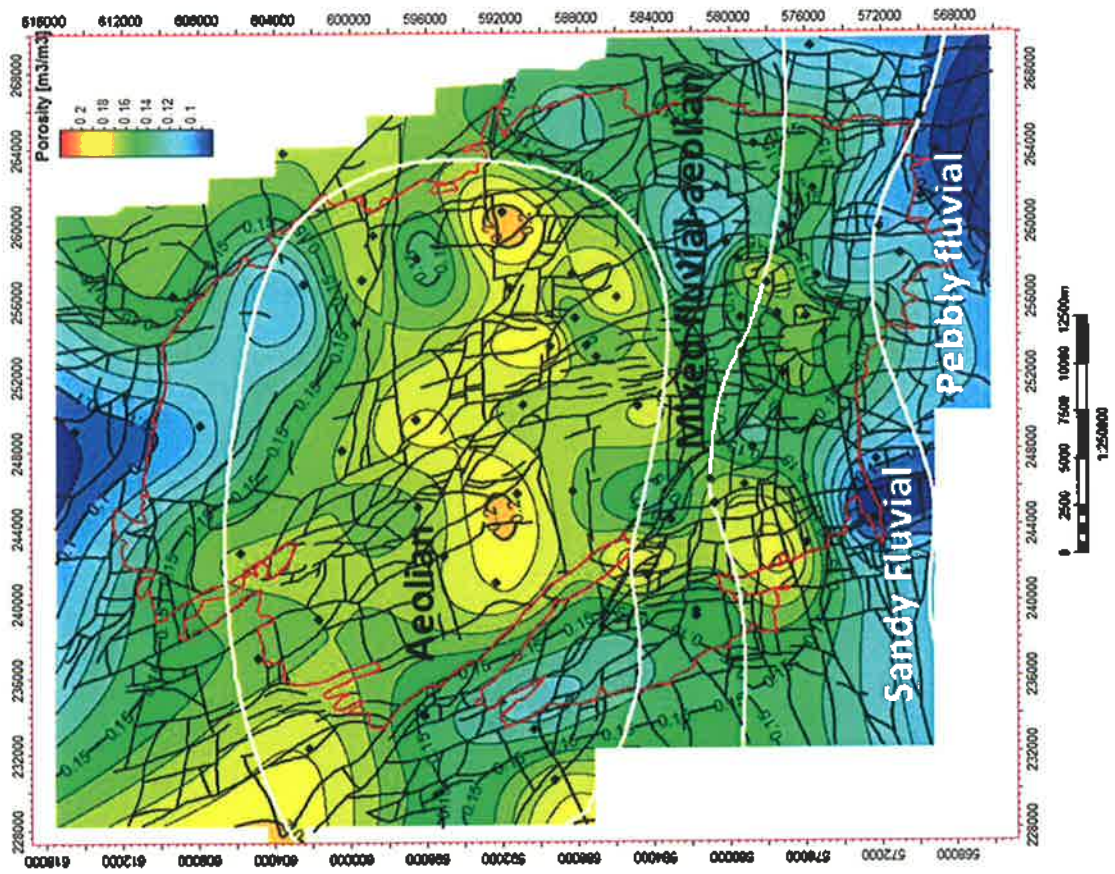
Appendix A.4: Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van alle reservoirzones



Figuur A.4.1 Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van de reservoirzones LSS1res en LSS2res.

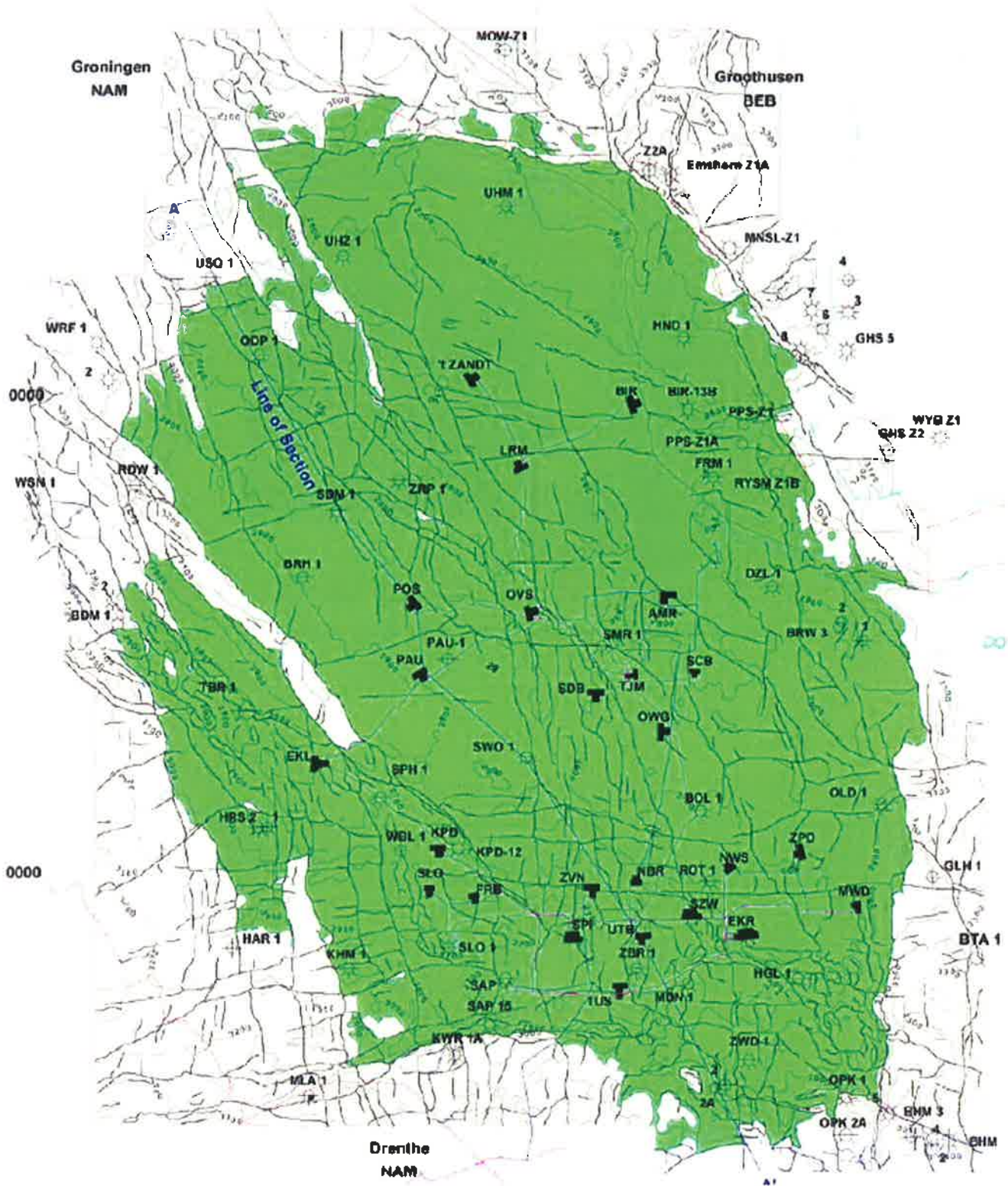


Figuur A.4.2 Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van de reservoirzones USS1res en USS2res.

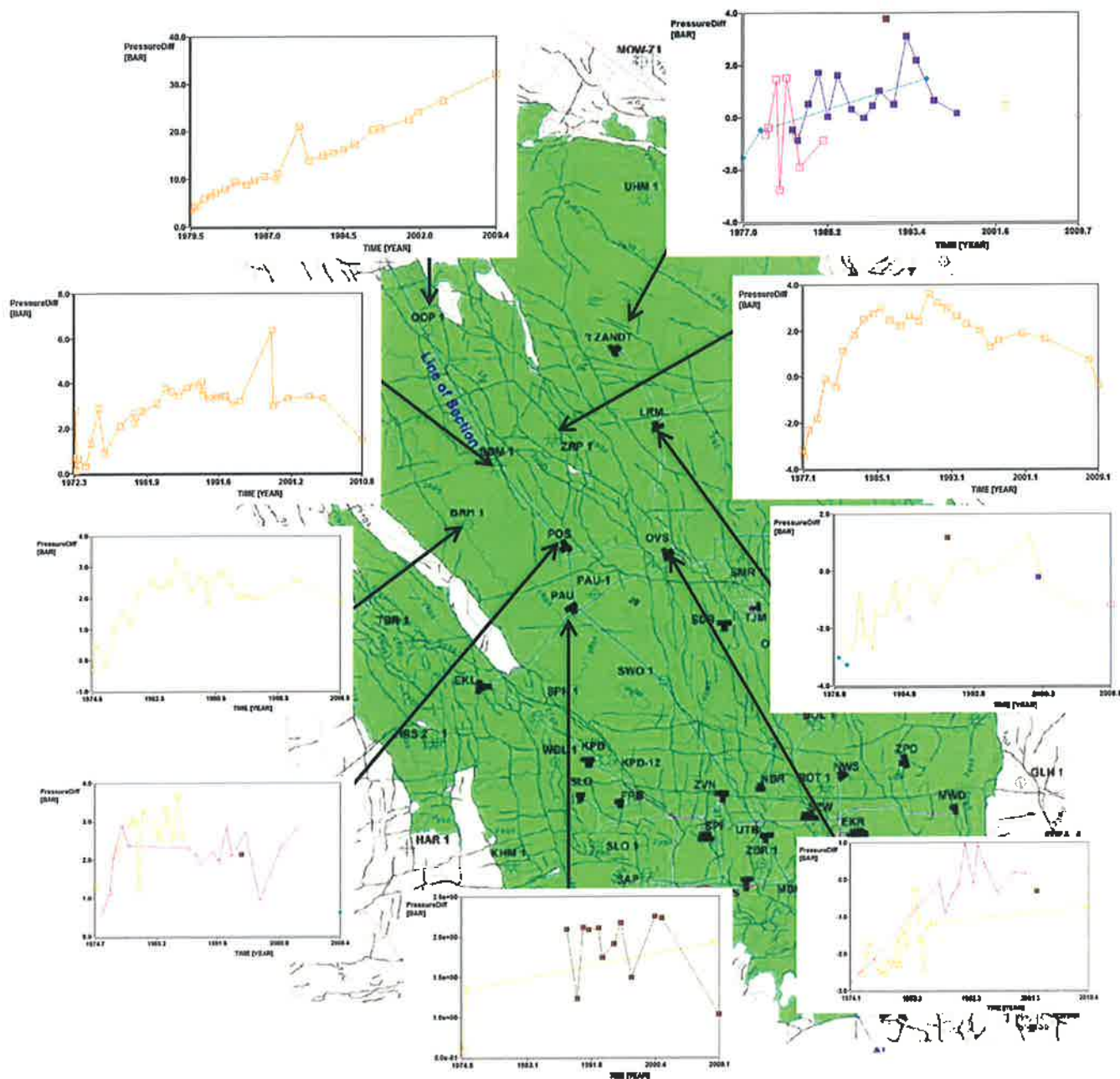


Figuur A.4.3 Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van de reservoirzone USS3res.

Appendix B



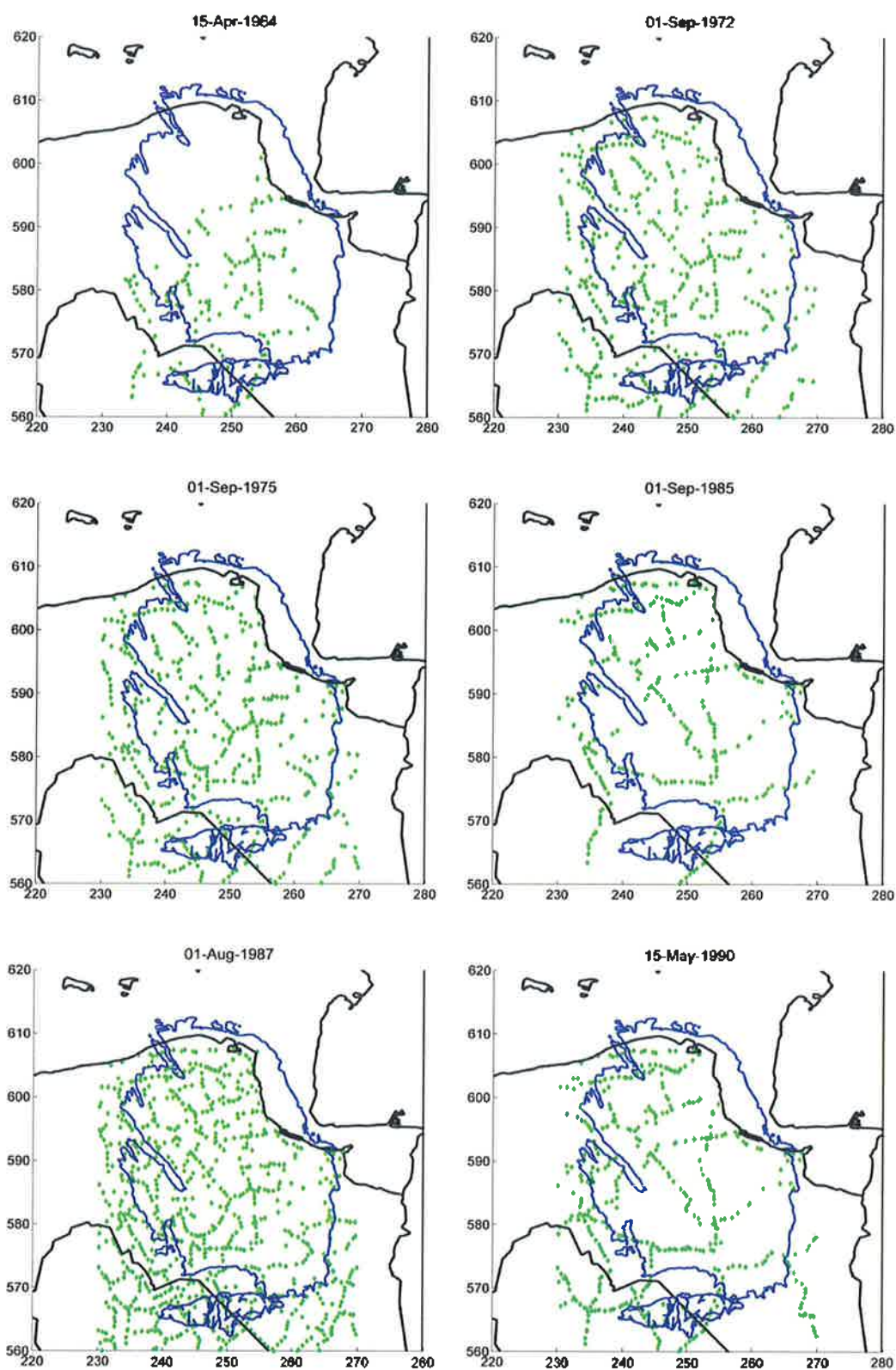
Figuur B.1: Productieclusters Groningen gasveld (NAM, 2003).



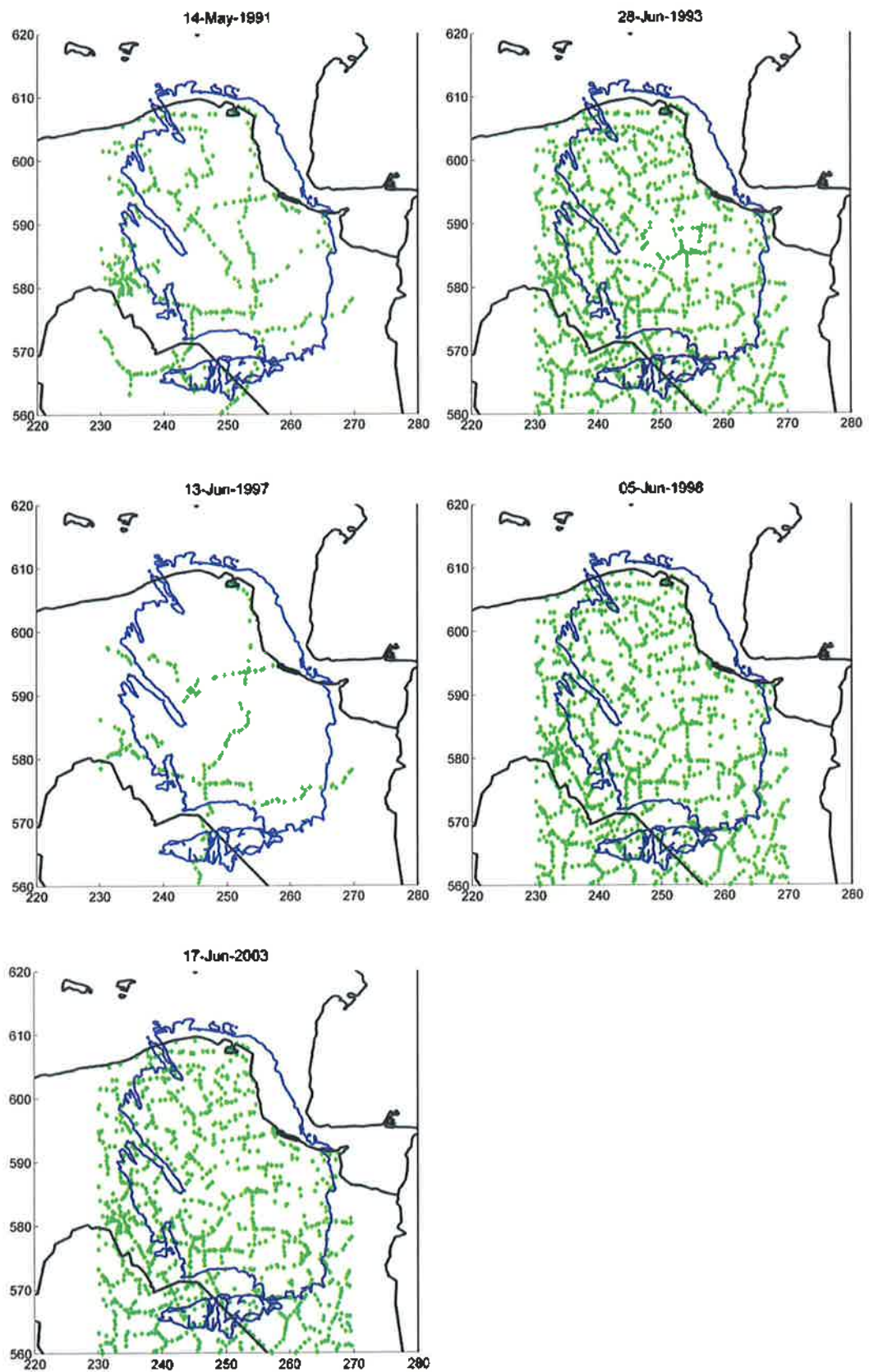
Figuur B.2: Overzicht van de mismatches in reservoirdruk van verschillende putten in het Groningen gasveld.

## Appendix C

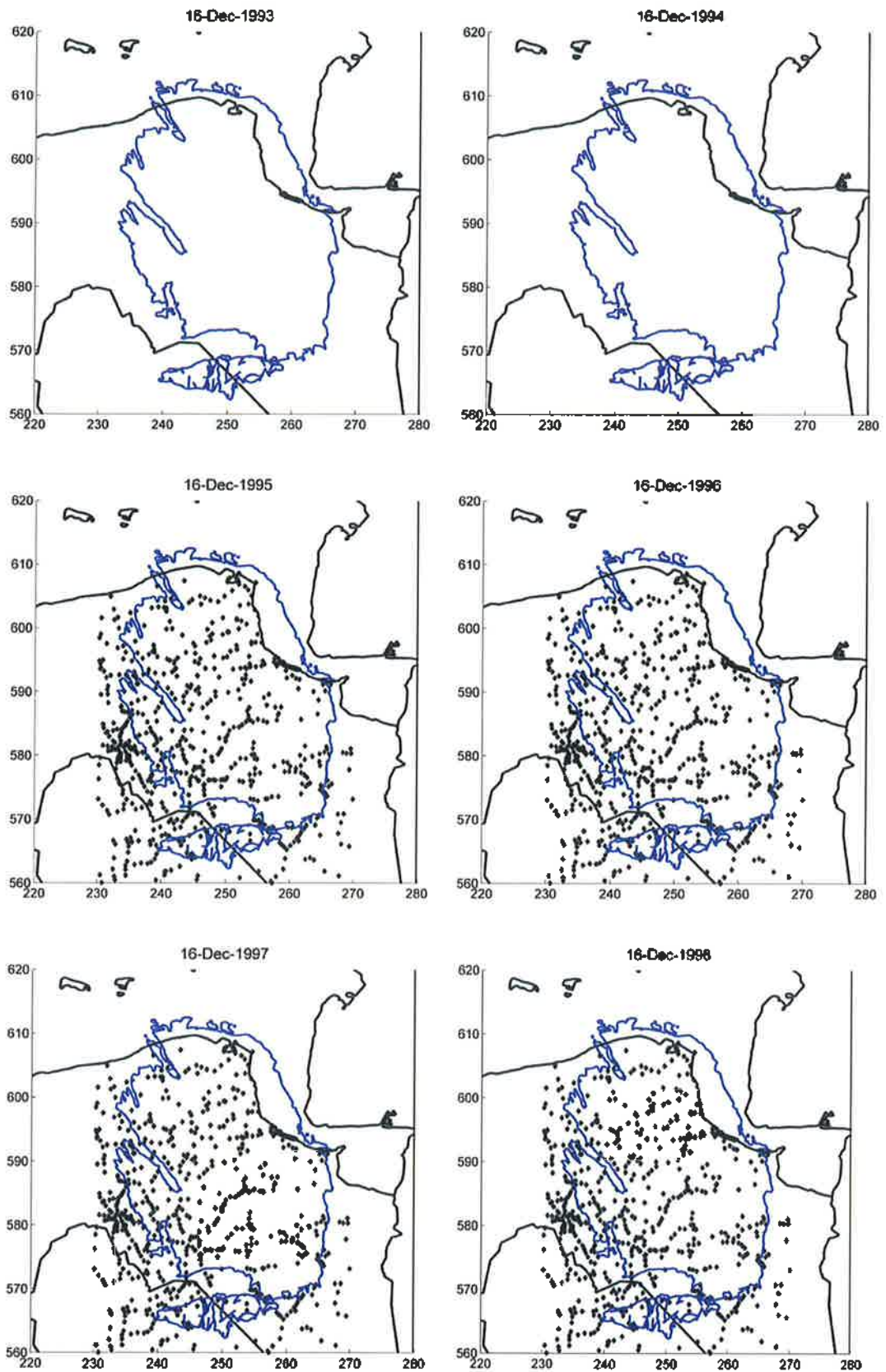
### Appendix C.1: Primaire meetcampagnes door Rijkswaterstaat.



Figuur C.1.1 Primaire meetcampagnes door Rijkswaterstaat in 1964, 1972, 1975, 1985, 1987, 1990.

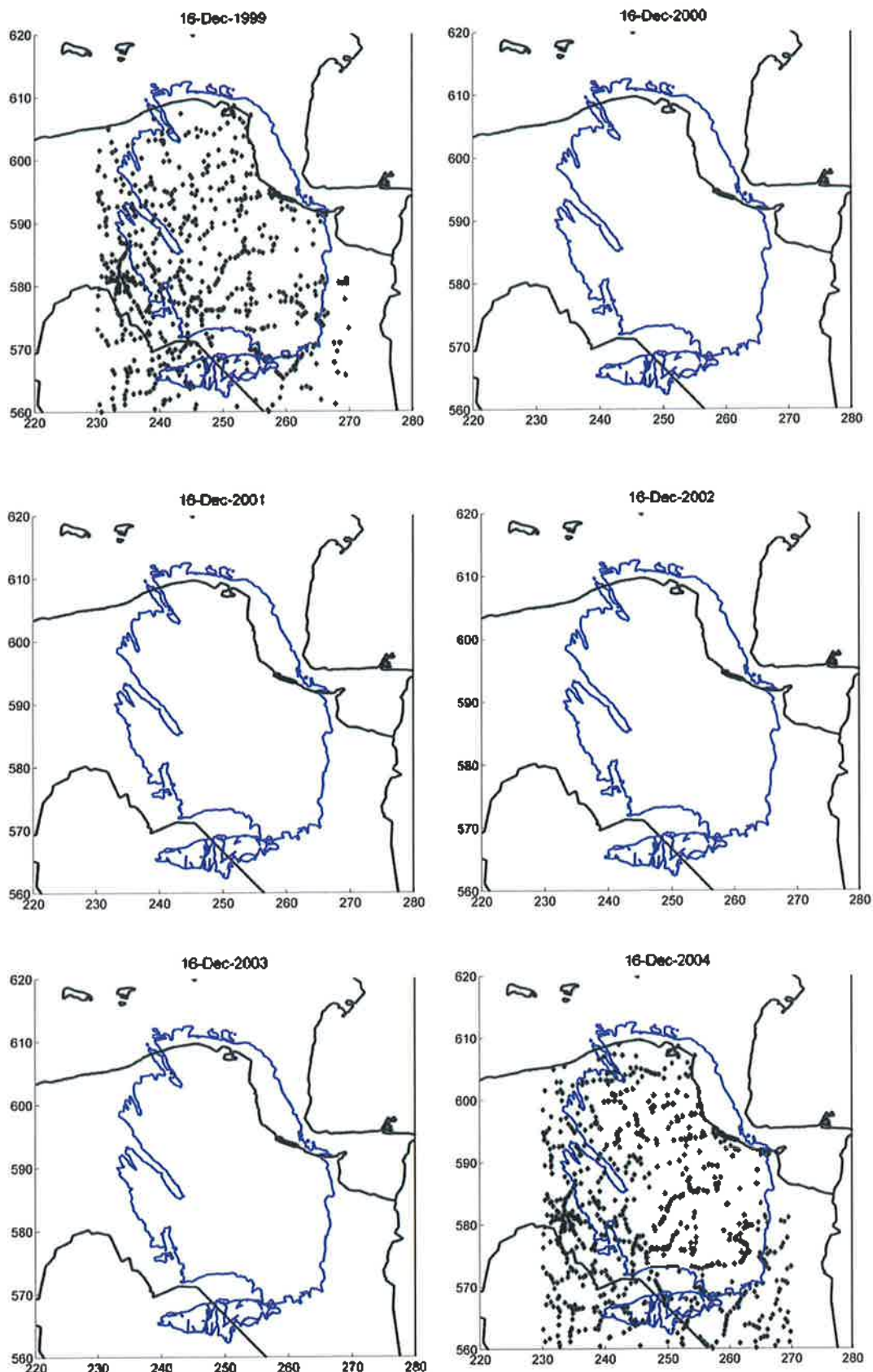


Figuur C.1.2 Primaire meetcampagnes door Rijkswaterstaat in 1991, 1993, 1997, 1998, 2003.

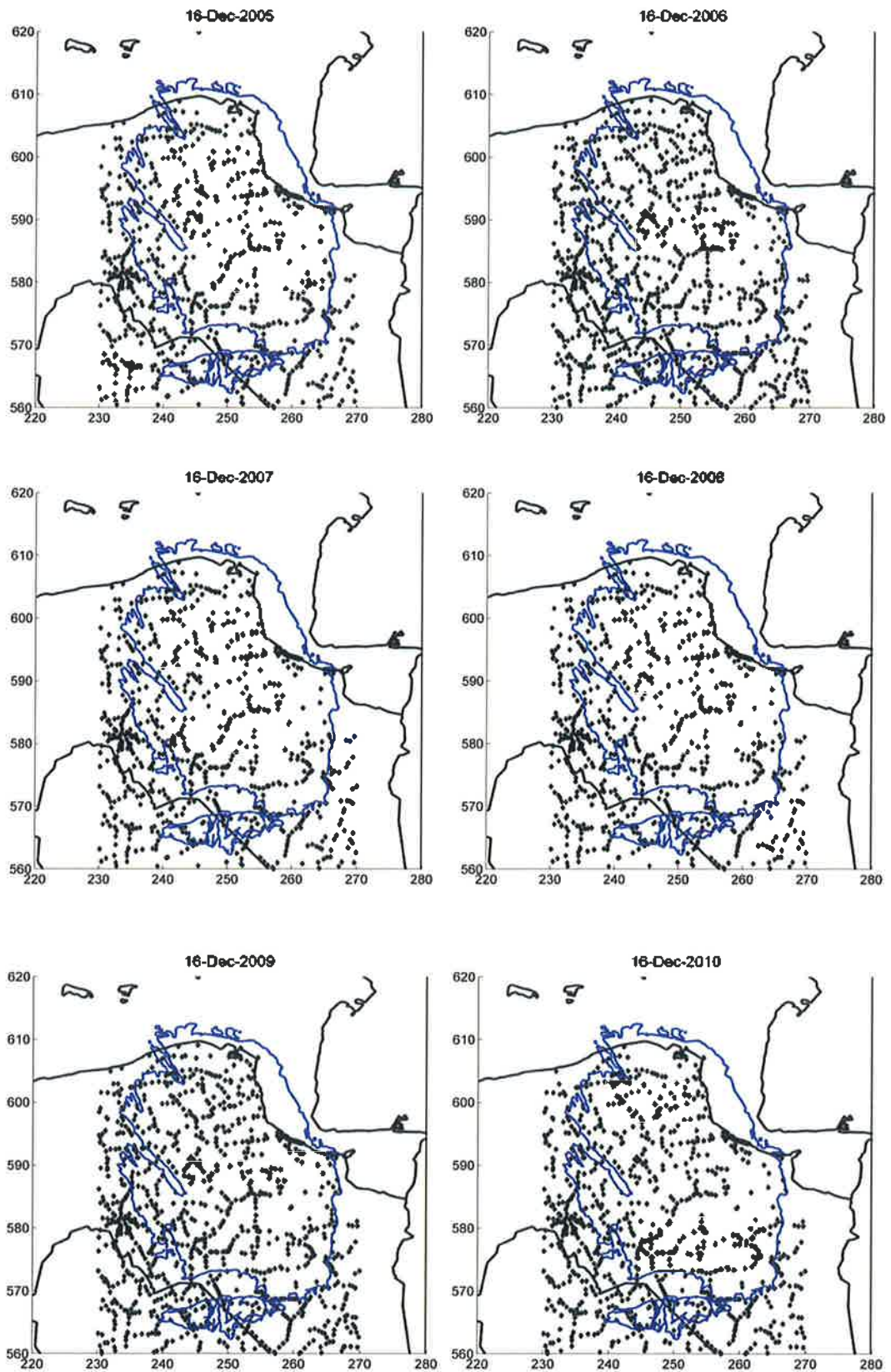
*Appendix C.2: InSAR metingen in de differentiestaat van 1993-2011.*

Figuur C.2.1 InSAR metingen in de differentiestaat van 1993-1998.





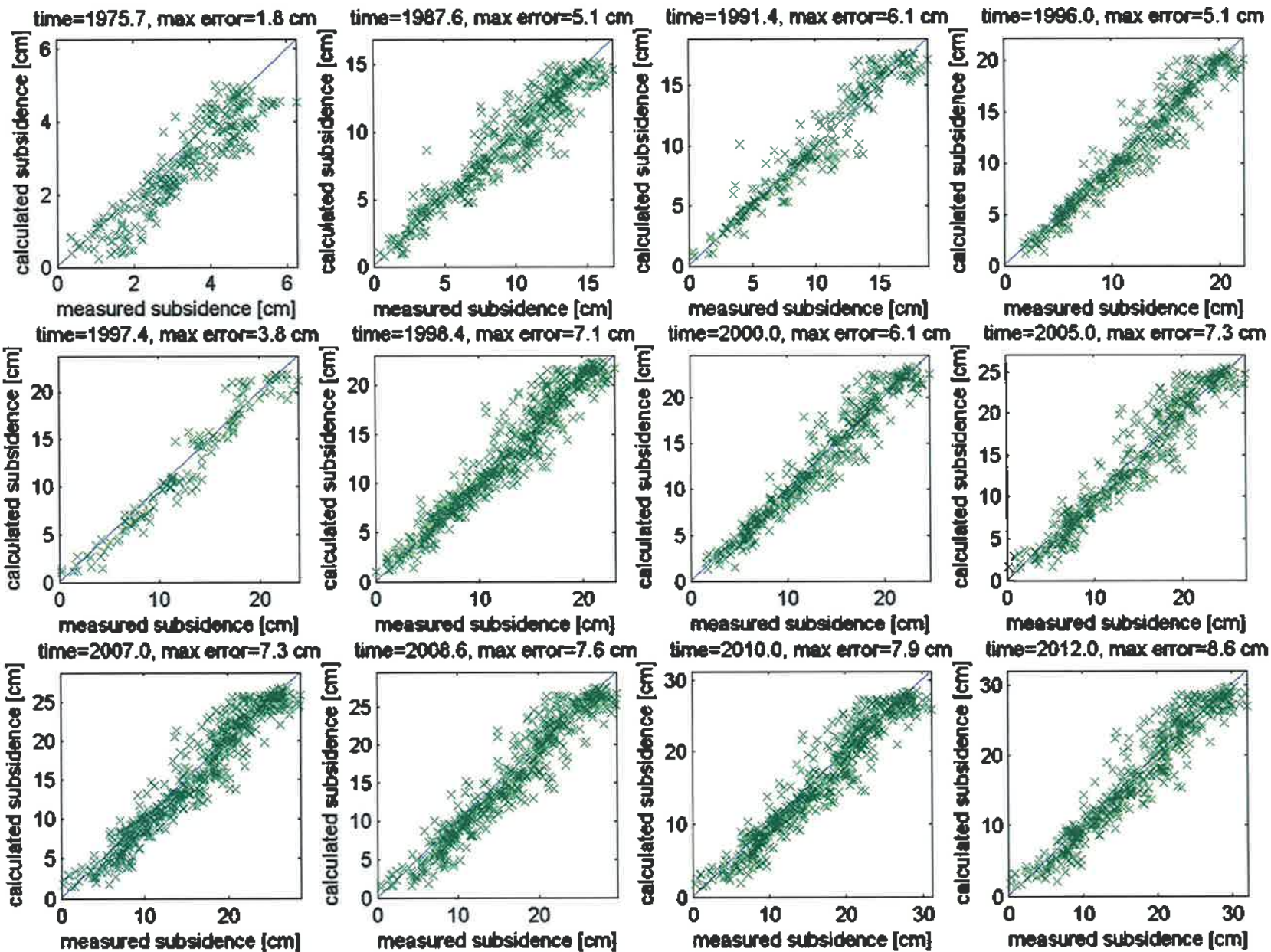
Figuur C.2.2 InSAR metingen in de differentiestaat van 1999-2004.



Figuur C.2.3 InSAR metingen in de differentiestaat van 2005-2010.

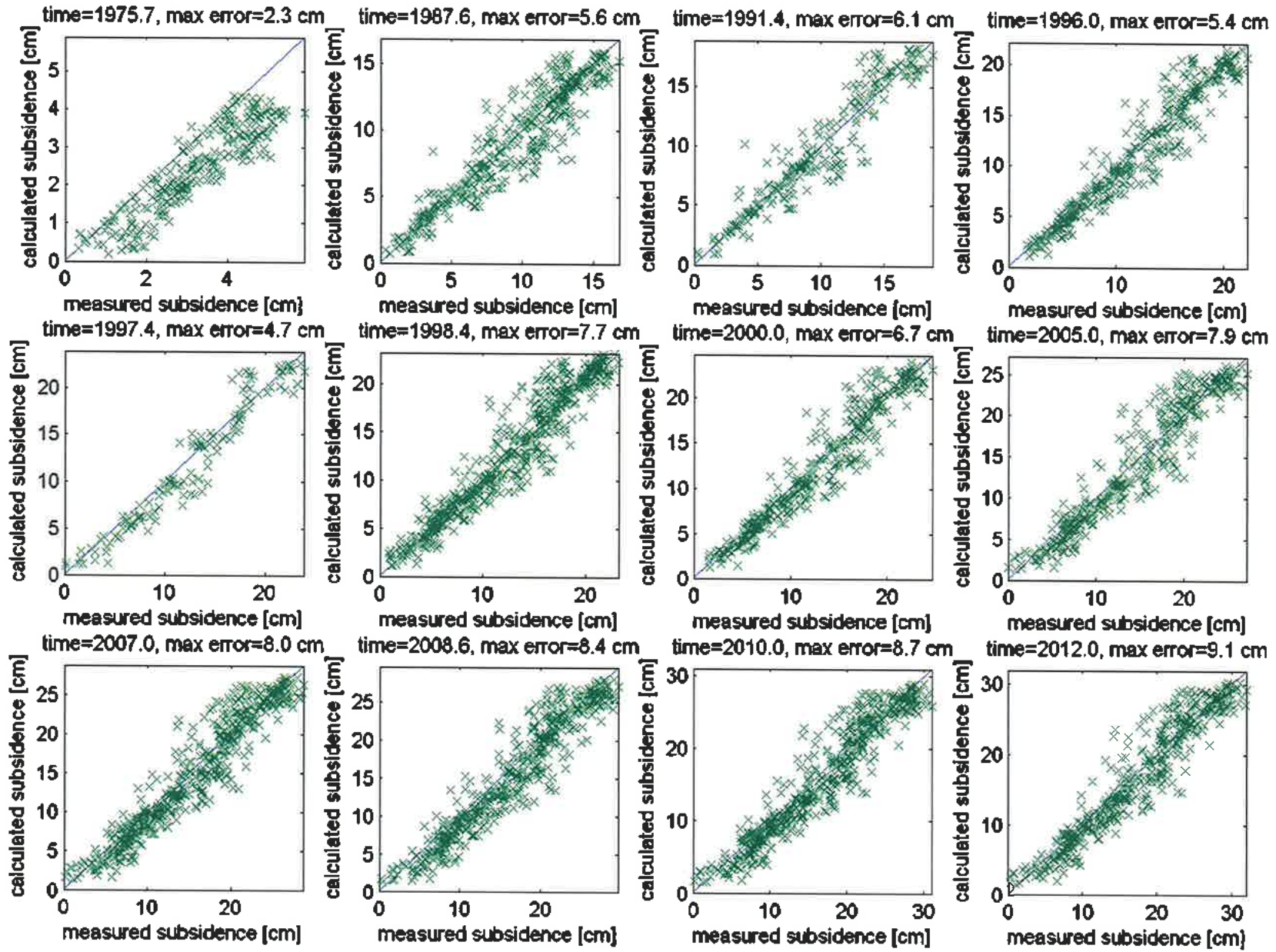
Appendix D

Appendix D.1: Gemeten versus berekende bodendaling

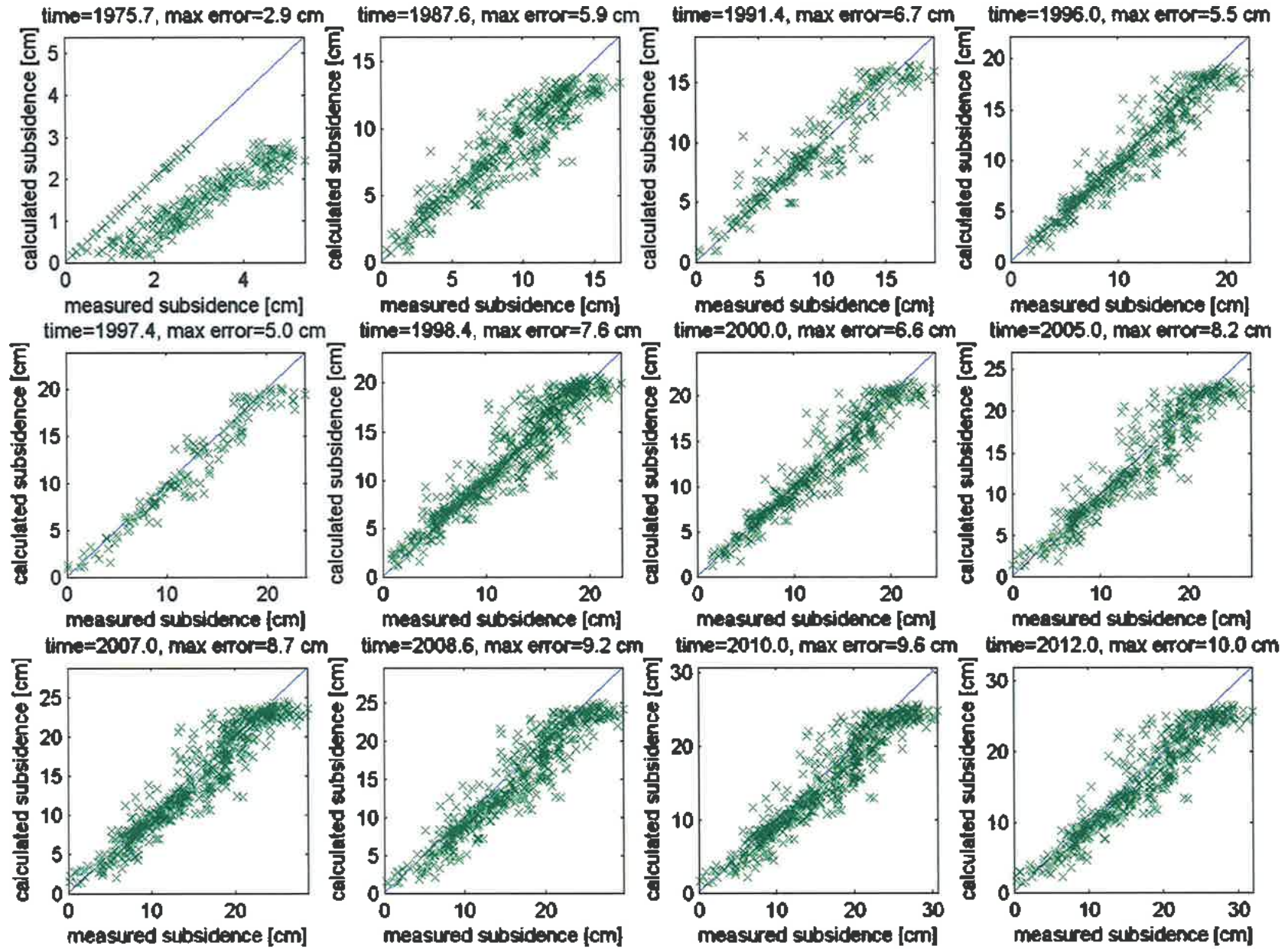


Figuur D.1.1 Gemeten versus berekende bodendaling voor het RTCM model.

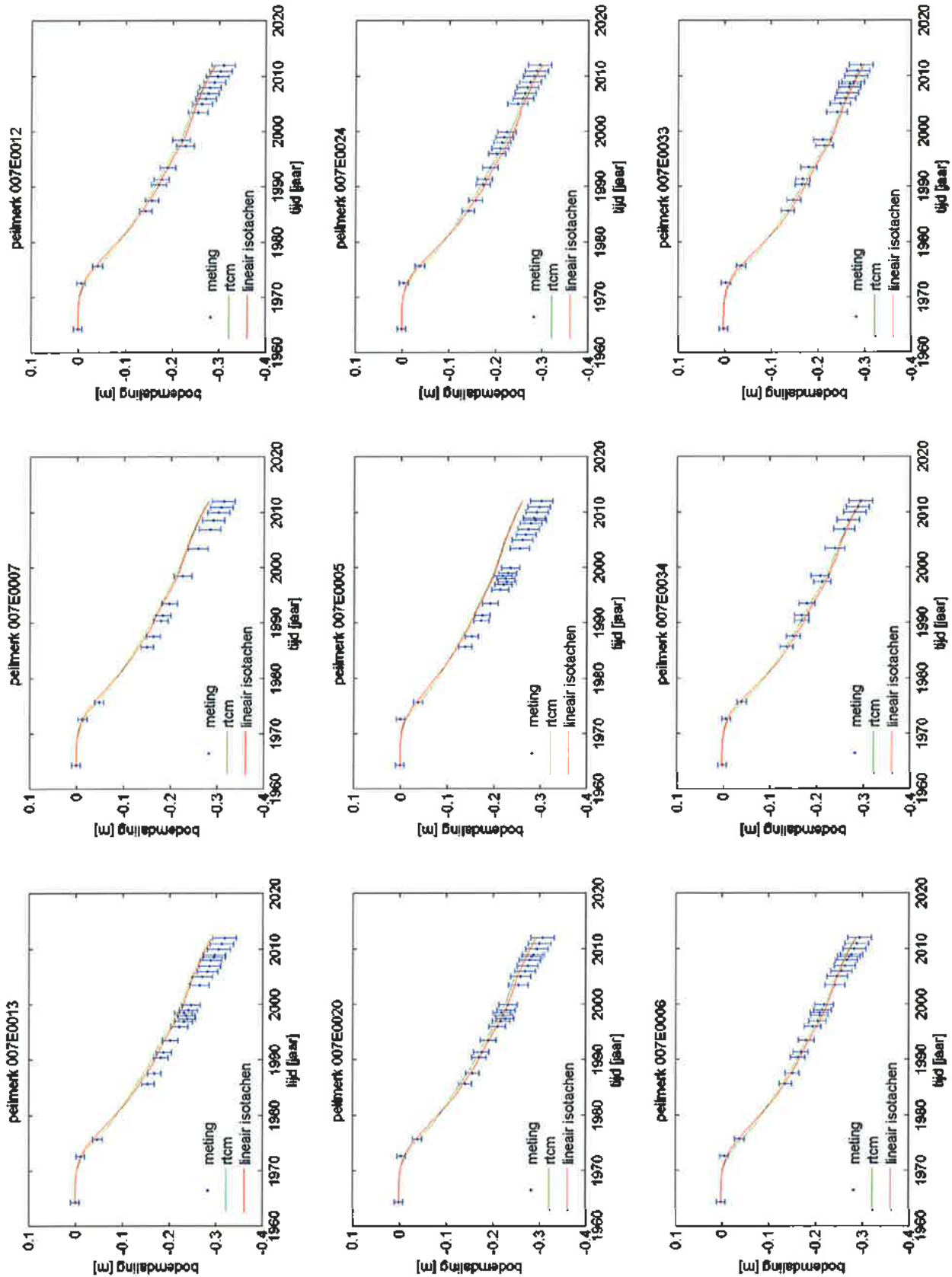
Figuur D.1.2 Gemeten versus berekende bodemdaling voor het lineair isotachien model.



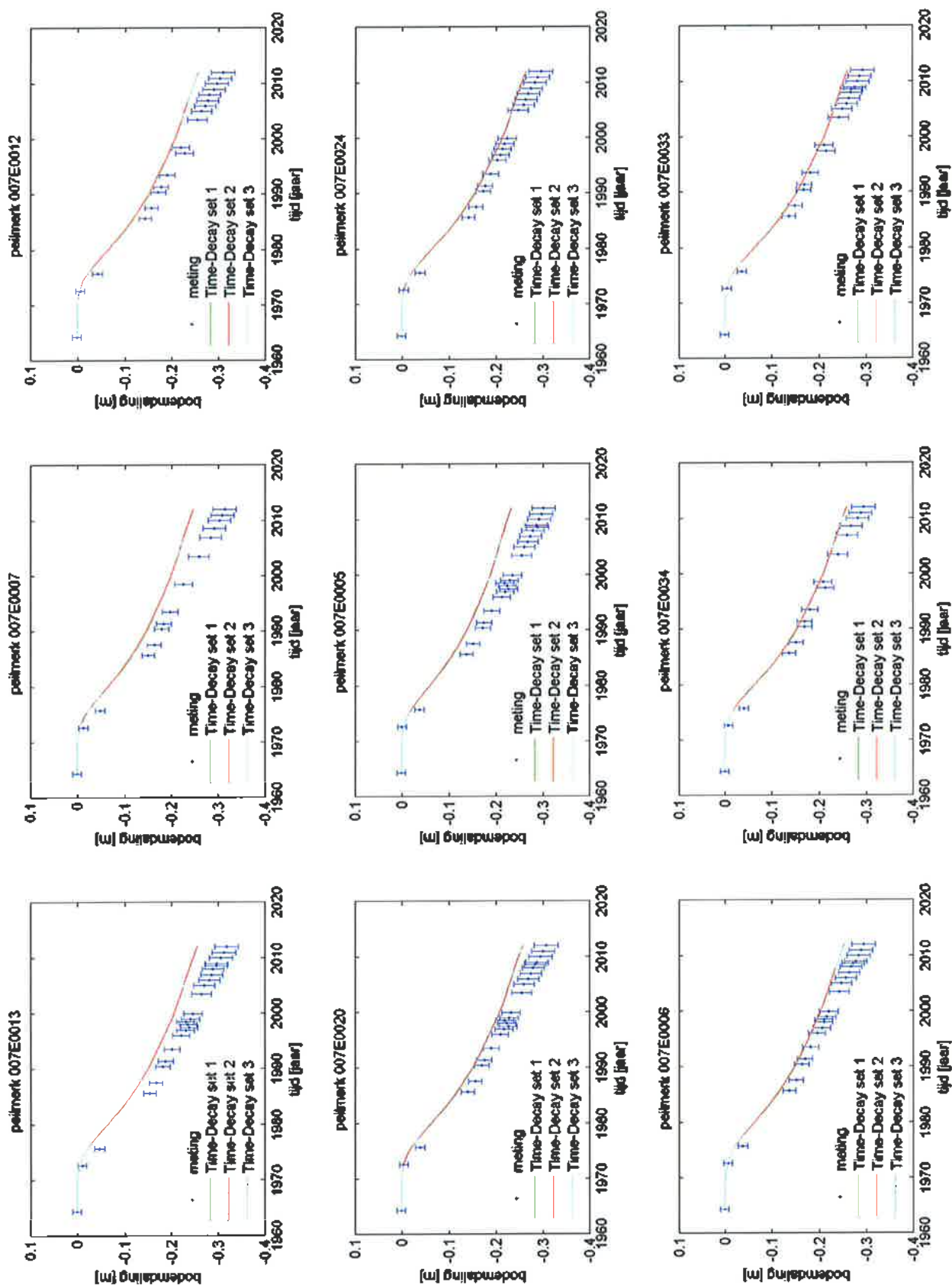
Figuur D.1.3 Gemeten versus berekende bodemdaling voor het Time-Decay model.



Appendix D.2: Maximale bodemdaling

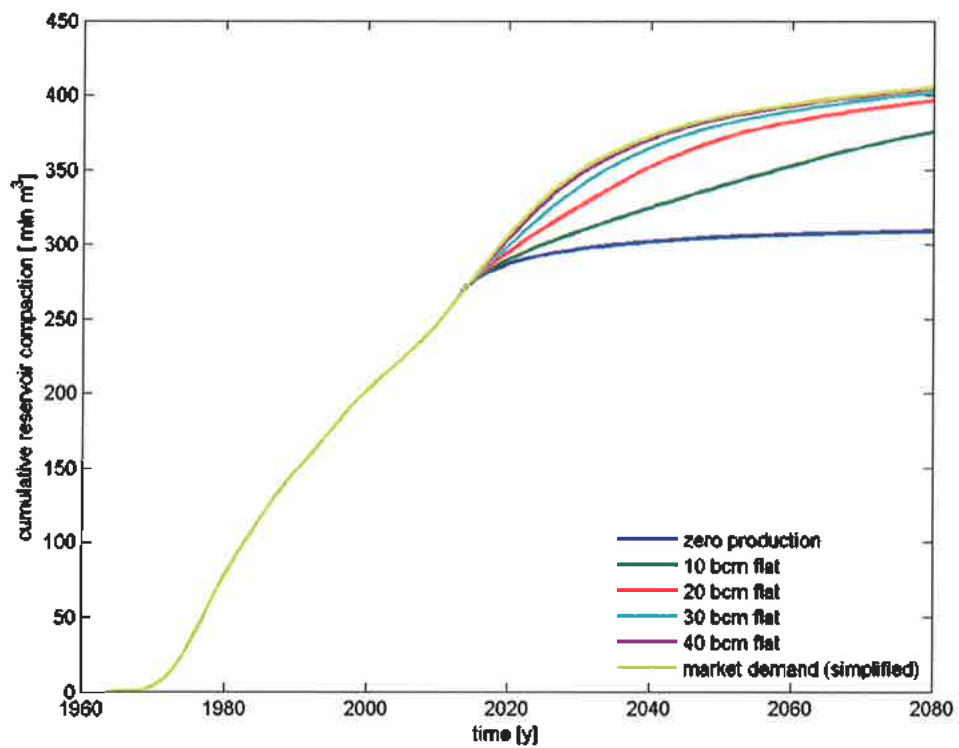


Figuur D.2.1 Maximale bodemdaling met het beste RTCM model en lineair isotachenmodel.

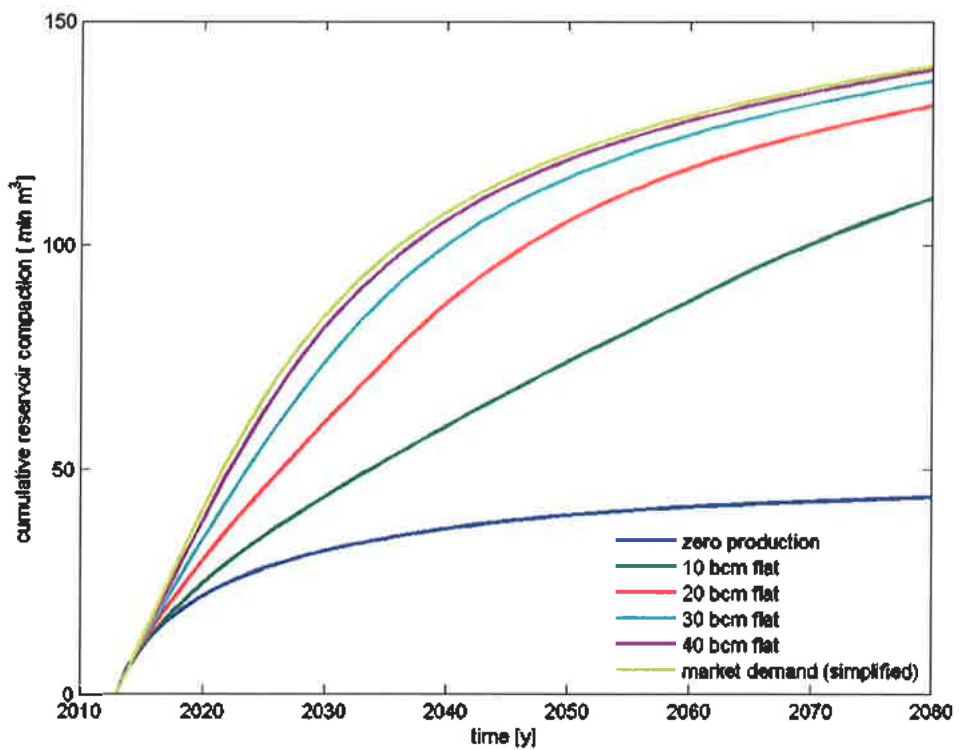


Figuur D.2.2 Maximale bodemdaling met het Time-Decay model en drie beste parameter sets.

## Appendix D.3: Cumulatieve compactie met het RTCM model

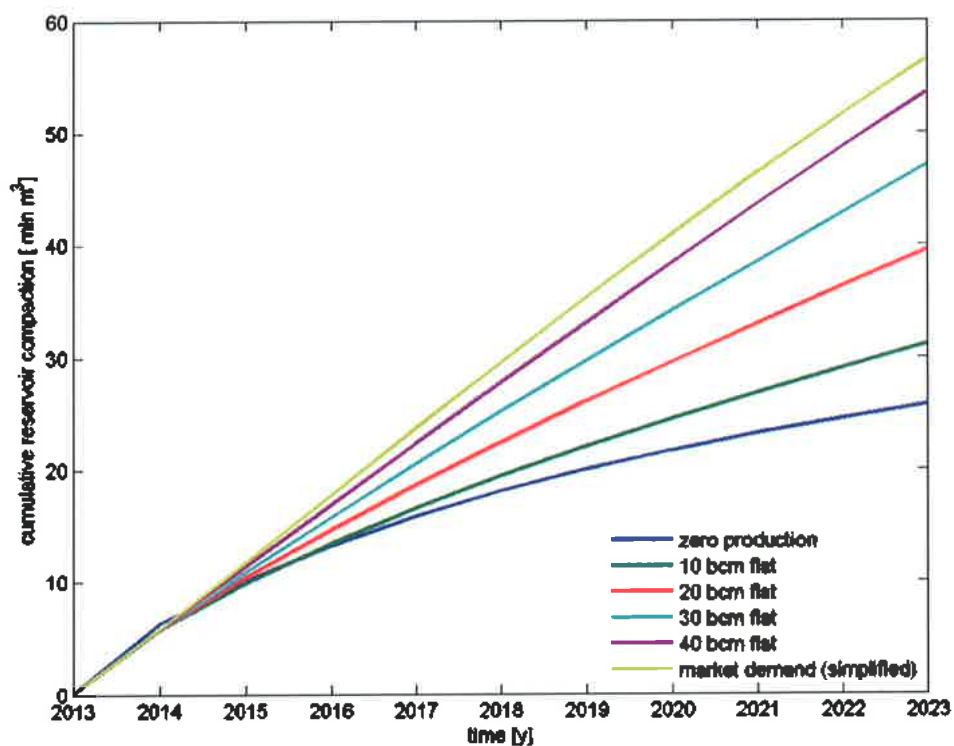


Figuur D.3.1 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model.

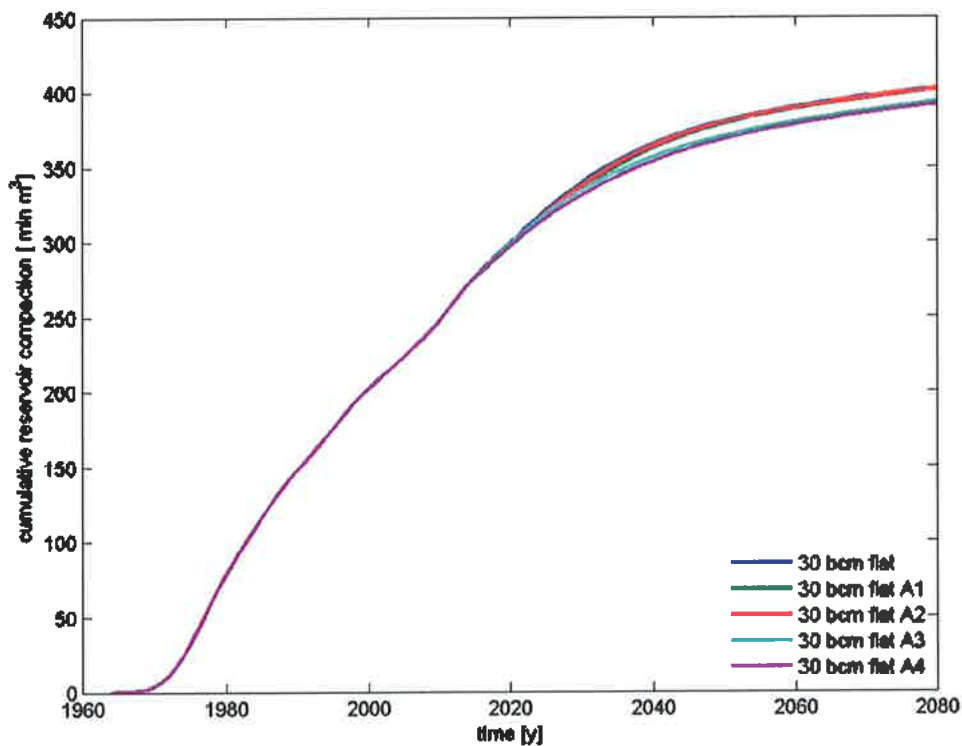


Figuur D.3.2 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model.

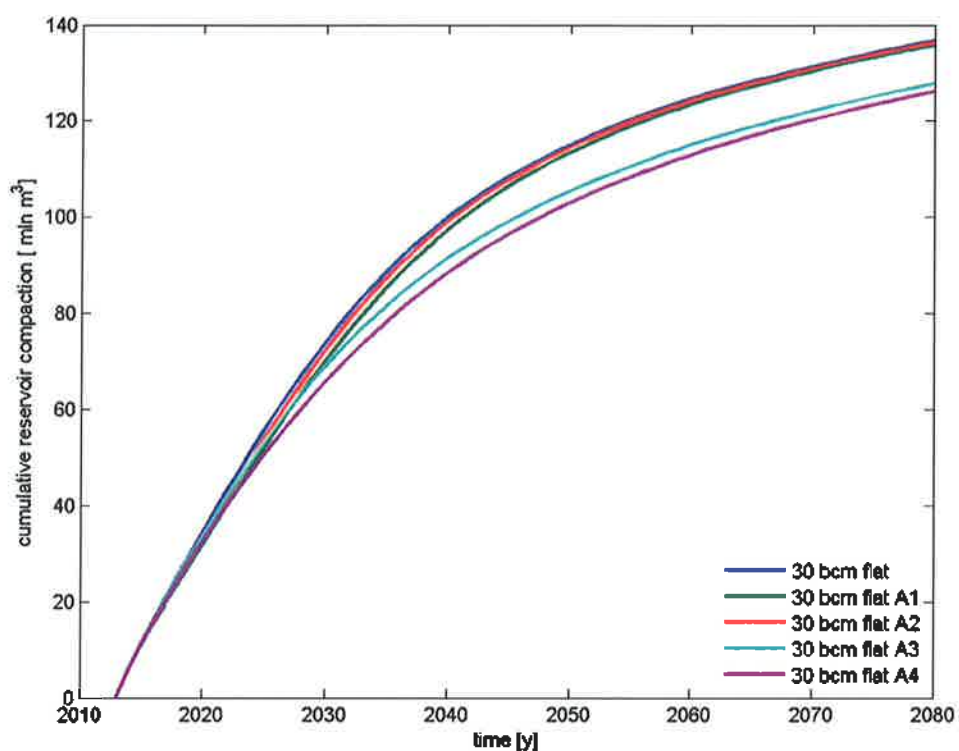




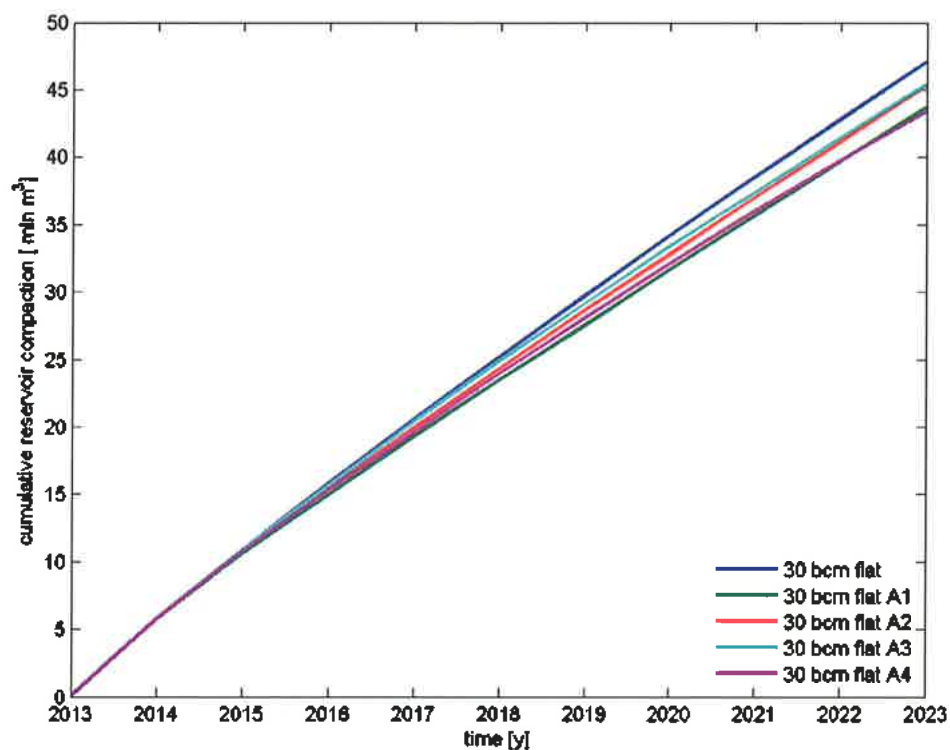
Figuur D.3.3 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het RTCM model.



Figuur D.3.4 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de gehele periode met het RTCM model.

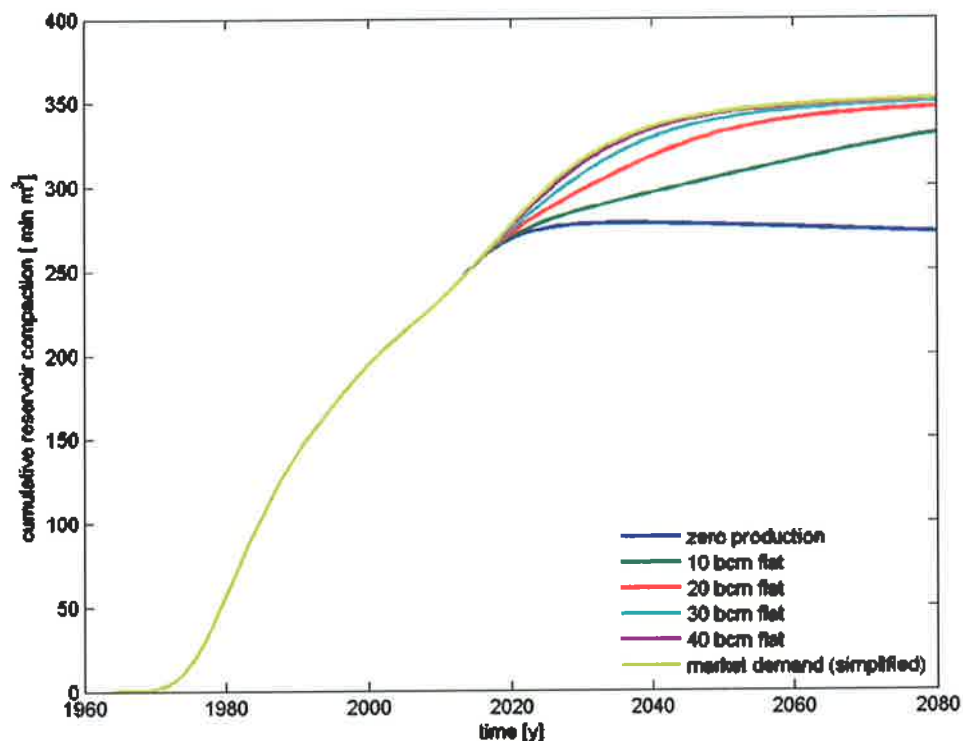


Figuur D.3.5 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model.

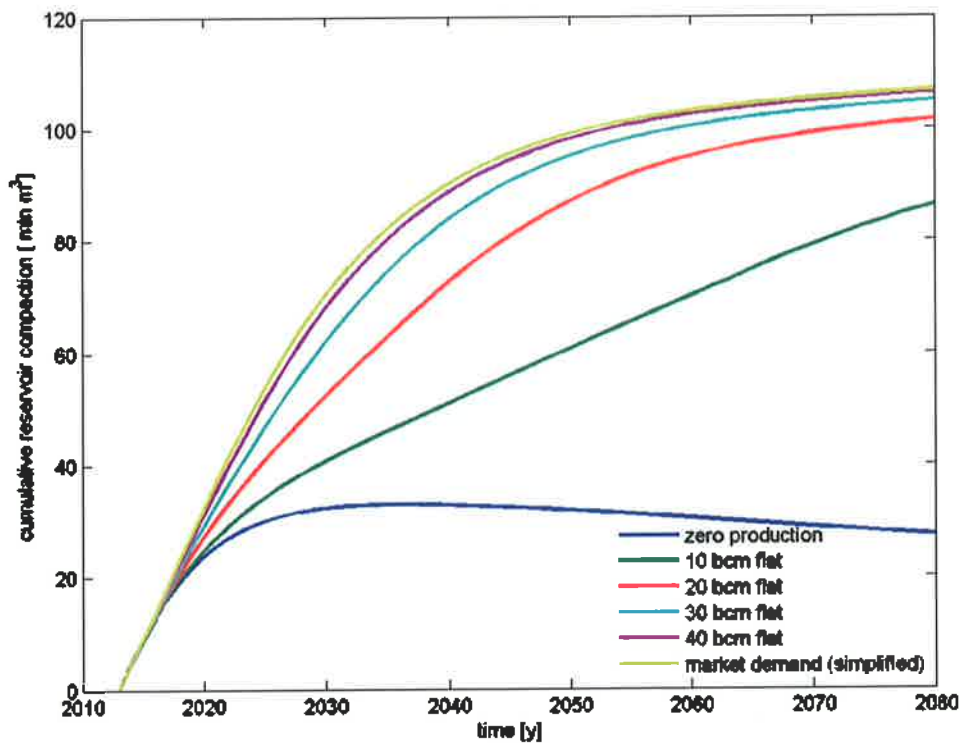


Figuur D.3.6 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het RTCM model.

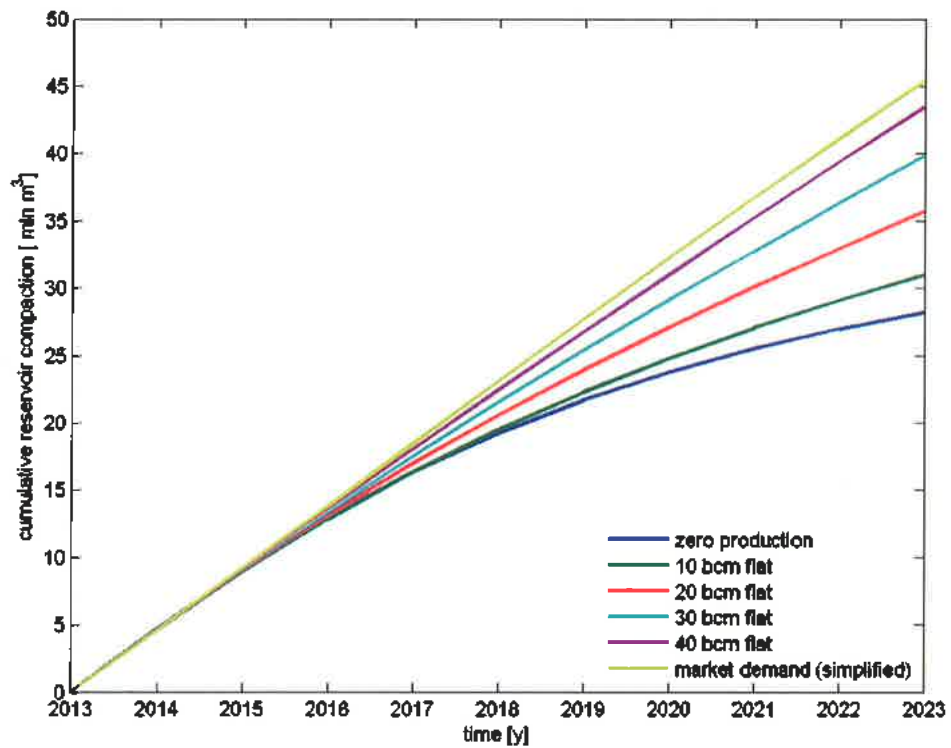
Appendix D.4: Cumulatieve compactie met het Time-Decay model



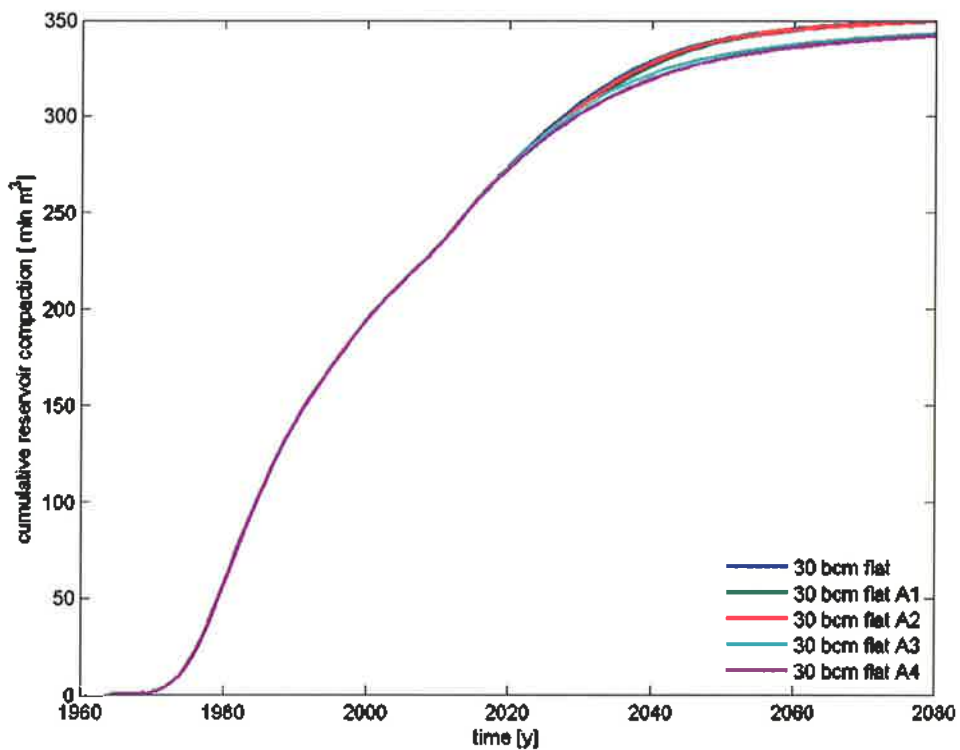
Figuur D.4.1 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het Time-Decay model.



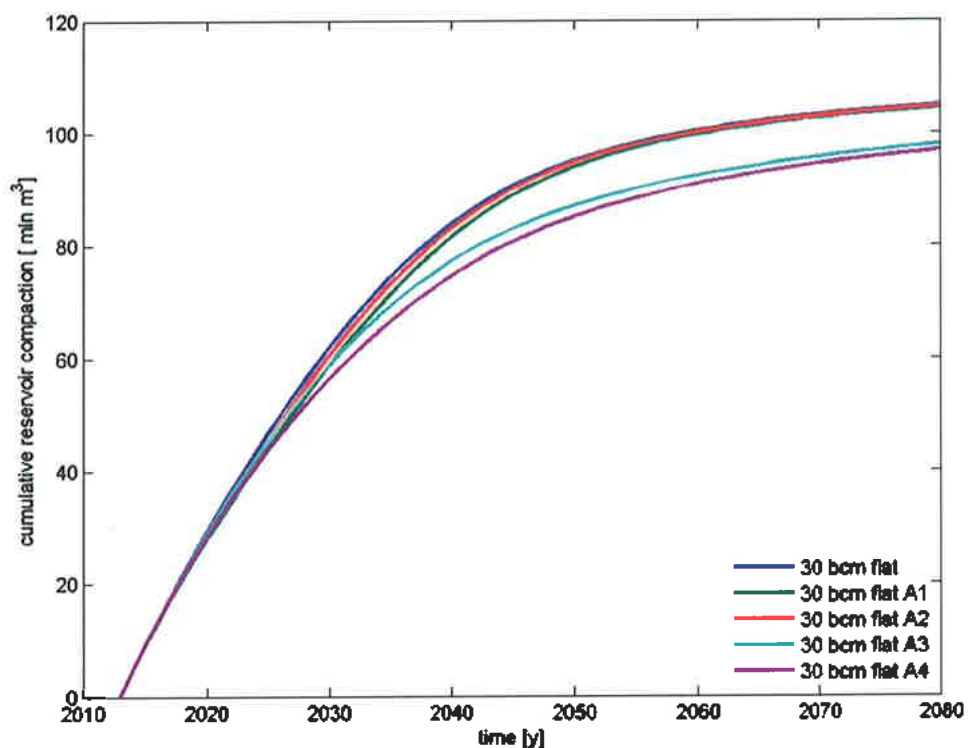
Figuur D.4.2 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het Time-Decay model.



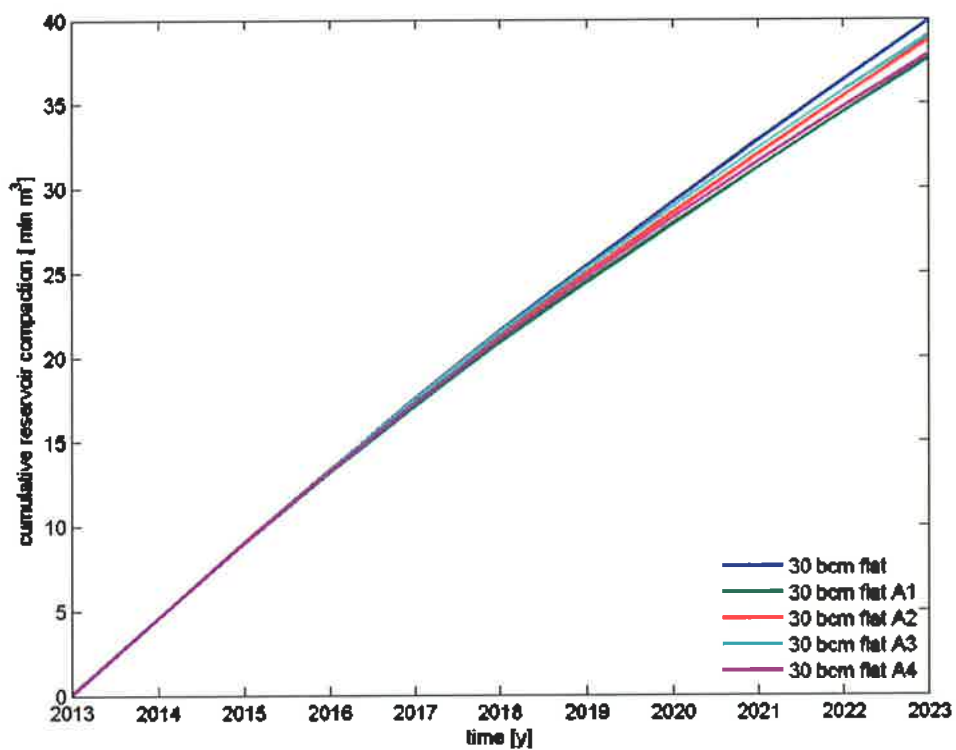
Figuur D.4.3 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het Time-Decay model.



Figuur D.4.4 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de gehele periode met het Time-Decay model.

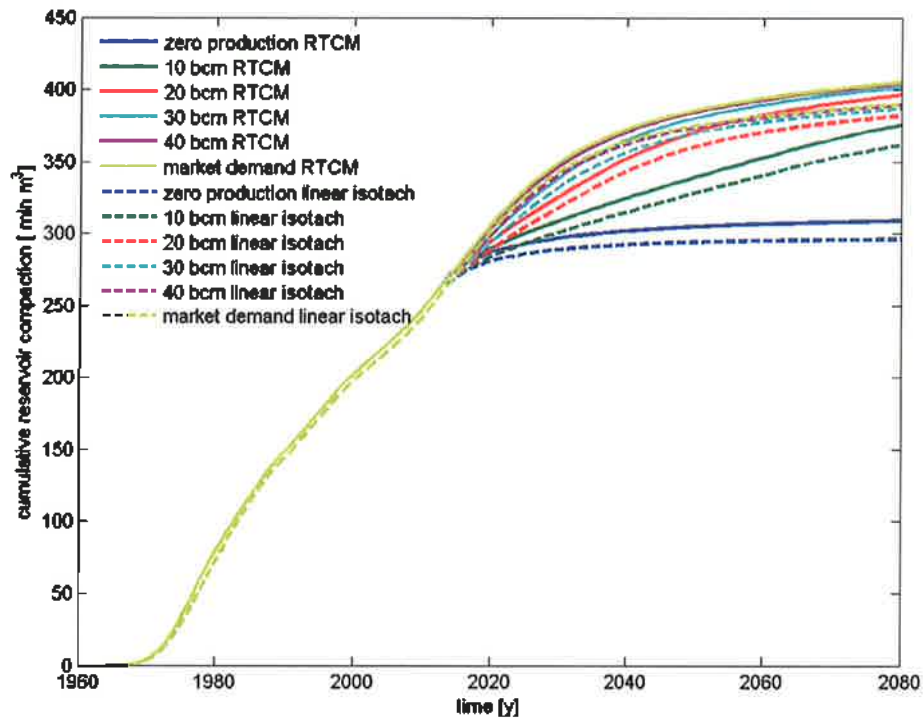


Figuur D.4.5 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 met het Time-Decay model.

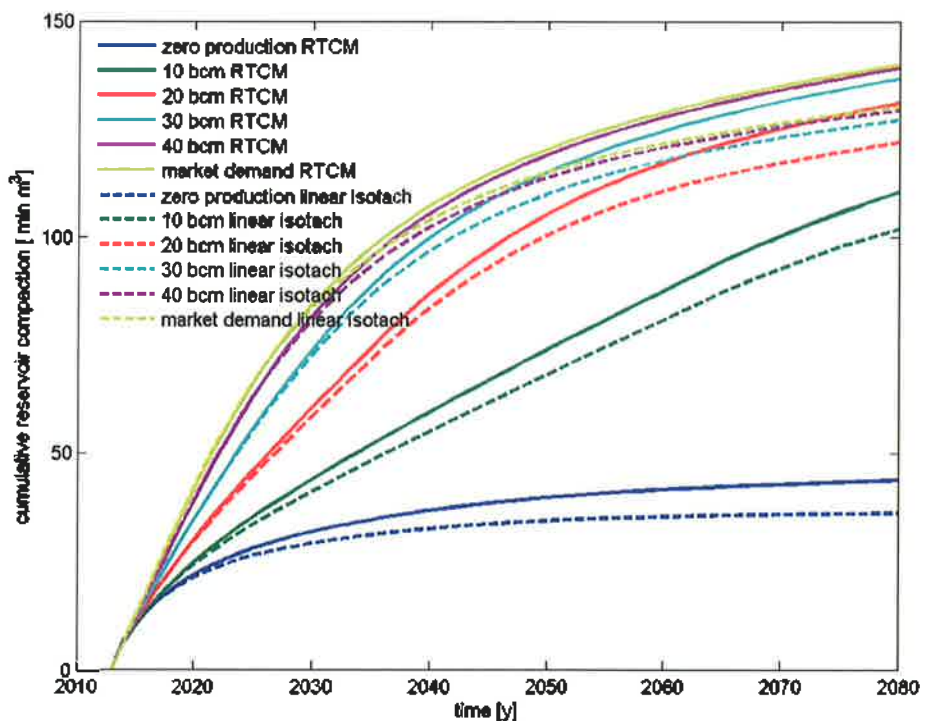


Figuur D.4.6 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het Time-Decay model.

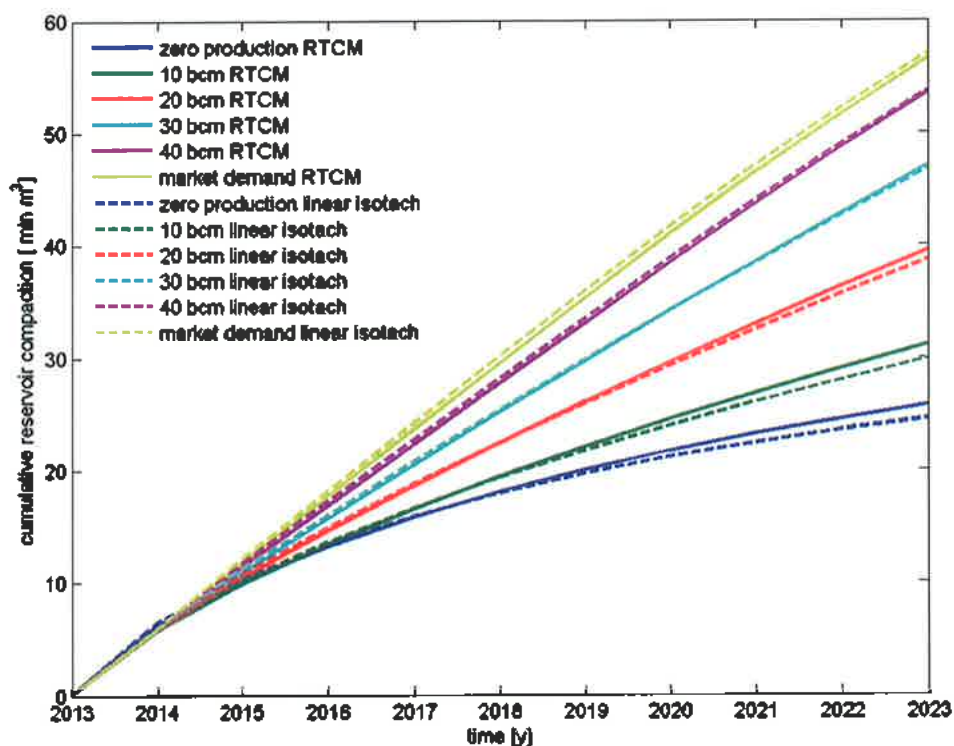
Appendix D.5: Cumulatieve compactieverschillen tussen het RTCM model en het gelineariseerd isotachenmodel, en tussen het RTCM model en het Time-Decay model



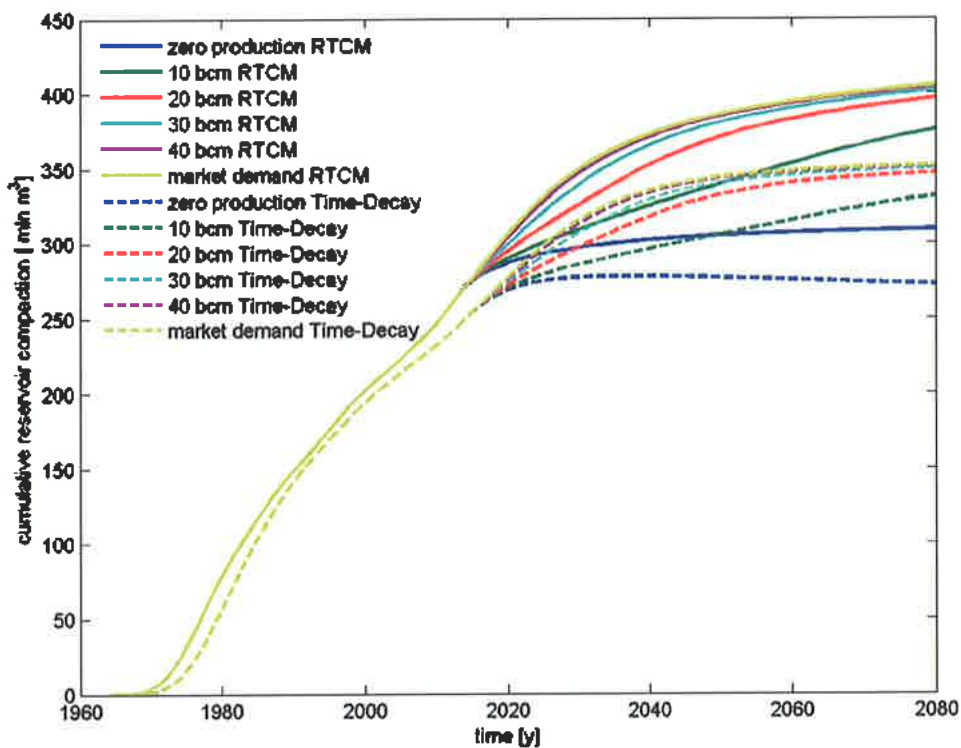
Figuur D.5.1 Cumulatieve compactie voor de gehele periode met het RTCM model en het lineair isotach model.



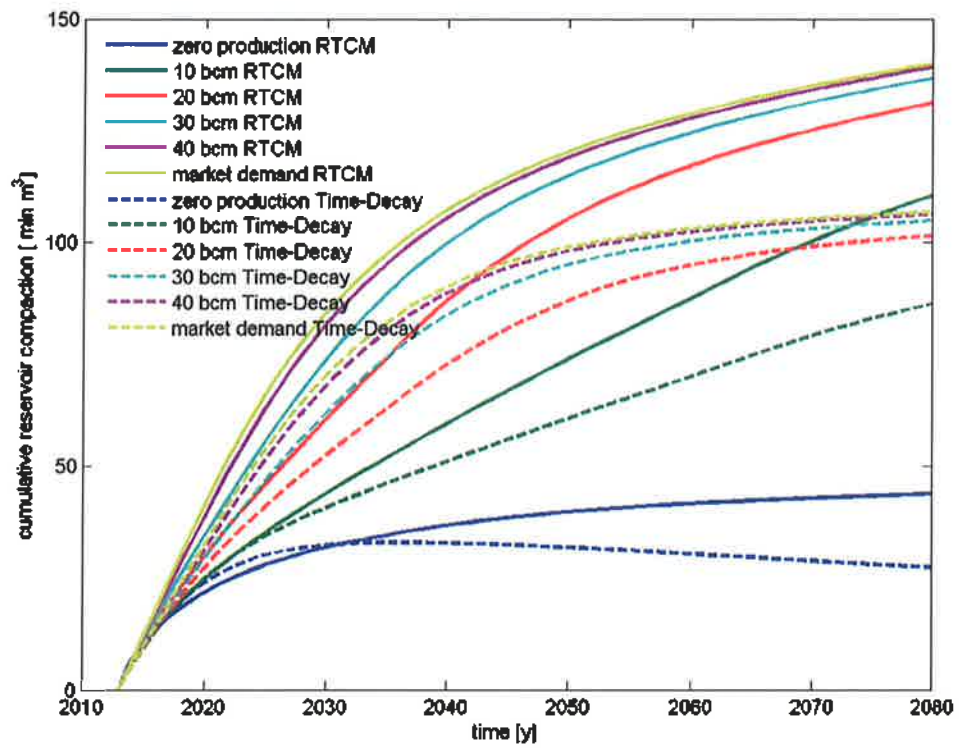
Figuur D.5.2 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model en het lineair isotach model.



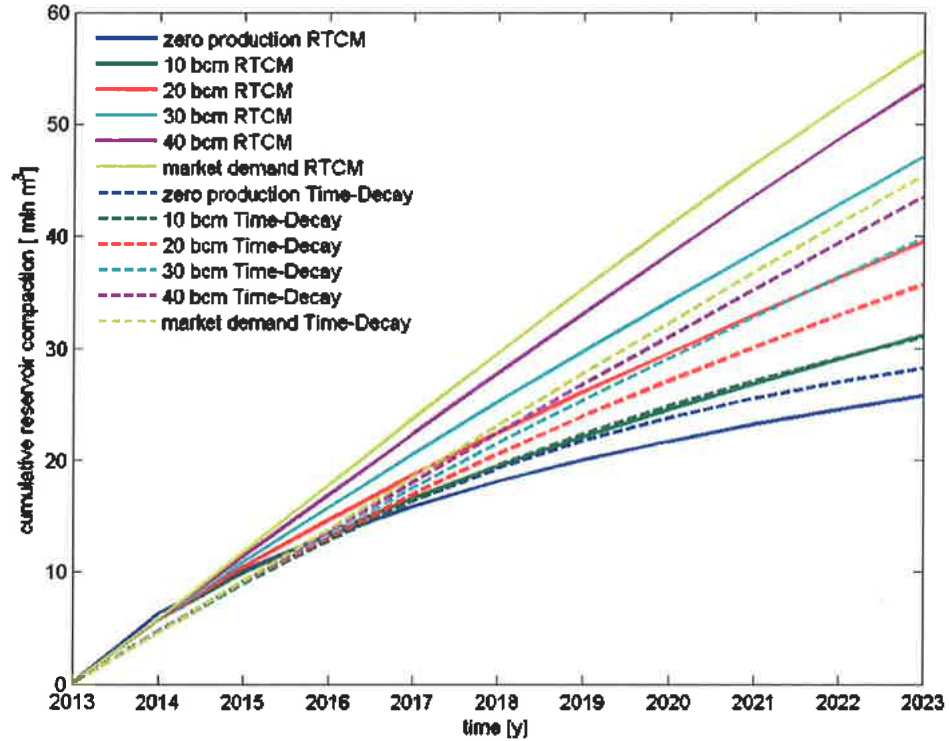
Figuur D.5.3 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het lineair isotach model.



Figuur D.5.4 Cumulatieve compactie voor de gehele periode met het RTCM model en het Time-Decay model.



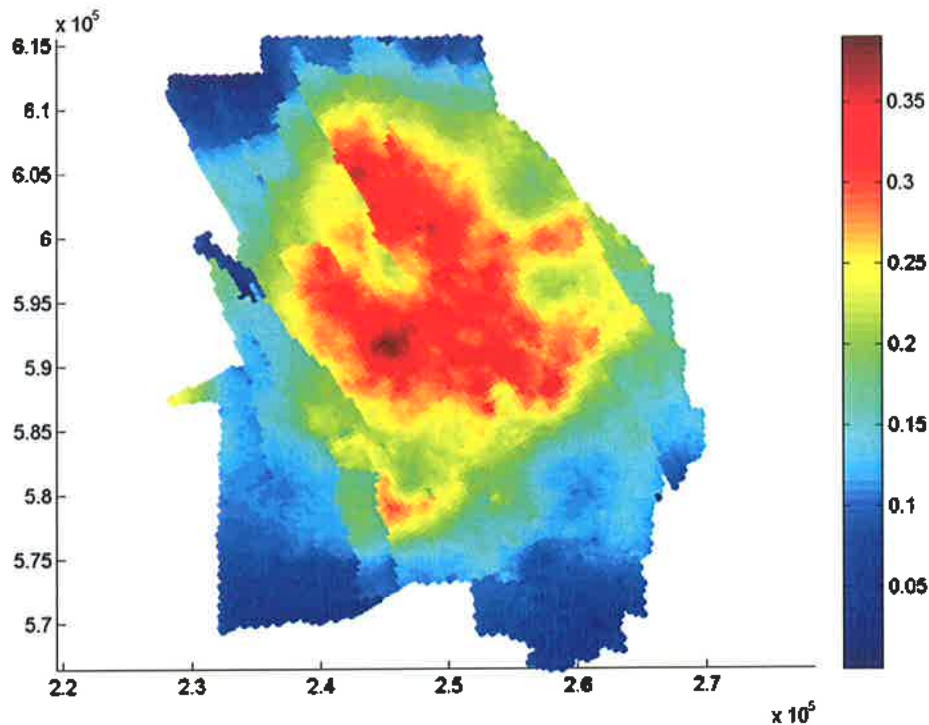
Figuur D.5.5 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model en het Time-Decay model.



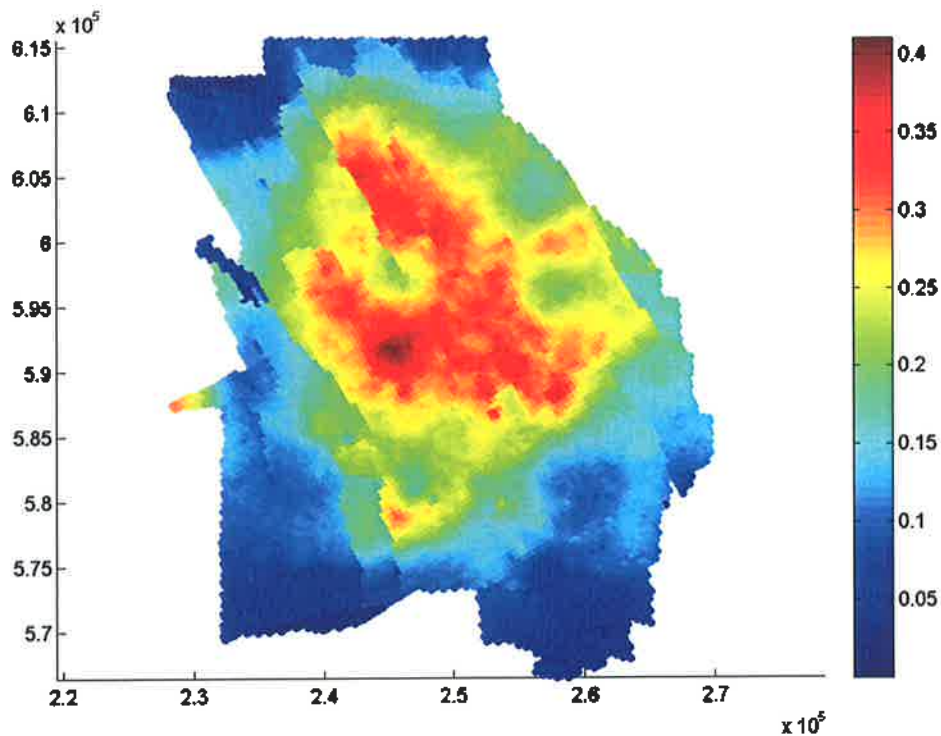
Figuur D.5.6 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het Time-Decay model.



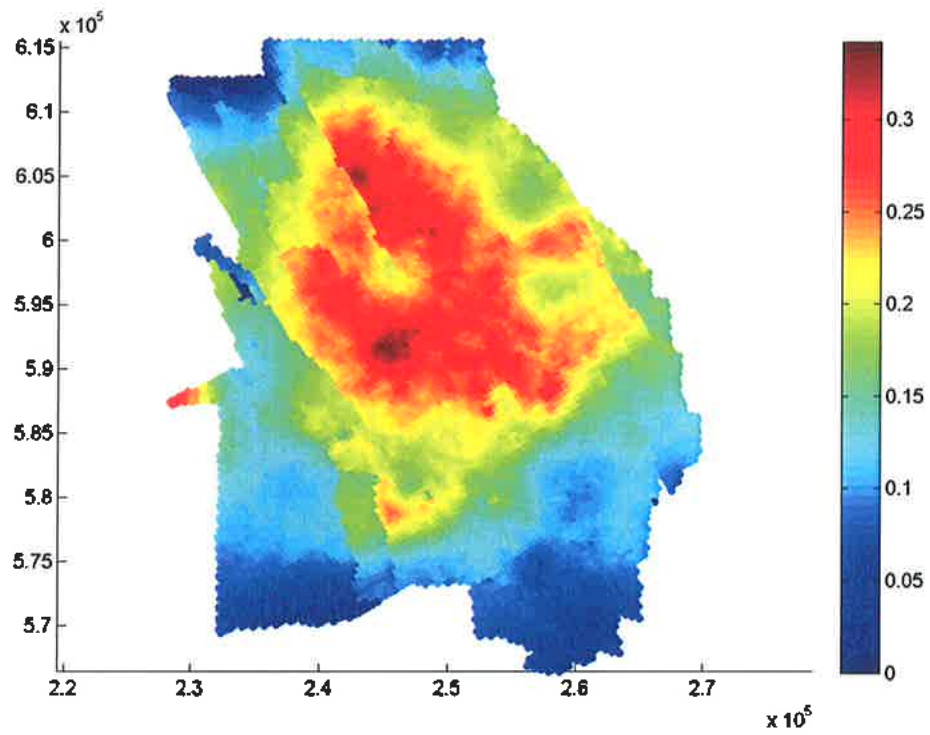
Appendix D.6: Cumulatieve compactiekaarten in 2013



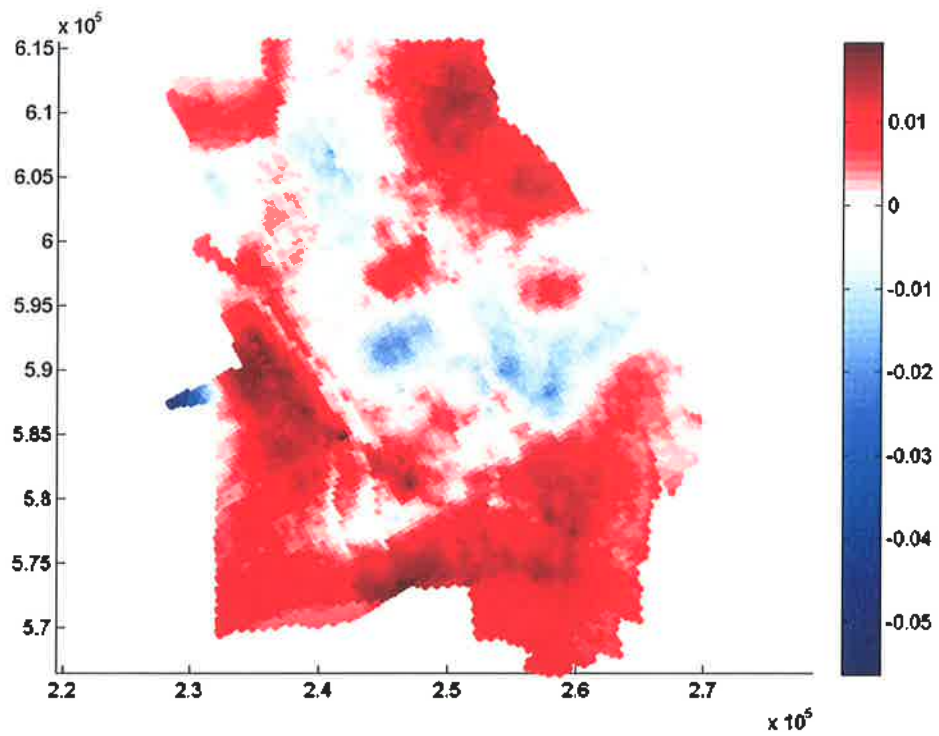
Figuur D.6.1 Cumulatieve compactie in meters eind 2013 met het RTCM model.



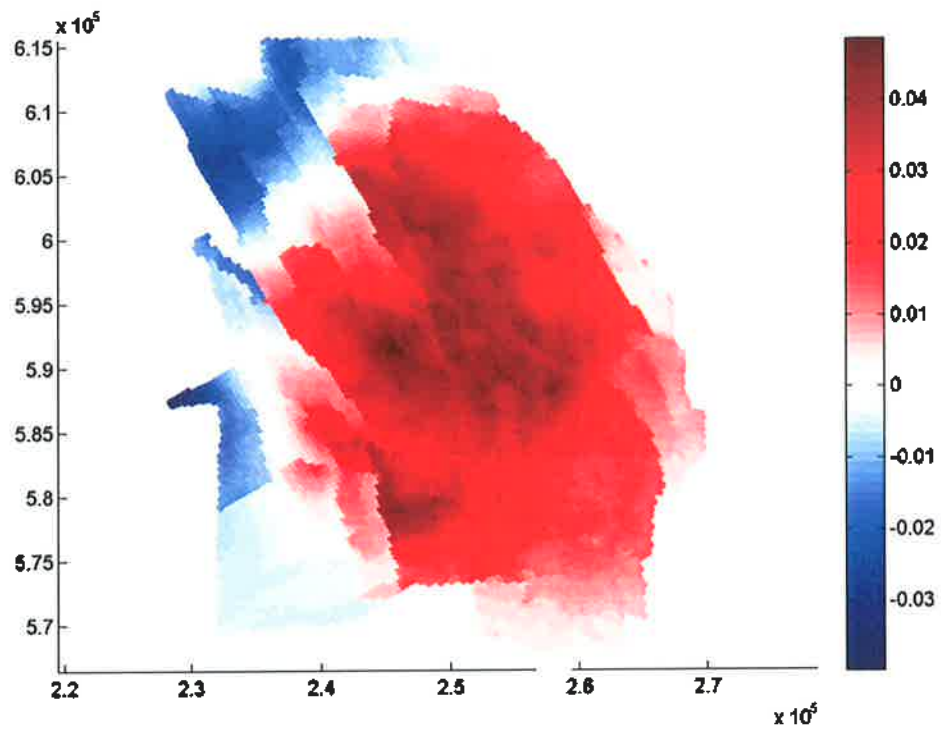
Figuur D.6.2 Cumulatieve compactie in meters eind 2013 met het lineair isotachen model.



Figuur D.6.3 Cumulatieve compactie in meters eind 2013 met het Time-Decay model.

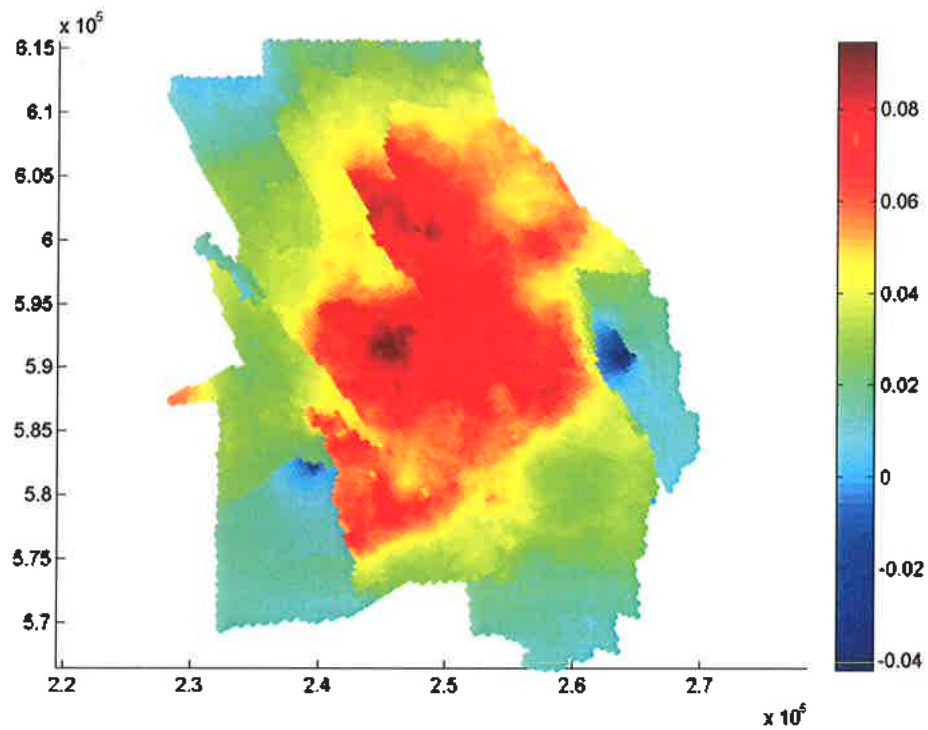


Figuur D.6.4 Verschil in compactie in 2013, in meters, tussen het RTCM model en het lineair isotachen model in meters. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

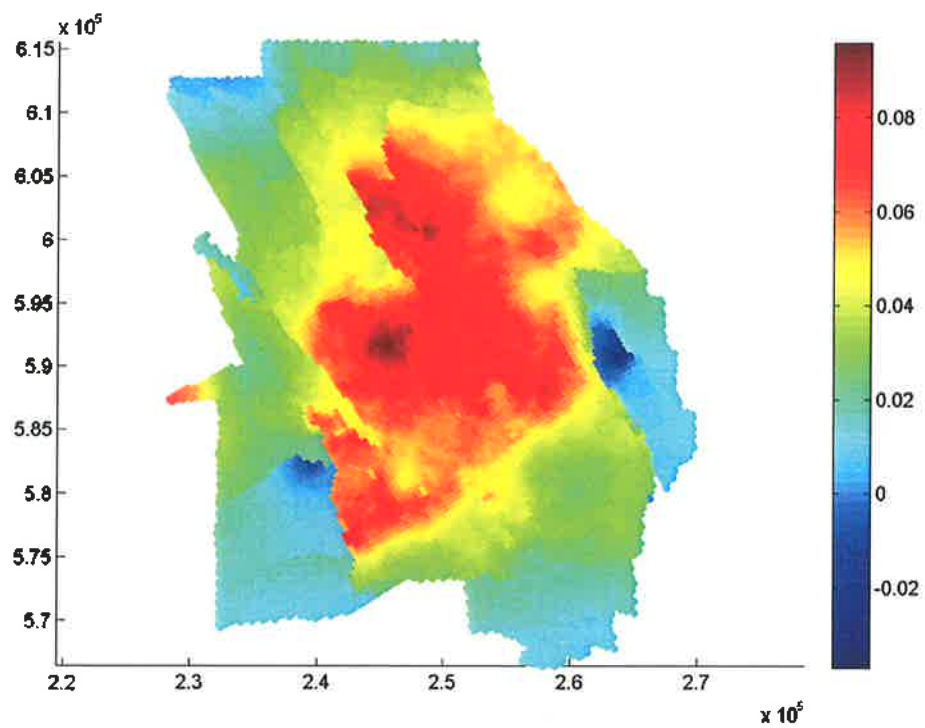


Figuur D.6.5 Verschil in compactie in 2013, in meters, tussen het RTCM model en het Time-Decay model in meters. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

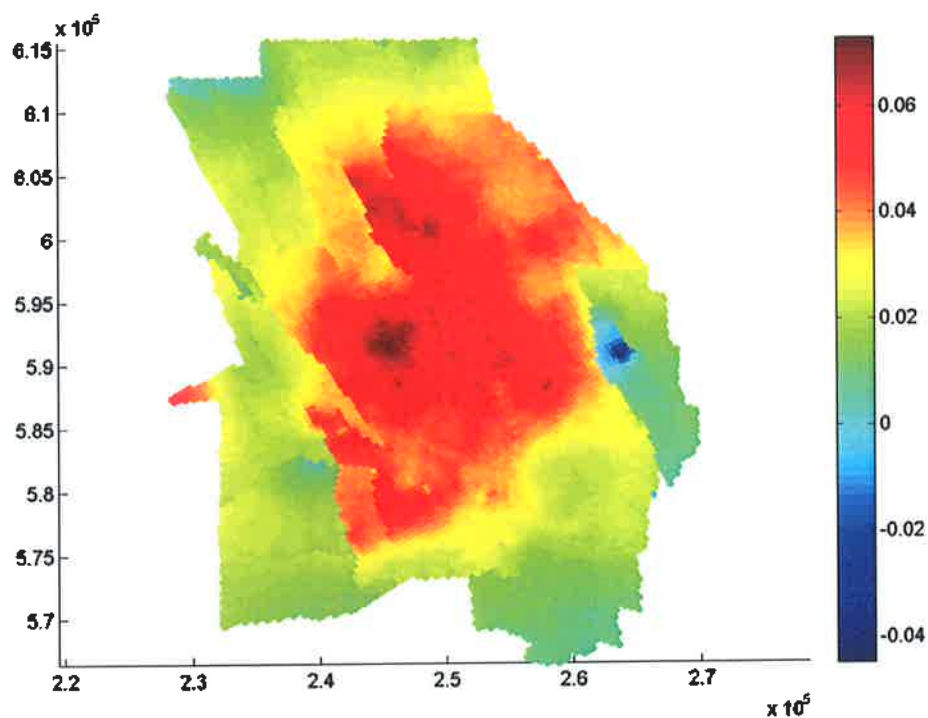
*Appendix D.7: Compactiekaarten, prognose 2013-2023 voor het marktvraag scenario*



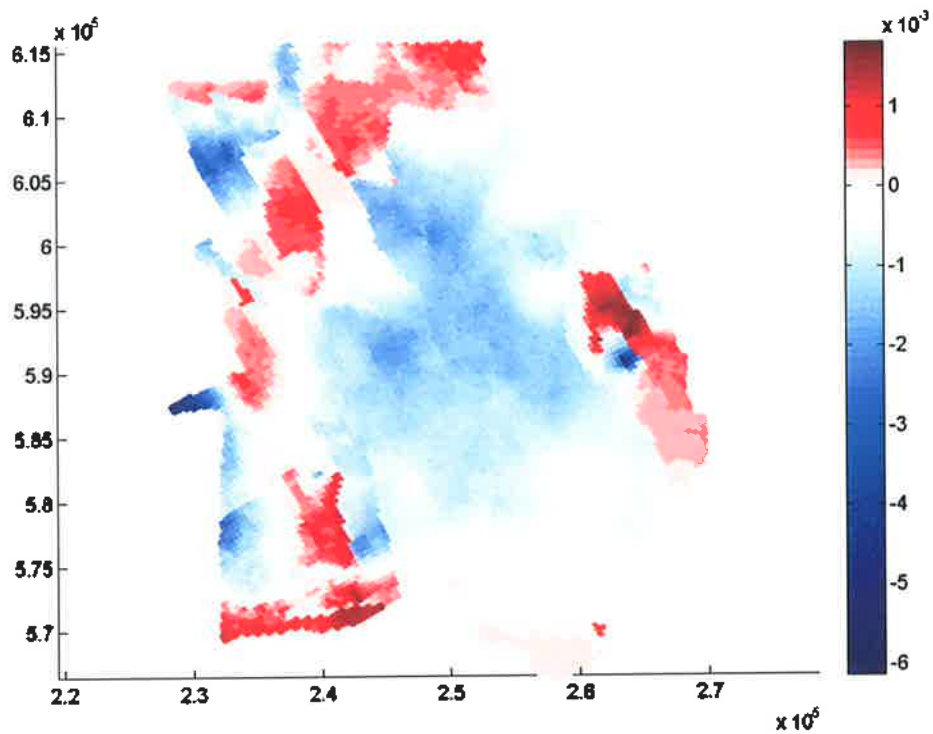
Figuur D.7.1 Cumulatieve compactie, in meters, vanaf 2013 tot en met 2023 berekend met het RTCM model voor het marktvraag scenario.



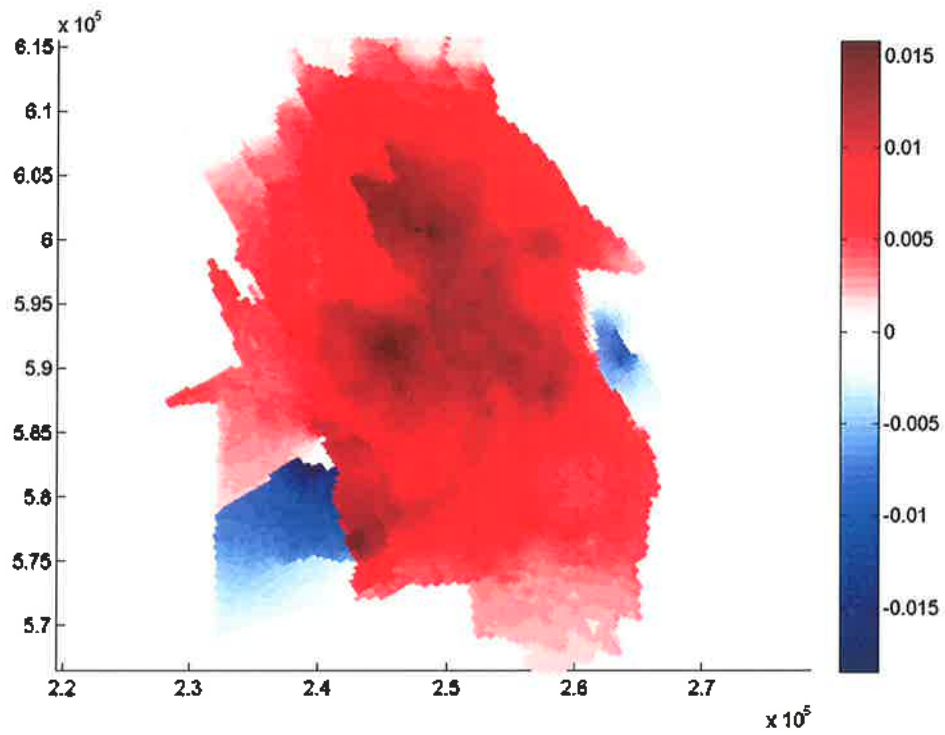
Figuur D.7.2 Cumulatieve compactie, in meters, vanaf 2013 tot en met 2023 berekend met het lineair isotachen model voor het marktvraag scenario.



Figuur D.7.3 Cumulatieve compactie, in meters, vanaf 2013 tot en met 2023 berekend met het Time-Decay model voor het marktvaag scenario.

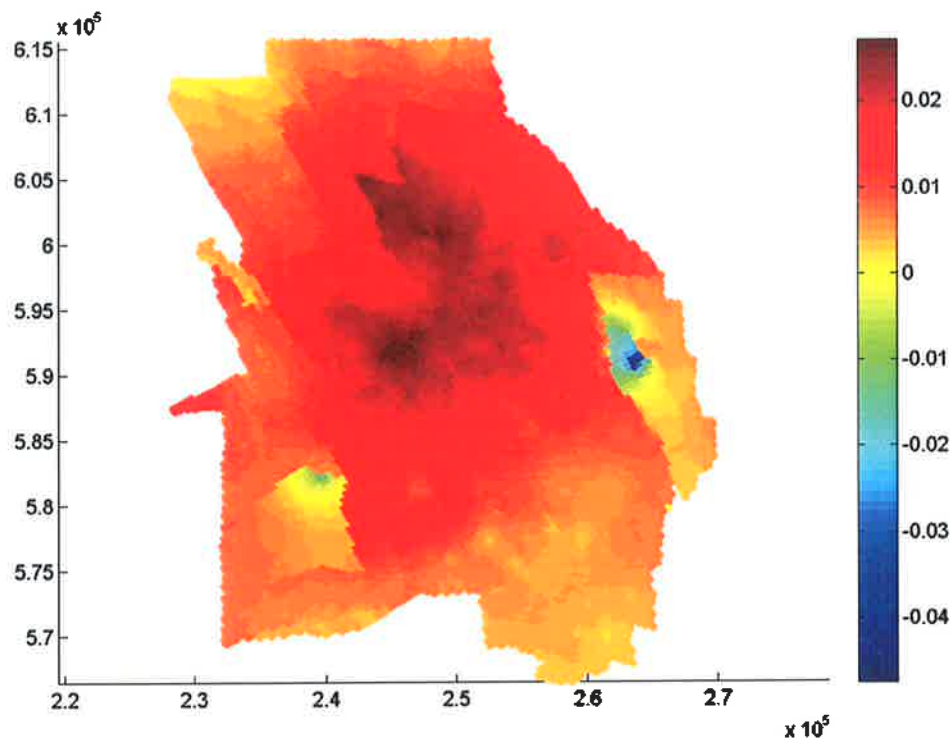


Figuur D.7.4 Verschil in compactie voor de periode 2013-2023 tussen het RTCM model en het lineair isotachen model, in meters, voor het marktvaag scenario. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

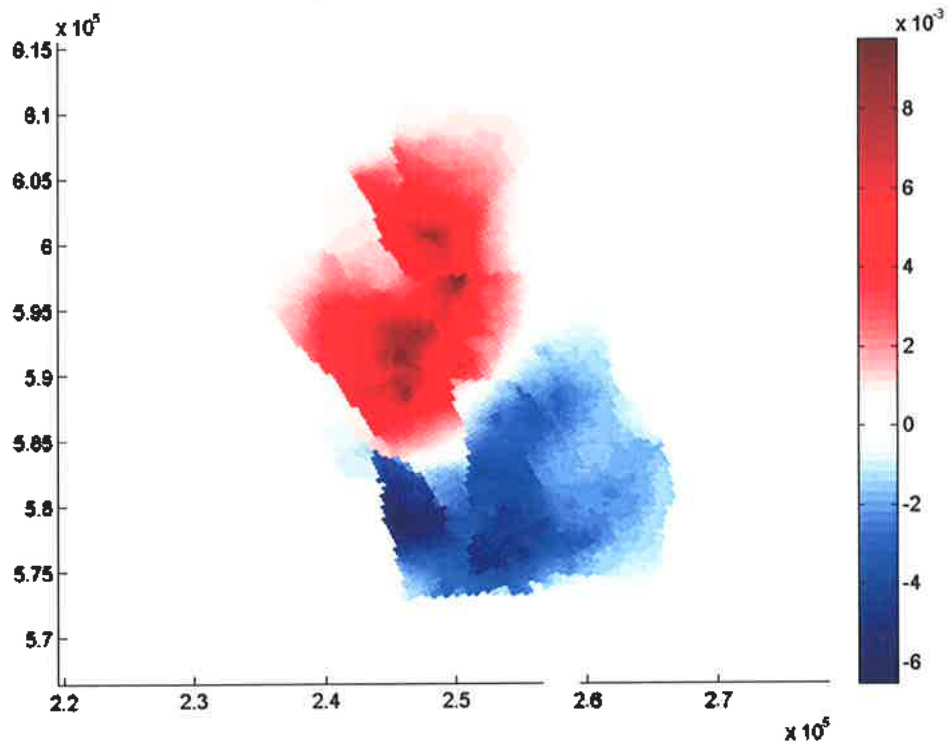


Figuur D.7.5 Verschil in compactie voor de periode 2013-2023 tussen het RTCM model en het Time-Decay model, in meters, voor het marktvraag scenario. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

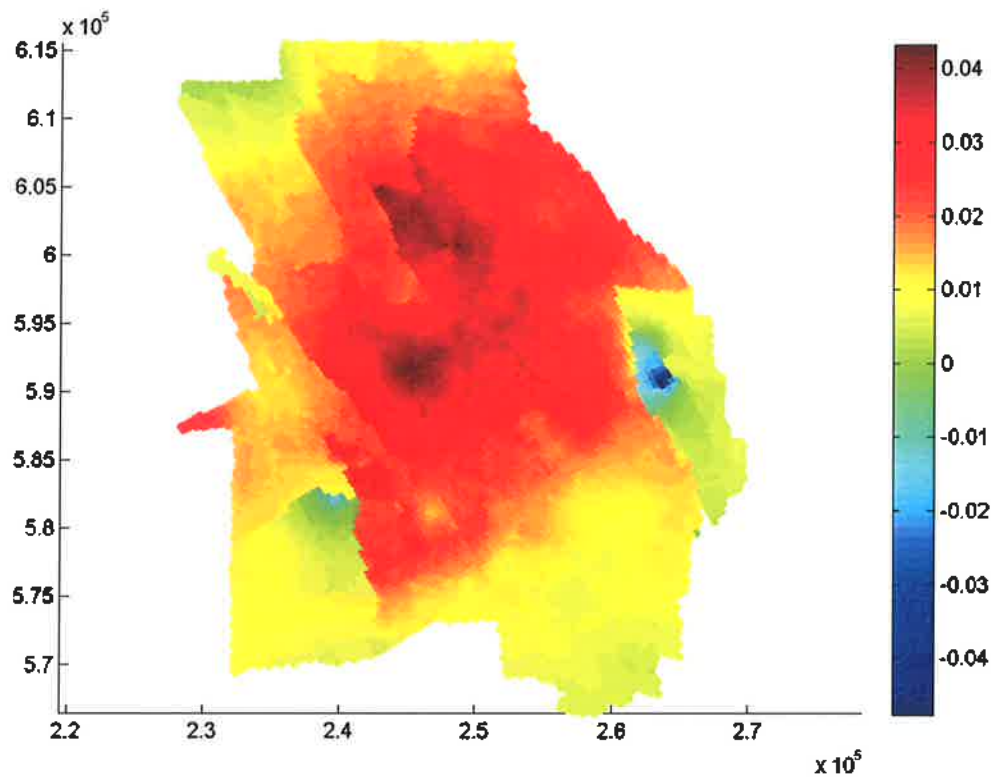
Appendix D.8: Compactiekaarten voor het 30bcm scenario en verschillen tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario voor de periodes 2013-2016, 2013-2018 en 2013-2023.



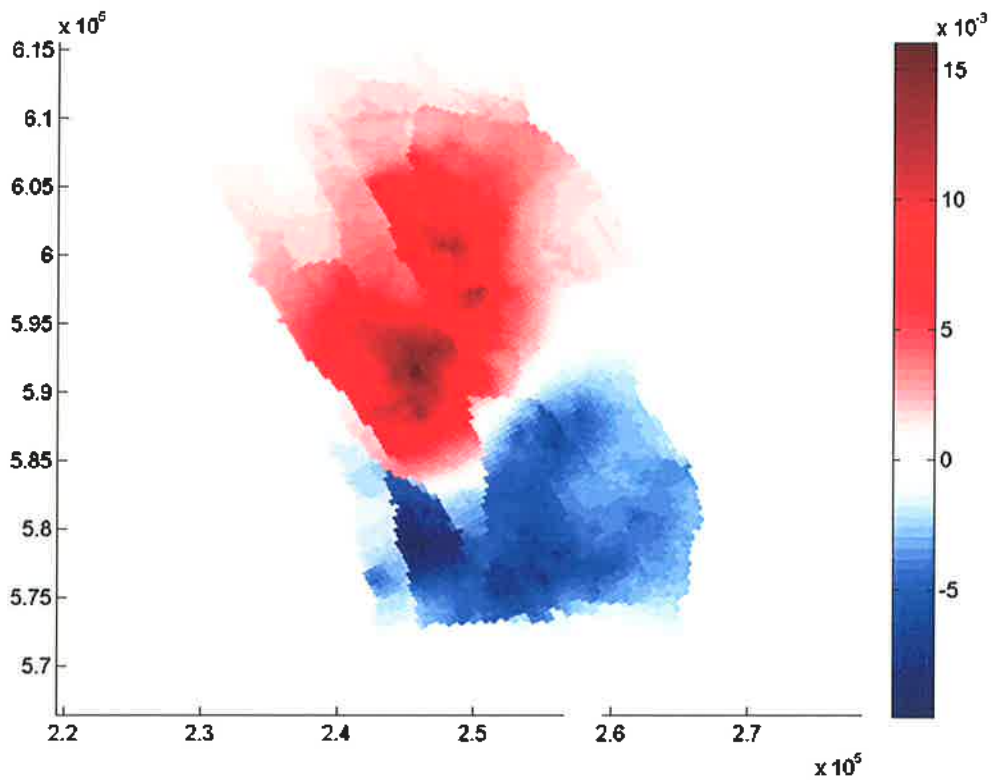
Figuur D.8.1 Compactie, in meters, voor het 30bcm scenario voor de periode vanaf 2013 tot 2016 met het RTCM model.



Figuur D.8.2 Compactieverschil, in meters, tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2016 met het RTCM model.

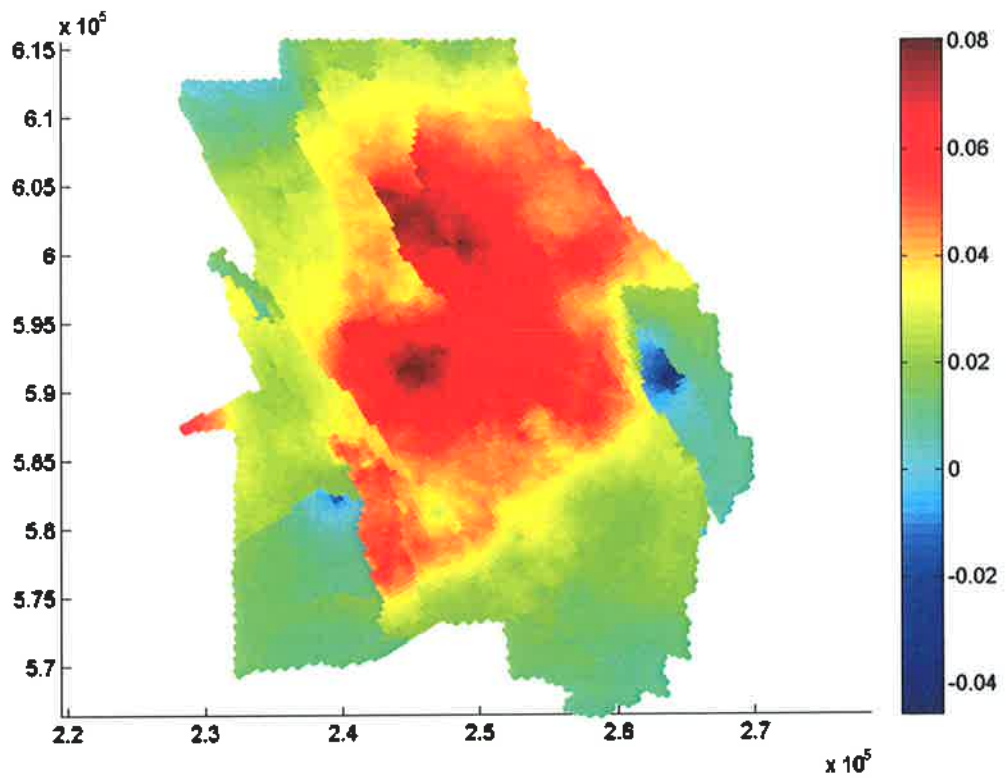


Figuur D.8.3 Compactie, in meters, voor het 30bcm scenario voor de periode vanaf 2013 tot 2018 met het RTCM model.

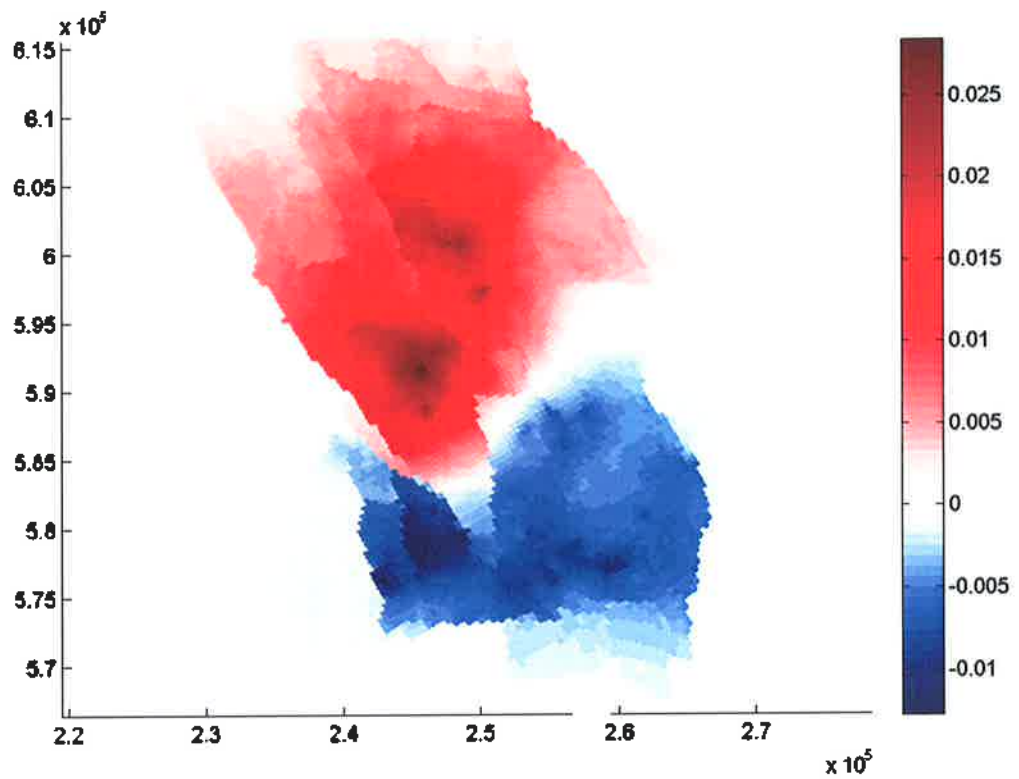


Figuur D.8.4 Compactieverschil, in meters, tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2018 met het RTCM model.





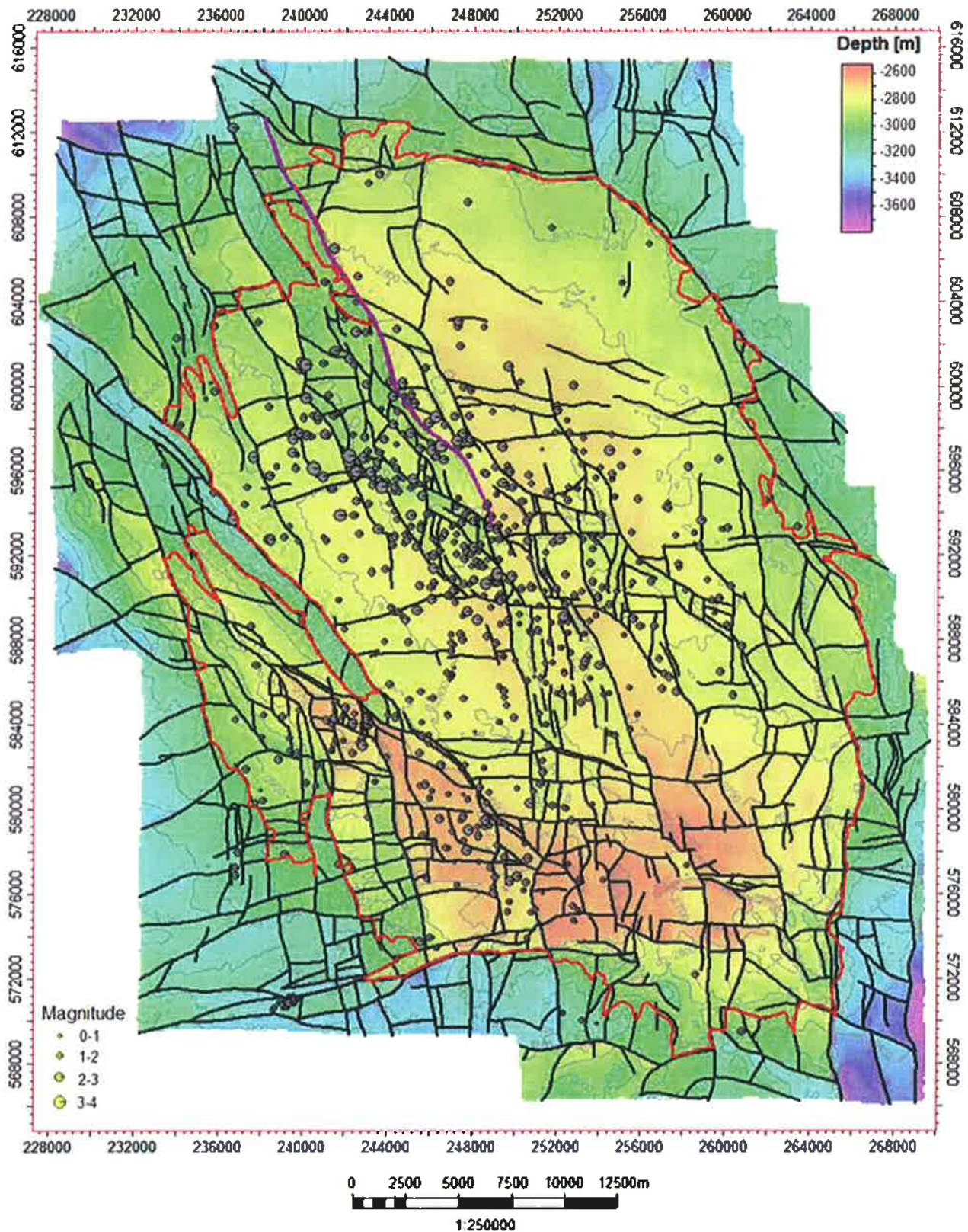
Figuur D.8.5 Compactie, in meters, voor het 30bcm scenario voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model.



Figuur D.8.6 Compactieverschil, in meters, tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2023 met het RTCM model.

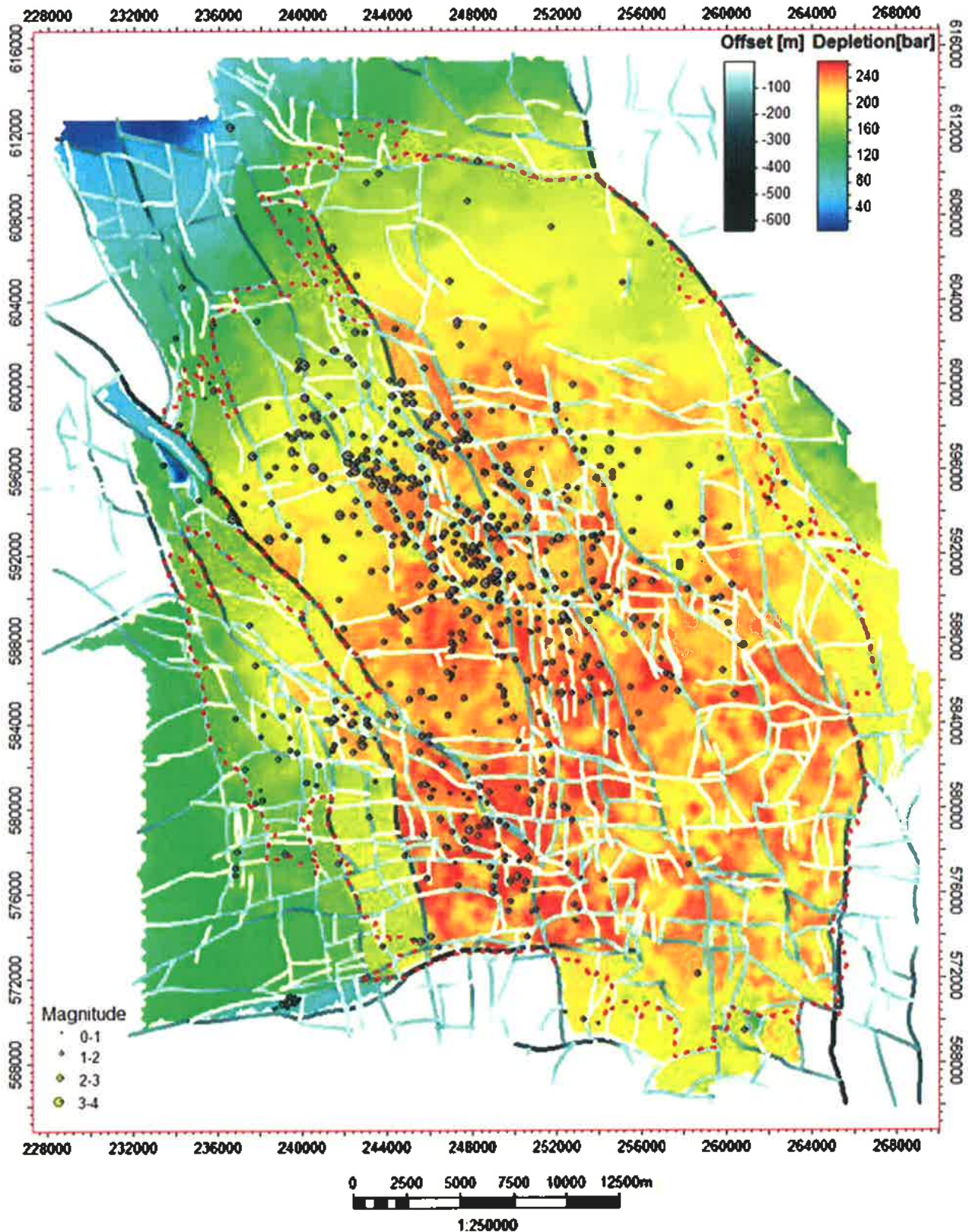
## Appendix E

## Appendix E.1: Overzicht van breuken in het 3D Petrel model



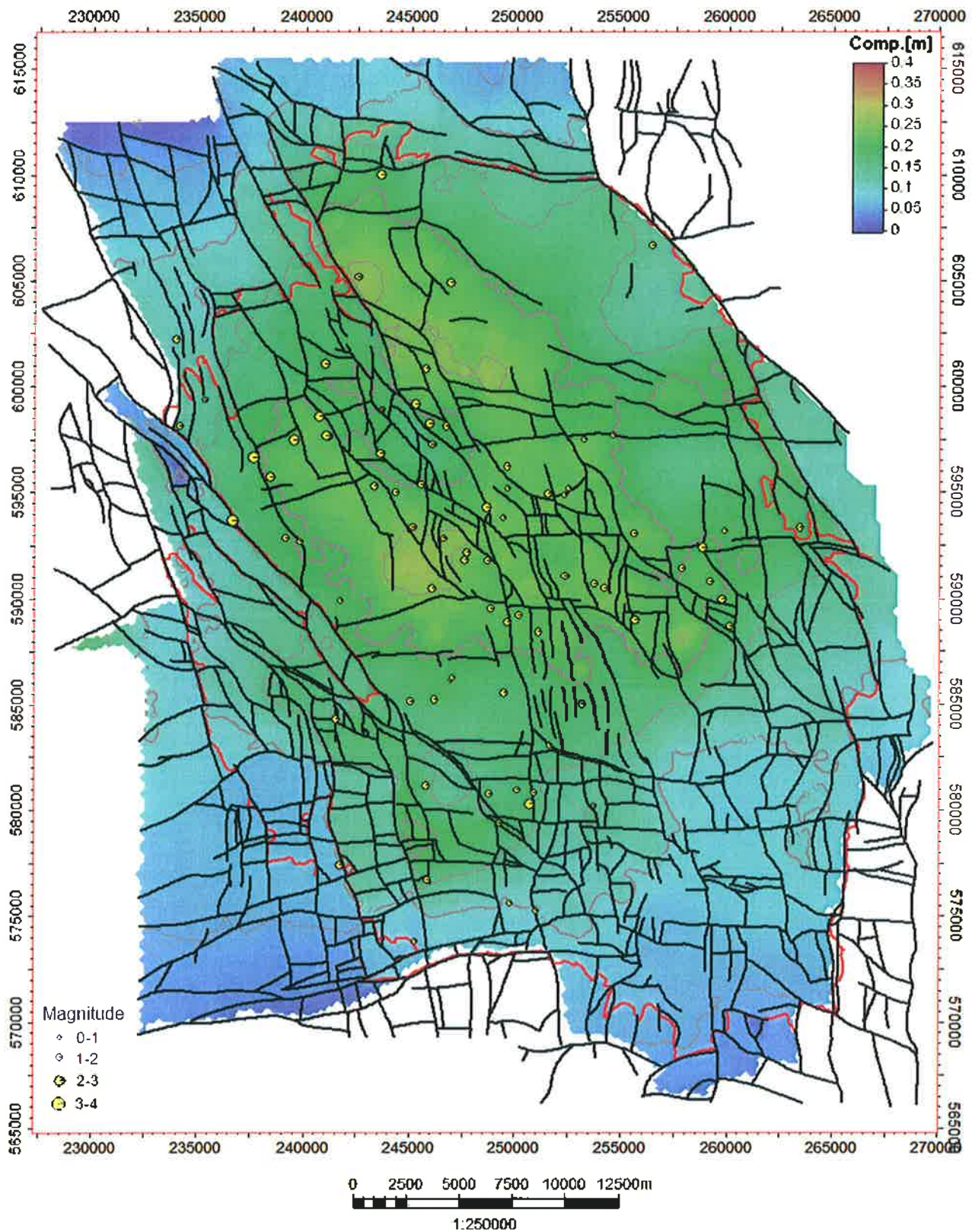
Figuur E.1.1: Overzicht van de breuken in het 3D Petrel model. Het langst aaneengesloten breuksegment is in roze gemarkeerd. In de figuur wordt tevens de diepte van de top van het Rotliegend getoond. Verder geeft de figuur de locatie en magnitude, in grootte van de cirkels, van alle aardbevingen binnen het Groningen gasveld weer.

## Appendix E.2: Offset van breuken en gemiddelde drukdepletie in het Groningen veld

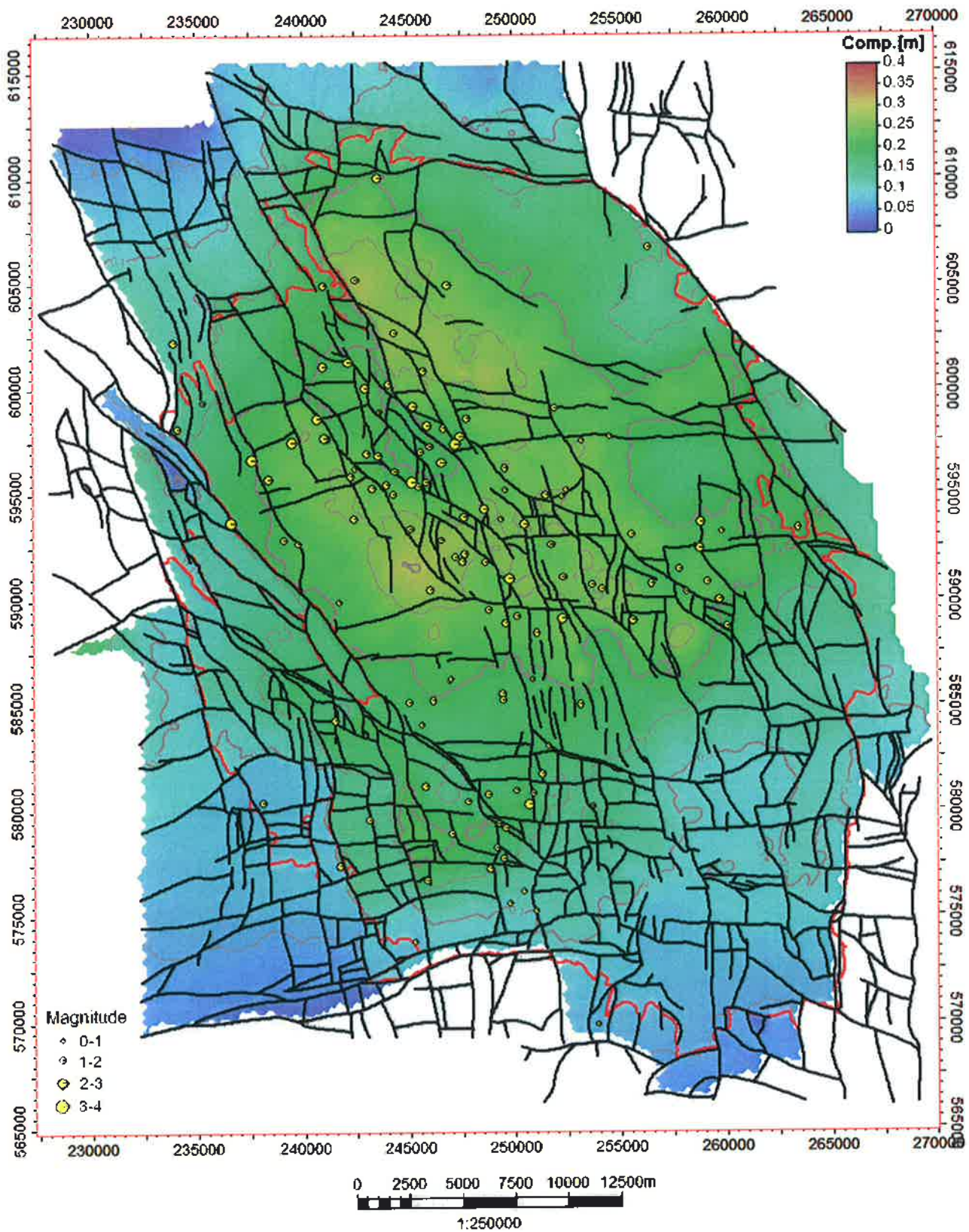


Figuur E.2.1: Verticaal gemiddelde drukdepletie in het Groningen veld voor het jaar 2013. Verder zijn de belangrijkste breuken in het reservoir weergegeven (op diepte top Rotliegend) en de geregistreeerde seismiteit (bevingen geregistreeerd van 1991 tot 2013). De kleurschaal van de breuken geeft het lokale verzet van de top van het Rotliegend weer. De figuur geeft tevens de locatie en magnitude weer van alle aardbevingen binnen het Groningen gasveld.

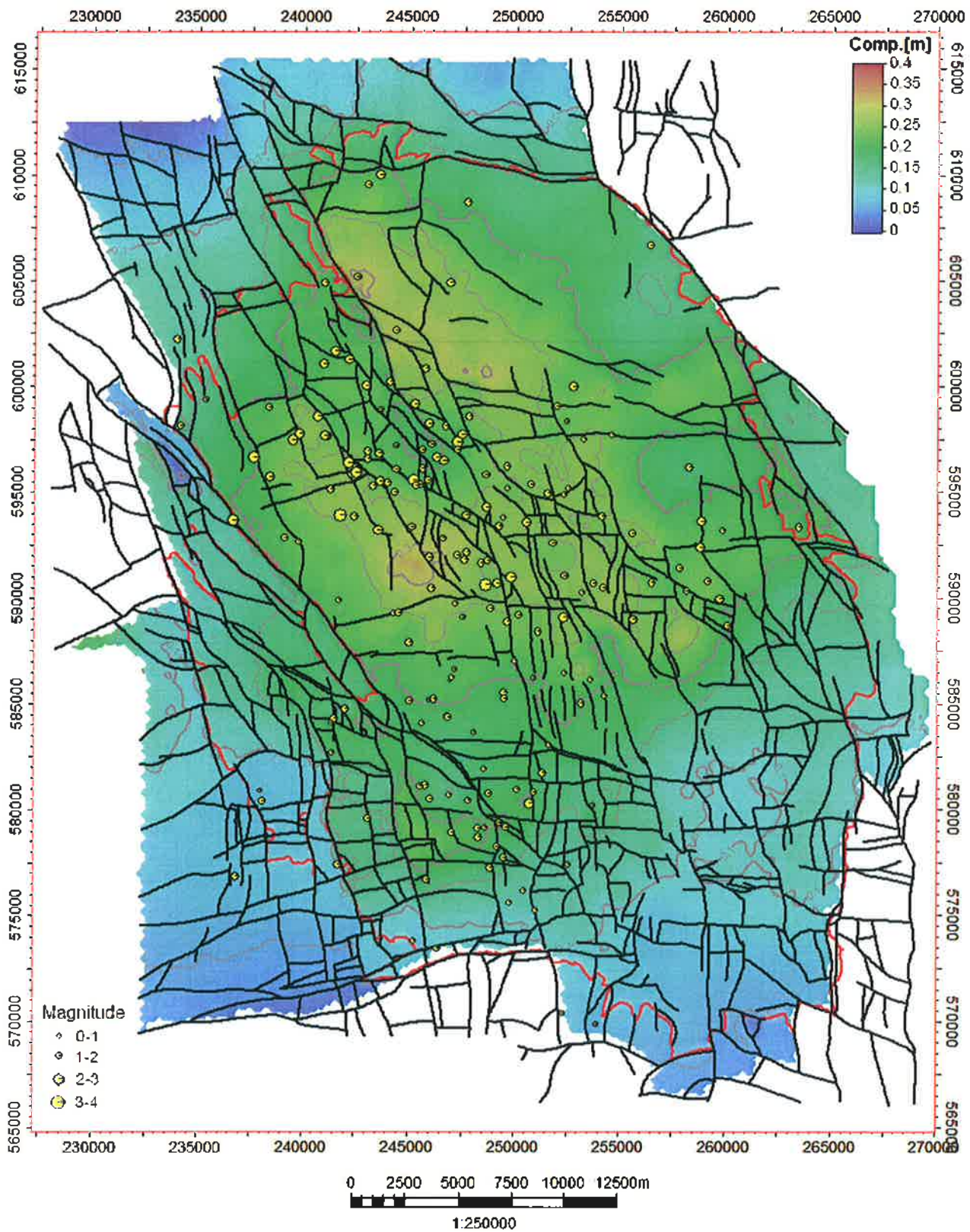
Appendix E.3: Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model.



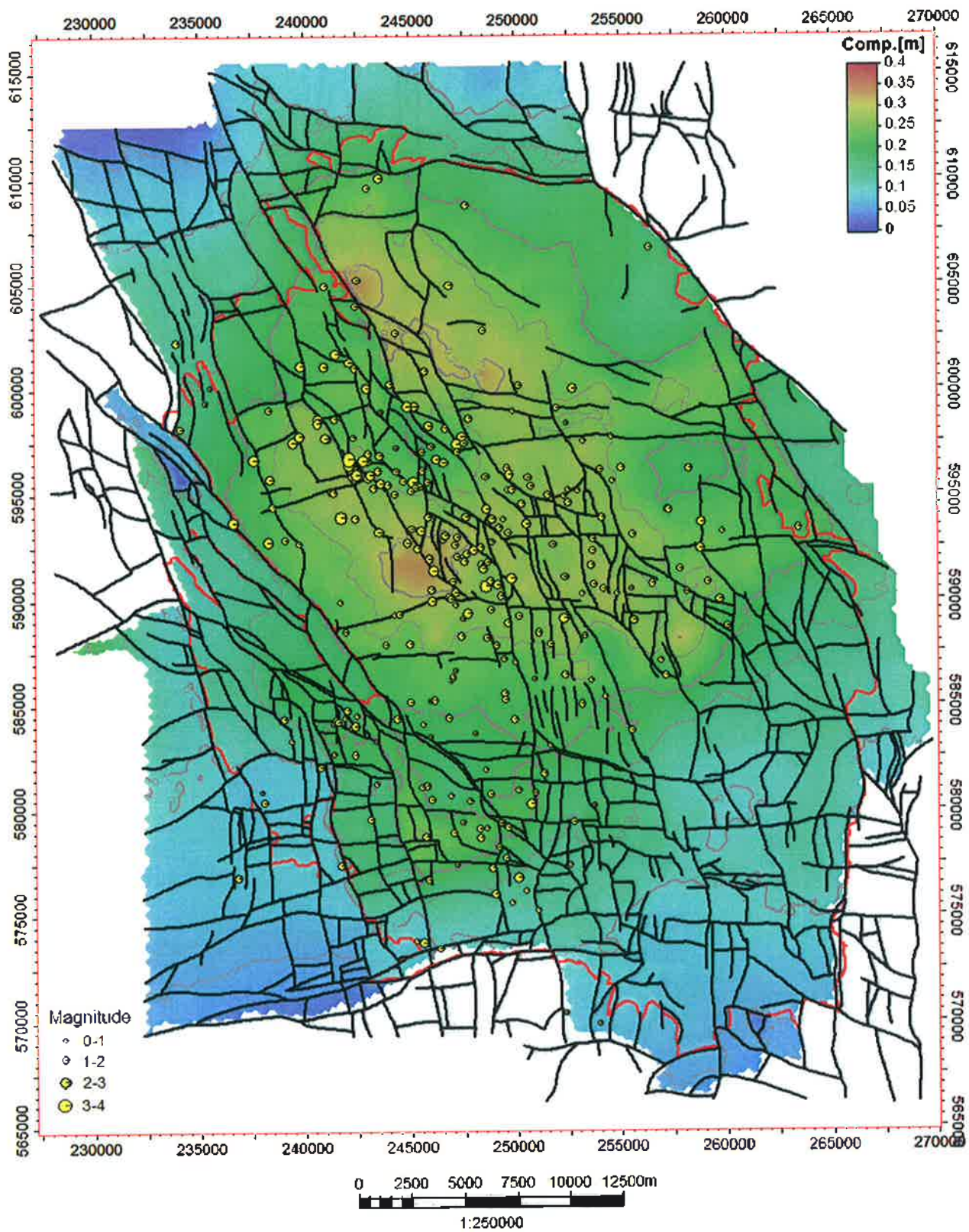
Figuur E.3.1 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 1997. Seismiteit: vanaf 1991 tot 1997.



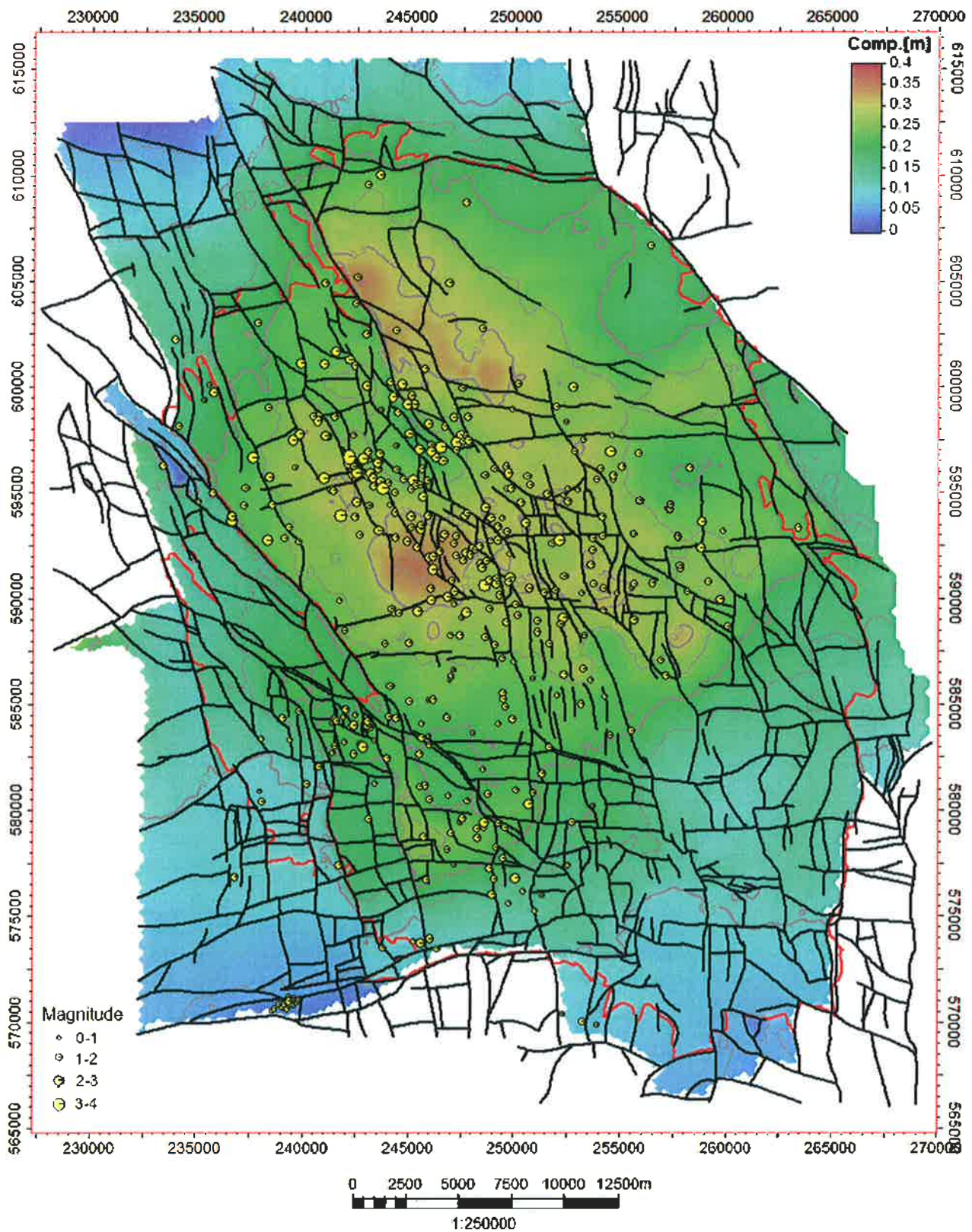
Figuur E.3.2 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2000. Seismiteit: vanaf 1991 tot 2000.



Figuur E.3.3 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiciteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2003. Seismiciteit: vanaf 1991 tot 2003.

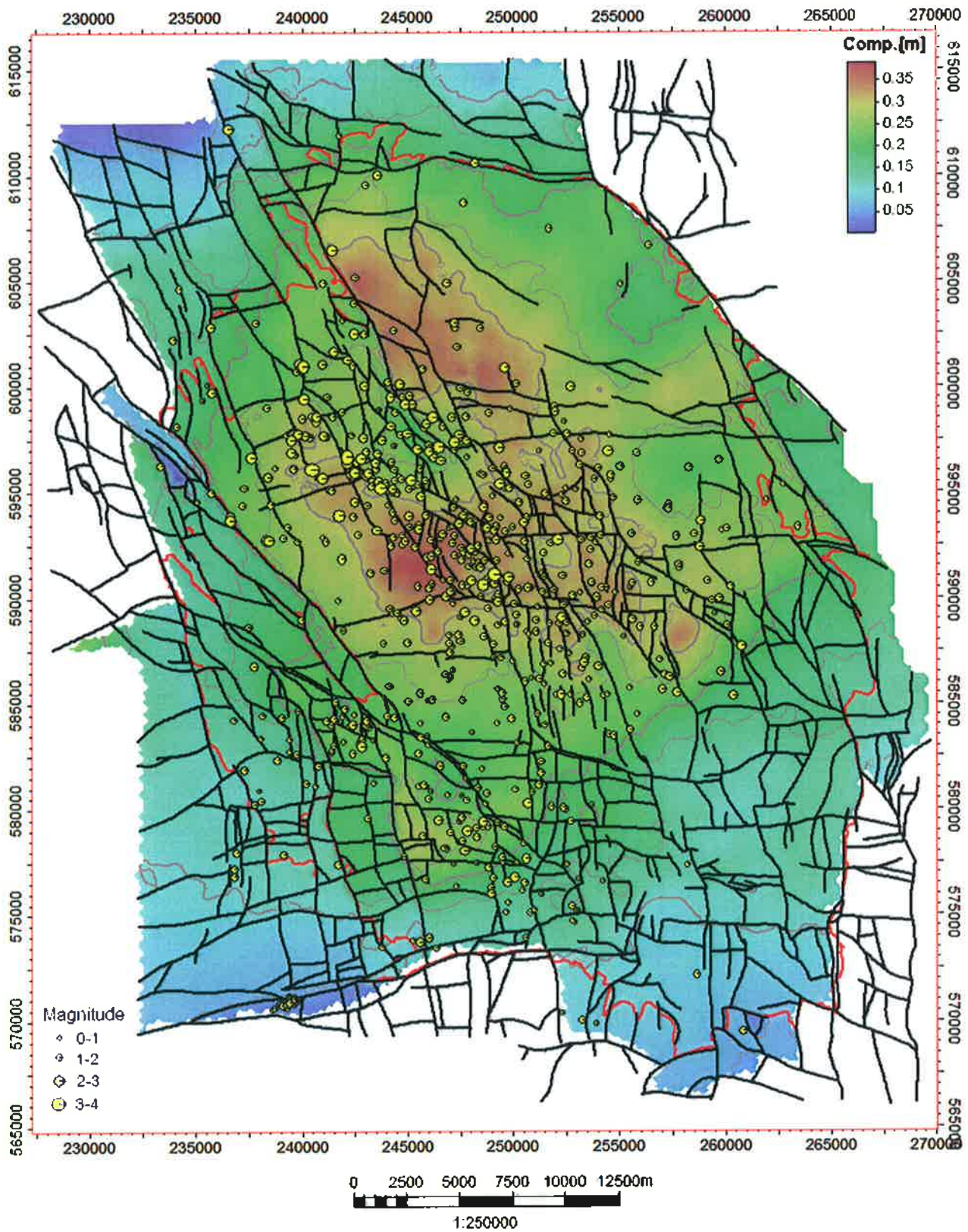


Figuur E.3.4 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2006. Seismiteit: vanaf 1991 tot 2006.



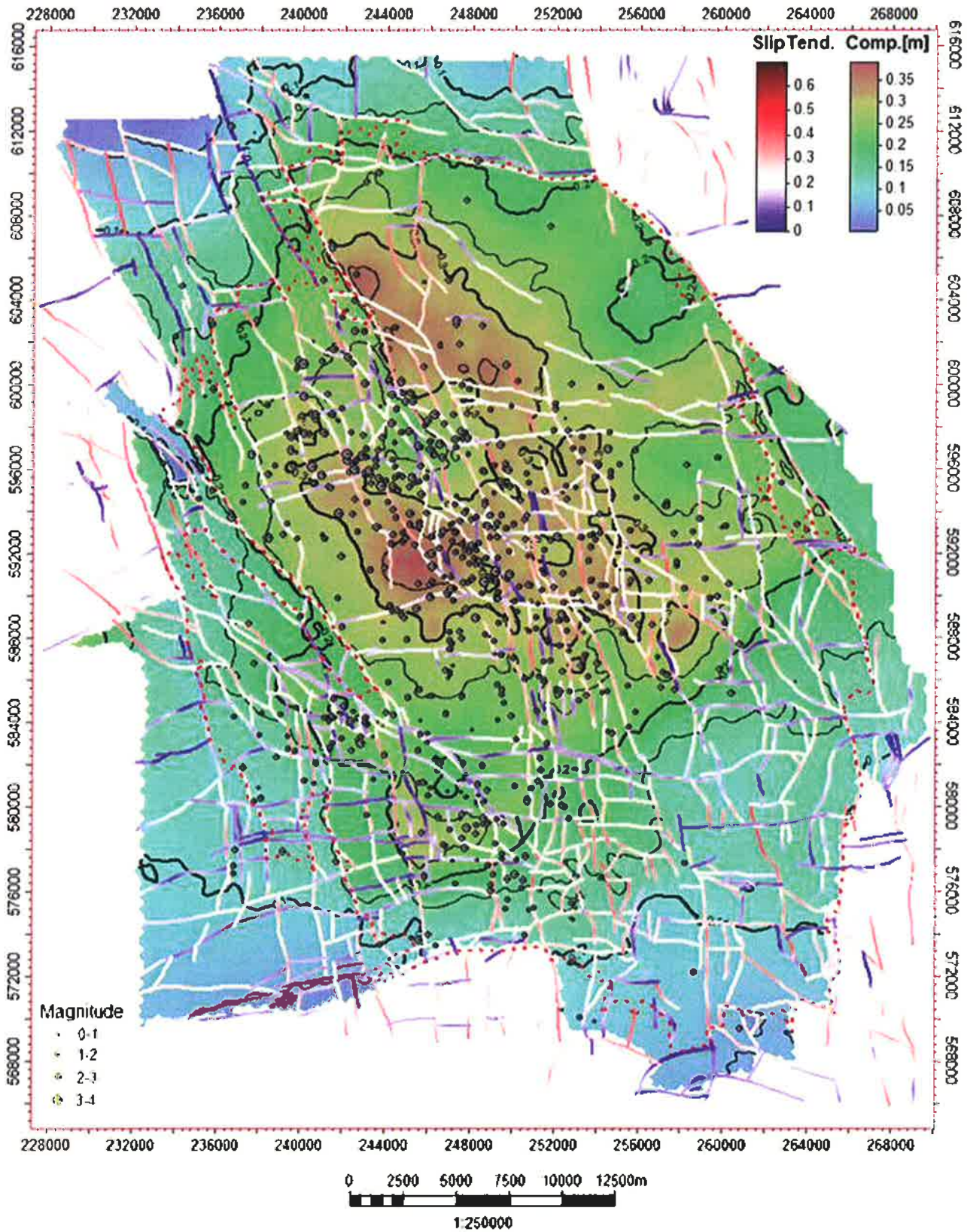
Figuur E.3.5 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiciteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2009. Seismiciteit: vanaf 1991 tot 2009.





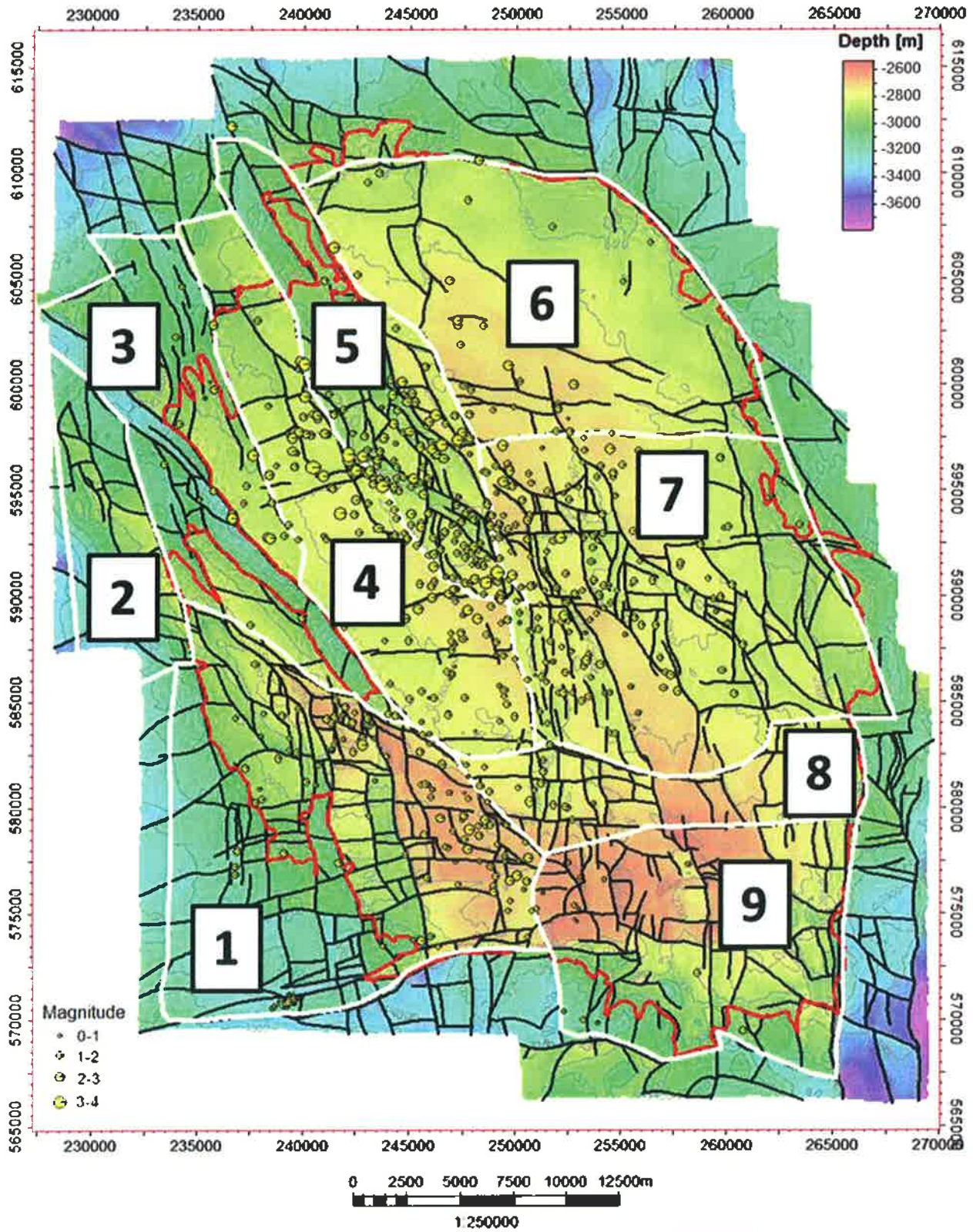
Figuur E.3.6 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2012. Seismiteit: vanaf 1991 tot 2012.

## Appendix E.4: Reactivatie potentieel van breuken op top Rotliegend niveau



Figuur E.4.1. Initiële reactivatie potentieel van de breuken op niveau top Rotliegend. De NNW-ZZO georiënteerde breuken kennen gemiddeld een hogere reactivatie potentieel dan de O-W georiënteerde breuken. In de figuur wordt tevens de locatie en magnitude van alle aardbevingen binnen de contour van het Groningen gasveld weergegeven.

Appendix E.5: Structurele regio's



Figuur E.5.1 Onderverdeling van het Groningen gasveld in negen structurele regio's ( ).



## Eindrapport TBB

Rapportage van de Technische Begeleidingscommissie Bovengrond (TBB) aan de  
Stuurgroep Onderzoeken Aardbevingen Groningen

Den Haag, 8 december 2013

Johan Blaauwendraad (emeritus hoogleraar TU Delft)  
Joost Haenen (voorzitter Technische Begeleidingscommissies)  
Jan Kamminga (voorzitter NVPM/Vastgoedbelang)  
Ilse de Vent (senior inspecteur SodM)  
HanVrijling (emeritus hoogleraar TU Delft)

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

## 1. Inleiding

In het onderstaande geeft de Technische Begeleidingscommissie Bovengrond (TBB) haar finale beoordeling met betrekking tot de onderzoeken 1 (preventieve maatregelen gebouwen), 2 (quick scan infrastructuur), 10 (waardeontwikkeling huizen) en 11 (schadeafhandeling). Het betreft een aangepaste versie van de rapportage van 8 november jl. aan de Stuurgroep Onderzoeken Aardbevingen Groningen, waarbij de recente rapportages over de vervolgactiviteiten in het kader van de onderzoeken 1 en 2 in de beoordeling zijn betrokken.

### *Vraagstelling en scope*

In opdracht van de minister van Economische Zaken (EZ) worden 11 onderzoeken<sup>1</sup> uitgevoerd naar aardbevingen die het gevolg zijn van de gaswinning in Groningen. De TBB is gevraagd een aantal van deze onderzoeken te begeleiden en reviewen. Het betreft meer specifiek de onderzoeken naar de bovengrondse effecten van die aardbevingen, te weten:

- onderzoek 1: proactief onderzoeken hoe gebouwen preventief te versterken en het uitvoeren van deze preventieve maatregelen;
- onderzoek 2: onderzoek/quick scan naar mogelijke effecten van sterkere bevingen op buisleidingen, dijken en andere mogelijke economische schade;
- onderzoek 10: onderzoek naar mogelijke waardedaling van huizen;
- onderzoek 11: bekijken hoe de onafhankelijkheid van schadebepaling en afhandeling beter kan worden verankerd.

De taak van de TBB is de onafhankelijkheid en bruikbaarheid van de resultaten van deze onderzoeken te waarborgen, toe te zien op een goede afstemming tussen de betrokken partijen en waar mogelijk tot breed gedragen visies te komen.

### *Proces*

De TBB is eind juni aan het werk gegaan en heeft in totaal acht maal vergaderd, waarvan één keer gezamenlijk met de Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO). De commissie heeft periodiek gerapporteerd aan de Stuurgroep.

Rapporten met resultaten van de vier onderzoeken zijn op 22 augustus door minister Kamp aangeboden aan de Tweede Kamer<sup>2</sup>. Voor de onderzoeken 1 en 2 zijn vervolgactiviteiten gedefinieerd, op basis van de in de onderzoeksrapporten gesignaleerde potentiële risico's en voorgestelde aanpak. De resultaten van die vervolgonderzoeken zijn rond 1 december beschikbaar gekomen.

### *Inhoudsopgave*

In paragraaf 2 beschrijft de TBB kort de opzet van de vier onderzoeken die zij heeft begeleid en gereviewd. In paragraaf 3 wordt de beoordeling van de opzet en de resultaten van de onderzoeken gegeven, met inbegrip van de vervolgactiviteiten voor de onderzoeken 1 en 2,

---

<sup>1</sup> Zie voor een beschrijving van deze onderzoeken aan Kamerbrief DGETM-EM/13021701 van 11 februari 2013.

<sup>2</sup> Tweede Kamer, vergaderjaar 2012-2013, 33 529, nr. 22.

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

voor zover de TBB daar kennis van heeft kunnen nemen. Ten slotte volgen in paragraaf 4 de conclusies en aanbevelingen van de TBB.

## 2. Bevindingen

### 2.a Onderzoek 1: preventieve maatregelen gebouwen

Onderzoek 1 wordt in opdracht van NAM uitgevoerd door ARUP. ARUP is een consultant met wereldwijde expertise op het gebied van bouwkundige ontwerpen en analyses in relatie tot aardbevingen.

Het onderzoek van ARUP bestaat uit drie onderdelen:

1. het bepalen van het seismische risico, op basis van een inventarisatie van het gebouwenbestand in het gebied waar geïnduceerde bevingen verwacht worden;
2. het bepalen van versterkingsrichtlijnen voor gebouwen;
3. het maken van een plan van aanpak voor de implementatie van die richtlijnen.

Op 30 juli jl. ontving de TBB een conceptrapport van ARUP met daarin een aanzet voor een plan van aanpak voor de preventieve gebouwenversterking. Dit rapport is op 1 augustus jl. met NAM en ARUP besproken. Het plan van aanpak is erop gericht de risico's voor schade en letsel in kaart te brengen, op basis daarvan richtlijnen voor de versterking van gebouwen op te stellen en deze ten slotte te implementeren. Het bevat een eerste, voorlopige risicoanalyse, die door ARUP als niet-representatief wordt gezien. Die analyse maakt het aannemelijk dat bij een beving van 5 op de schaal van Richter gebouwschade zal ontstaan en dat versterkingsmaatregelen nodig zullen zijn om het veiligheidsrisico te beperken. Er werden nog geen conclusies getrokken over de precieze risico's voor schade en letsel, of over (een richtlijn voor) de noodzakelijke versterking van gebouwen.

Dit rapport, met de titel "Preliminary Structural Upgrading Strategy for Groningen" is op 22 augustus aan de Tweede Kamer aangeboden (zie voetnoot 2), met ten opzichte van de conceptversie enkele aanpassingen op basis van aanbevelingen van TBB en Stuurgroep.

ARUP is daarna doorgegaan met de risicoanalyse en het maken en implementeren van het plan van aanpak. De resultaten van deze vervolgactiviteiten zijn beschreven in drie rapporten:

- "Structural Upgrading Strategy", d.d. 13 november 2013
- "Seismic Risk Study - Earthquake Scenario-Based Risk Assessment", d.d. 26 november 2013
- "Structural Upgrading Study", d.d. 28 november 2013
- "Implementation Study", d.d. 29 november 2013

ARUP heeft voor tien scenario's doorgerekend wat de risico's zijn voor gebouwen en mensen. Daarbij is ARUP uitgegaan van de resultaten (grondversnellingen, PGA) van de onderzoeken 5 en 6, waar het gaat om de seismische hazard.

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven met uitkomsten van enkele van de door ARUP doorgerekende scenario's.

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

PGA (g)	slachtoffers	schade aan gebouwen		Overschrijdingskans	
		zware schade	instorting	2013 - 2016	2013 - 2018
0,08	0	0	0	15,7%	23,6%
0,11	0	0	2	9,2%	17,4%
0,17	1	7	18	6,0%	11,0%
0,23	6	47	102	3,4%	6,6%
0,34	29	265	441	1,5%	3,2%
0,49	118	1286	1841	0,6%	1,4%

ARUP tekent hierbij aan dat deze cijfers met grote onzekerheid omgeven zijn, vooral omdat de waarden voor de grondversnelling die als input zijn gebruikt onzeker zijn.

ARUP heeft een strategie ontwikkeld voor de versterking van gebouwen. De belangrijkste elementen van deze strategie zijn:

1. Een stapsgewijze implementatie, waarbij twee pilotprojecten zorgen voor een snel leerproces.
2. Het stellen van prioriteiten op basis van het risico op slachtoffers, waarbij begonnen wordt in het gebied rond Loppersum, waar de grootste risico's bestaan.
3. Voortdurende monitoring en voortgezet onderzoek.

Deze strategie wordt uitgewerkt in een gedetailleerd implementatieplan, waarvan de TBB alleen op hoofdlijnen (in een presentatie) kennis heeft kunnen nemen. Het door NAM op 29 november gedateerde rapport hierover heeft de TBB niet tijdig kunnen inzien.

## 2.b Onderzoek 2: quick scan infrastructuur

Deltares heeft in opdracht van EZ een quick scan uitgevoerd naar de risico's van aardbevingen in het Groningenveld voor kritische onderdelen van de infrastructuur. Deltares heeft in het kader daarvan de sterkte van waterkeringen, het gastransportnetwerk en het hoogspanningsnetwerk in beeld gebracht. De resultaten van deze quick scan zijn op 24 juli jl. met de TBB besproken. Ze zijn vastgelegd in het rapport "Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen", dat op 22 augustus aan de Tweede Kamer is aangeboden (zie voetnoot 2). Deltares concludeert dat de risico's voor de infrastructuur niet in alle onderzochte gevallen voldoende klein zijn en dat nader, vaak locatie-specifiek onderzoek nodig is om de risico's nauwkeuriger vast te stellen.

Op basis van de quick scan heeft Deltares vervolgactiviteiten gestart, waarin de volgende vragen zijn beantwoord:

- Welke locaties en onderdelen van kritieke infrastructuren hebben prioriteit in relatie tot de te verwachten zwaarte van de aardbevingen in de toekomst?
- Welke maatregelen zijn voor deze onderdelen effectief in termen van functionaliteit en risicoreductie?



# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

Daarbij heeft Deltares het gastransportnet buiten beschouwing gelaten, omdat daarover door Gasunie afzonderlijk zal worden gerapporteerd. Die rapportage valt buiten de review van de TBB.

Deltares komt op basis van de uitgebreide studies tot specifieke aanbevelingen voor elk van de onderdelen van de kritische infrastructuur. Prioriteit moet volgens Deltares gelegd worden bij het versterken van de regionale waterkeringen in het centrum van het aardbevingsgebied. Voor 60% van deze regionale keringen is onduidelijk is of ze aan de norm voldoen zonder aardbevingen. Met een aardbeving voldoet 50 tot 125 km van de onderzochte kades niet aan de norm, bij de door het KNMI voorspelde aardbevingsbelasting. Meer gedetailleerde gegevensverzameling en analyses kunnen wellicht tot een vermindering van de voorgestelde maatregelen leiden.

## **2.c Onderzoek 10: waardeontwikkeling huizen**

Onderzoek 10 is uitgevoerd door Ortec Finance, in opdracht van EZ. De centrale vraag in dit onderzoek is of (het risico op) aardbevingen de waarde van woningen beïnvloedt. Het onderzoek vergelijkt de ontwikkeling van de woningprijzen in het risicogebied met andere gebieden, die in sociaaleconomisch opzicht vergelijkbaar zijn.

De conclusie van het onderzoek is dat er, tot en met het eerste kwartaal van 2013, geen relatieve waardedaling ten opzichte van de referentiegebieden is opgetreden. Dat wil zeggen: de in het risicogebied in die periode verkochte huizen zijn niet meer in waarde gedaald dan woningen in vergelijkbare gebieden buiten de zone waar aardbevingen verwacht worden.

De TBB heeft op 24 juli jl. de resultaten van dit onderzoek besproken. Dat gebeurde aan de hand van het conceptrapport “De waardeontwikkeling op de woningmarkt in aardbevingsgevoelige gebieden rond het Groningenveld”. Het rapport is vervolgens, met enkele aanpassingen, op 22 augustus door minister Kamp aan de Tweede Kamer aangeboden (zie voetnoot 2).

Ortec Finance zal ieder kwartaal over de verdere ontwikkeling van de woningprijzen in Groningen rapporteren. De TBB heeft op 24 oktober kennis genomen van de eerste voortgangsrapportage, waarin cijfers tot en met het tweede kwartaal van 2013 zijn meegenomen.

De voortgangsrapportage bevat enkele aanvullingen ten opzichte van het eerste rapport. Zo zijn de referentiegebieden verfijnd en is de analyse van alternatieve marktindicatoren uitgebreid. Ook uit deze voortgangsrapportage blijkt geen (nadelig) effect van de aardbevingen op de waardeontwikkeling van huizen.

## **2.d Onderzoek 11: schadeafhandeling**

In opdracht van EZ heeft de Technische commissie bodembeweging (Tcbb) onderzocht hoe de onafhankelijkheid van de schadeprocedure van de NAM beter verankerd kan worden. Daarnaast is de Tcbb ook gevraagd mee te kijken met het proces met betrekking tot preventieve maatregelen. De resultaten hiervan zijn vastgelegd in twee deelrapporten: “Onderzoeksopdracht 11 (dl. 1): verankeren onafhankelijkheid schadeprocedure” en

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

“Onderzoeksopdracht 11 (dl. 2): Meekijken met proces m.b.t. preventieve maatregelen” van 2 juli jl. Deze rapporten zijn op 24 juli door de TBB besproken. Op 22 augustus zijn ze aan de Tweede Kamer aangeboden (zie voetnoot 2).

De Tcbb is van mening dat de NAM het schadeafhandelingsproces het afgelopen jaar al aanzienlijk verbeterd heeft, dat dit proces nu adequaat is, en dat in het algemeen de schades op een juiste en correcte wijze afgehandeld worden. Wel geeft de Tcbb aan dat op een aantal punten ruimte is voor verdere verbeteringen en heeft zij hiervoor aanbevelingen gedaan.

## 3. Beoordeling

In deze paragraaf geeft de TBB haar oordeel over de onafhankelijkheid van de vier onderzoeken en over de kwaliteit en bruikbaarheid van de resultaten. Daarbij past enige terughoudendheid, omdat de TBB pas betrokken raakte toen de initiële onderzoeken al vrijwel waren afgerond.

### 3.a Onderzoek 1: preventieve maatregelen gebouwen

De TBB stelt vast dat ARUP in een relatief korte tijd veel werk heeft verzet: de inventarisatie van ca. 270.000 gebouwen, die in een database zijn vastgelegd; de ontwikkeling van modellen waarmee het effect van aardbevingen op verschillende typen gebouwen kan worden bepaald; het inmeten van geselecteerde gebouwen; het maken van een risico analyse; en het opstellen van een plan van aanpak voor implementatie van de noodzakelijke maatregelen.

De benadering van ARUP is zorgvuldig en gedegen. Het plan van aanpak is in de ogen van de TBB uitermate ambitieus. Ook getuigt ARUP van een onafhankelijke opstelling. Zo worden ten aanzien van de potentiële risico's ongemakkelijke scenario's niet geschuwd. Wel rees bij de TBB de vraag of de zorgvuldigheid en ambities een voortvarende aanpak van de risico's niet in de weg staan. De TBB miste in de rapportage die in augustus is gepubliceerd de urgentie, bijvoorbeeld waar het gaat om het versterken van gebouwen die ook bij de toenmalige inschatting van het KNMI al risico liepen. In het rapport onderkende ARUP die urgentie weliswaar, bijvoorbeeld waar wordt geconstateerd dat “most of the building stock in Groningen consists of unreinforced masonry (URM), which in general, without special design features, has a poor response to earthquakes”. Toch ontbrak in eerste instantie een vertaling van deze urgentie naar concrete maatregelen. Inmiddels is er in de aanpak meer oog voor het op korte termijn aanpakken van de grootste risico's en is het plan voor implementatie geconcretiseerd.

ARUP merkt op dat een uitspraak over de risico's op dit moment lastig te geven is, omdat de seismische hazard<sup>3</sup>, die als input voor het ARUP-onderzoek dient, zeer onzeker is. De

---

<sup>3</sup>In deze rapportage wordt het begrip (seismische) hazard gebruikt, waar het gaat om de kans op de overschrijding van een bepaalde bodembeweging. Als het woord risico wordt gebruikt, wordt bedoeld op die kans (hazard) maal de gevolgen (in termen van schade),

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

TBB constateert dat ook een aantal elementen in het onderzoek van ARUP zelf een grote onzekerheid kennen. Dat geldt met name voor de 'fragility curves', waarmee men een relatie tussen de bodembeweging en de resulterende schade weergeeft. Er bestaan geen 'fragility curves' die direct voor de situatie in Groningen kunnen worden gebruikt. Dat komt door de specifieke kenmerken van de gebouwen in Groningen en door het feit dat de meeste curves zijn berekend voor natuurlijke aardbevingen. Aardbevingen die geïnduceerd zijn door bijvoorbeeld gaswinning doen zich meestal minder diep voor en hebben andere kenmerken dan natuurlijke bevingen. Er is nog weinig onderzoek gedaan naar in hoeverre de effecten van dergelijke geïnduceerde bevingen verschillen van die van natuurlijke.

De conclusies die aan de risicoanalyse verbonden moeten worden zijn zeer afhankelijk van de periode waarover wordt gekeken en van de overschrijdingskans die als aanvaardbaar wordt beschouwd. Maar ook als de mediaan wordt genomen voor de grondversnelling in de komende vijf jaar, wat zeker geen conservatieve aanname is, kunnen slachtoffers niet worden uitgesloten.

Door de combinatie van vele onzekerheden is onduidelijk hoe de gepresenteerde resultaten moeten worden geïnterpreteerd. In principe is alle informatie voor besluitvorming beschikbaar, maar de presentatie is niet steeds even inzichtelijk. In het bijzonder ontbreekt een heldere weergave van het verband tussen letsels en kansen en daarmee over de eventuele ernst en omvang van de situatie. Voor de besluitvorming zou bijvoorbeeld een grafiek gemaakt dienen te worden waarin aantallen slachtoffers uitgezet staan tegen overschrijdingskansen. Dergelijke grafieken zijn ook voor andere externe risico's zoals overstromingen beschikbaar, waardoor vergelijking gemakkelijker is.

Gezien de omvang van de benodigde maatregelen kiest ARUP, gelet op de bestaande onzekerheden, voor een stapsgewijze aanpak. Eerst zullen de meest kritische gebouwen worden versterkt: de meest kwetsbare huizen en belangrijke gebouwen als ziekenhuizen. Op basis van nader onderzoek en de ervaringen die de komende jaren worden opgedaan, zal vervolgens bezien worden welke aanvullende maatregelen nodig zijn: uitbreiding van het aantal huizen dat moet worden versterkt en/of aanvullende versterking van huizen die in de eerste ronde zijn meegenomen.

De TBB realiseert zich dat de implementatie van de maatregelen die voor de komende jaren worden voorgesteld redelijkerwijs niet versneld kan worden, gelet op de omvang van het programma, dat naar verwachting duizenden huizen betreft en ook duizenden banen zal creëren. De TBB heeft niet tijdig kennis kunnen nemen van de uitwerking van de voorstellen voor implementatie. Daardoor heeft de TBB geen antwoord op de vraag of in de voorgestelde aanpak de risico's snel genoeg kunnen worden gereduceerd.

## **3.b Onderzoek 2: quick scan infrastructuur**

De TBB constateert dat Deltares in het afgelopen half jaar een omvangrijk en gedegen stuk werk heeft afgeleverd. Op basis van de belastbaarheid van verschillende onderdelen van de infrastructuur zijn de meest kritische onderdelen daarvan geïdentificeerd en zijn de feitelijke risico's in kaart gebracht, op basis waarvan een plan van aanpak en de prioriteiten

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

daarbinnen kunnen worden vastgesteld. Die benadering heeft het voordeel dat voor ieder scenario (en de daaruit volgende grondversnelling) kan worden vastgesteld welke onderdelen van de infrastructuur daar niet tegen bestand zijn.

De belangrijkste voorgestelde maatregelen betreffen de dijken (kaden) van binnenwateren, waar het – anders dan bij zeedijken – eerder regel dan uitzondering is dat het water hoog staat ten opzichte van de kruin van de dijk.

De TBB constateert dat het gastransportnet nog wel onderdeel uitmaakte van de quick scan, waarover Deltares in augustus heeft gerapporteerd, maar dat dit in de vervolgactiviteiten buiten beschouwing is gelaten. Deltares merkt daarover op dat Gasunie, de netbeheerder, inmiddels de verantwoordelijkheid heeft genomen voor het opstellen en implementeren van een plan van aanpak voor het waar nodig versterken van haar net.

De TBB constateert dat haar aanbevelingen naar aanleiding van het conceptrapport “Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen” door Deltares zijn opgepakt.

Ook bij het onderzoek van Deltares zijn relevante gegevens en referenties in bepaalde gevallen schaars. Zo geldt – net als voor het ARUP onderzoek – dat de beschikbare gegevens vrijwel uitsluitend gebaseerd zijn op natuurlijke aardbevingen en dat nog niet duidelijk is in hoeverre deze ook bruikbaar zijn voor geïnduceerde bevingen. Gegevens over onderdelen van de infrastructuur en over de samenstelling van de grond (tot 30 meter diep) waarop deze zich bevinden zijn ook niet altijd beschikbaar. Als gevolg daarvan – en van de onder 3.a al genoemde onzekerheid ten aanzien van de seismische hazard – kenmerkt ook de risicoanalyse van Deltares zich door een grote mate van onzekerheid.

### **3.c Onderzoek 10: waardeontwikkeling huizen**

Het rapport van Ortec Finance, dat in augustus aan de Tweede Kamer is gezonden, is helder opgezet en geschreven. Het maakt goed inzichtelijk op welke wijze men tot de eenduidige conclusies is gekomen. De TBB vindt dat dit objectief is gebeurd.

De aanbevelingen van de TBB bij de conceptrapportage waren er vooral op gericht de presentatie verder te verbeteren, daarmee anticiperend op vragen die van bestuurders en bewoners verwacht mogen worden. Voor een deel zijn deze aanbevelingen al meegenomen in het genoemde rapport. Zo heeft Ortec Finance in de figuren duidelijker het moment van optreden van diverse bevingen aangegeven.

Andere aanbevelingen konden niet in het eerste rapport worden verwerkt, zoals een uitsplitsing en verfijning van de referentiegebieden. De TBB heeft geconstateerd dat Ortec Finance de suggesties van de TBB in de eerste voortgangsrapportage wel heeft verwerkt.

### **3.d Onderzoek 11: schadeafhandeling**

Ten aanzien van onderzoek 11, dat in de handen is van de Technische commissie bodembeweging (Tcbb), heeft de TBB geconstateerd dat daarbij van voldoende onafhankelijkheid en goede afstemming tussen partijen sprake was.

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

## 4. Conclusies en aanbevelingen

De TBB concludeert dat er bij alle vier de onderzoeken sprake is van een onafhankelijke en gedegen aanpak. Bij de onderzoeken 10 en 11 heeft dat eerder al geresulteerd in heldere resultaten, die een (voorlopig) antwoord geven op de door de minister gestelde vragen. Voor de onderzoeken 1 en 2 geldt dat er door ARUP en Deltares ontzettend veel werk is verzet, dat de noodzakelijke informatie heeft opgeleverd over de kwetsbaarheid van gebouwen en kritische infrastructuur bij (zwaardere) aardbevingen. Voor de infrastructuur heeft de TBB een duidelijk beeld van de risico's in de komende jaren en van de maatregelen die met het oog daarop genomen moeten worden. Voor de gebouwen is het beeld minder duidelijk: vooral de koppeling tussen overschrijdingskansen op bepaalde magnitudes van aardbevingen en daaruit voortvloeiende risico's voor gebouwen en mensen ontbreekt. Gezien de grote onzekerheden die er zowel ten aanzien van de seismische hazard (de input voor onderzoeken 1 en 2) als voor de bovengrondse effecten van bevingen voorlopig zullen blijven bestaan, is het voor het afwegen van alle risico's en belangen essentieel te weten hoe groot de risico's zijn - ook in vergelijking met bv. overstromingsrisico's - en of er gelet op de risico's voldoende tijd is om die onzekerheden te reduceren. Gelet op de geconstateerde risico's moet voortvarend worden begonnen met de implementatie van de noodzakelijke preventieve maatregelen, waarbij gebouwen en onderdelen van de infrastructuur die niet bestand zijn tegen voor de komende drie jaar mogelijk geachte groundbewegingen bij voorrang moeten worden versterkt.

De TBB sluit dit eindrapport af met enkele aanbevelingen.

### 4.a Algemeen

- De in dit advies beoordeelde onderzoeken zijn, met uitzondering van onderzoek 11, zeer technisch van aard. Maar ze betreffen de gevolgen van de aardbevingen voor de mensen in het aardbevingsgebied, voor hun veiligheid en voor de waarde van hun huizen. Dat zijn emotioneel zwaar beladen onderwerpen, waarvoor de zakelijke rapportages over de onderzoeken niet snel geaccepteerd zullen worden of tot andere percepties zullen leiden. Daarom moeten de uitkomsten van deze onderzoeken zorgvuldig en op begrijpelijke wijze worden gecommuniceerd en in de regio zelf worden toegelicht, zeker gezien de onzekerheden waarmee de resultaten zijn omgeven.

### 4.b Onderzoek 1: preventieve maatregelen gebouwen

- Het onderzoek van ARUP is complex en zeer technisch van aard. Een publieksvriendelijke, Nederlandstalige samenvatting van het onderzoek is essentieel, gezien de voorgaande aanbeveling. Daarin dienen de resultaten van de risicoanalyse en het plan van aanpak zonder al te technisch jargon in de juiste context te worden geplaatst.
- Het zou, voor een afgewogen oordeel door de minister over maatschappelijke aanvaardbaarheid, goed zijn de risico's van aardbevingen door gaswinning in Groningen te vergelijken met risico's van andere externe risico's zoals

# Technische Begeleidingscommissie Bovengrond

overstromingen. De TBB raadt aan om de resultaten van ARUP en die van de onderzoeken 5 en 6 te combineren in een grafiek waarin aantallen slachtoffers en ingestorte huizen staan uitgezet tegen overschrijdingskansen.

- De TBB vindt het noodzakelijk om de coördinatie van de uitvoering van het plan van aanpak (met inbegrip van de lopende afhandeling van schadegevallen) bij één grote aannemer aan te besteden. Dit sluit aan bij een aanbeveling van de Tcbb voor verbetering van het proces van schadeafhandeling, dat ook in de ogen van NAM nog niet optimaal verloopt. De schaal waarop straks huizen versterkt zullen gaan worden is zeer groot. Een professioneel management van dat proces lijkt de TBB van groot belang met het oog op efficiëntie en uniforme kwaliteit.

## 4.c Onderzoek 2: quick scan infrastructuur

- De TBB beveelt aan dat er op basis van de resultaten van Deltares (en van eigen onderzoeken van de netbeheerders TenneT, Gasunie en Enexis en van de Samenwerkende Bedrijven in de Eemsdelta) een plan van aanpak wordt vastgesteld. Daarin moet niet alleen een planning van de vervolgvactiteiten, inclusief nader onderzoek en gegevensverzameling, worden beschreven, maar vooral ook worden vastgelegd wie voor de uitvoering van de verschillende onderdelen verantwoordelijk is en hoe de monitoring wordt georganiseerd. Gezien de vele betrokken partijen en voor sommige vervolgvactiteiten gedeelde verantwoordelijkheden is duidelijkheid op dit punt van belang.



## Notitie

Onderwerp: Beschouwing NAM risico benadering aardbevingen Groningen  
Auteur: Chris Pietersen, Safety Solutions Consultants  
Datum: 6 januari 2014

Op verzoek van SodM wordt in deze notitie een beschouwing gegeven over de volgende notitie:

*'Risicobenadering seismisch Risico Groningen'. NAM, December 2013, Bijlage 2 van een meer omvattend rapport.*

Het document is beschouwd met betrekking tot algemene karakteristieken van risico zoals die worden beschreven, ook in vergelijking met risico's in andere domeinen. Het seismisch risico is gebaseerd op berekeningen door ARUP. Er is niet getoetst of deze in alle opzichten juist zijn geïnterpreteerd.

## Algemeen

De risicobenadering van NAM benoemt de aspecten van risico en het normeringskader. Dat is gebaseerd op het ALARP principe zoals dat in de UK wordt gehanteerd en de interne Risico Assessment Matrix (RAM).

Bij ALARP wordt de kans op overlijden van een persoon gehanteerd als maatstaf. In dat kader vormt een risico van  $10^{-4}$  (publiek) en  $10^{-3}$  (werknemers) de bovengrens van het ALARP gebied en  $10^{-6}$  de ondergrens. In dit gebied worden de kosten en de baten van risico's afgewogen en wordt verwezen naar methoden als DALY (Helsloot).

ALARP wordt uitsluitend 'toegepast' op fase 1 (van de 3 fasen, figuur 3). Die fase kan gebruikt worden om preventieve, mitigerende maatregelen te nemen om de schade te beperken in de volgende fasen. Waarbij in fase 3 het risico al weer afneemt.

De NAM diskwalificeert productiebepurende maatregelen op basis van ALARP. Het wordt 'onderbouwd' met het 3 fasen plan. Dat is echter gedeeltelijk wishful thinking.

In fase 1 is het risico nog ALARP, tussen  $10^{-5}$  en  $10^{-6}$  volgens de berekening in de appendix van het NAM rapport. Echter, daar wordt gesproken over een PR maar dat is onjuist. Het is ook geen IR, of kans op overlijden van een persoon. De vergelijking met de ALARP normen en de BEVI norm is op deze wijze dus niet mogelijk.

## RAM

NAM heeft de Risico matrix gebruikt om de aardbevingen in Huizinge en Zandweer in te schalen. Om het risico van toekomstige bevingen in te schatten is dit echter niet bruikbaar. Nu is uiteraard het risico voor letsel bij mensen laag (A3) omdat het nog niet gebeurd is. Mogelijk is hier verwarring opgetreden met een ander gebruik van de RAM: het prioriteren van onderzoek na een incident.

NAM beleid is om voor het gele of rode gebied (nu alleen voor Reputatie en Assets) een Bow-tie op te zetten met mogelijk risico reducerende maatregelen. Productie vermindering is niet genoemd als mogelijke barrière (is eerder op basis van studies niet zinvol genoemd). Er wordt met name verwezen naar deelonderzoeken van de NAM voor twee mogelijke, andere preventieve maatregelen.

NB: De Bowtie geldt formeel dus niet omdat het risico voor personen volgens NAM niet in het gele of rode gebied ligt.

### *RAM matrix voor SIL bepaling*

Deze methode wordt ook door NAM gebruikt in het kader van het bepalen van de noodzakelijke risicoreductie factor (op basis van een Safety Integrity Level- SIL) van het risico van scenario's voor mensen met het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Het SIL concept wordt in de NAM rapportage alleen genoemd in een voetnoot en niet van toepassing verklaard op aardbevingen. Voorbeelden van toepassing voor aardbevingen ken ik niet maar dat betekent niet dat de methode daarvoor niet bruikbaar is. Bovendien weerspiegelt de SIL matrix de interne risico acceptatie van de NAM.

Deze SIL matrix wordt gehanteerd door Shell/ NAM (Shell DEP 32.80.10.10) en is opgenomen in de bijlage van deze notitie.

Een gebruik voor de aardbevingen Groningen:

**Frequentie** ('demand rate'): 1x in de 10-100 jaar of 1x in de 1-10 jaar

**Gevolgen** ('severity') is 3 : Major injury.

**Resultaat:** het risico is in alle gevallen ontoelaatbaar hoog: SIL 2 of SIL 3.

SIL 3 betekent dat het risico gereduceerd dient te worden met een factor 1000- 10000!. Voor SIL 2 is dat een factor 100-1000.

Een in alle opzichten hoog risico dus.

### *Overig*

Onderaan pagina 14 wordt gesteld dat voor het Besluit Externe veiligheid Transport (BEVT, concept)) geen beschouwing van het GR nodig is voor bestaande situaties. Die opmerking is misleidend omdat voor het Basisnet transport al beschouwingen van het GR hebben plaatsgevonden. In die zin klopt het wel dat alleen voor nieuwe situaties het GR beschouwd moet worden. De suggestie dat het GR op deze basis ook niet van toepassing zou zijn op de 'bestaande' situatie rond de aardbevingen is dus onjuist. Het is van belang dat het GR wel degelijk wordt beschouwd.

### **Conclusie**

In de NAM rapportage worden niet de juiste definities van IR/ PR gehanteerd. Daardoor is een vergelijking met de bestaande PR norm niet mogelijk. De GR 'oriënterende waarde' norm wordt niet gehanteerd. Gesteld wordt dat dit voor aardbevingen niet of nog niet mogelijk is. Zoals gesteld is de basis voor die bewering echter niet sterk. Een zo goed mogelijke inschatting van het GR is echter van belang en maakt vergelijken met risico's in andere sectoren mogelijk.



**Table 1 SIL decision matrix for personal safety risks**

Inverse Virtual Demand rate (years per demand) on IPF	Health/Safety (Requisite SILs)						Notes for demand rate selection
		SIL1 ☉	SIL 2 ☉	SIL 3 ☉	SIL 4 ☉	X	
<1	-	SIL1 ☉	SIL 2 ☉	SIL 3 ☉	SIL 4 ☉	X	Continuous mode
1-10	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3 ☉	SIL 4	SIL 4	Difficult/complex controls, happens between shutdowns Unspared machinery (pumps, compressors)
10-100	-	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 3	Control loop failure with operator intervention as a safeguard Spared machinery (pumps, compressors)
100-1000	-	-	-	SIL 1	SIL 2	SIL 2	Single effective barrier (omit IPF or operator intervention in the count)
>1000	-	-	-	-	SIL 1	SIL 1	Two or more effective barriers present (omit IPF or operator intervention in the count)
Personnel Safety	No injury or health effect	Slight injury or health effect	Minor injury or health effect	Major injury or health effect	PDT or 1-3 casualties	> 3 casualties	All independent layers of protection, conditional modifiers, exposure, possibilities for aversion etc. will need to be separately considered, documented and taken into account in LOPA for severity 3 and higher.
Severity (Numeric)	0	1	2	3	4	5	

# Risico Analyse Aardgasbevingen Groningen



Staatstoezicht op de Mijnen  
Ministerie van Economische Zaken

## SAMENVATTING

---

Deze notitie bevat de kwantificering van het aardbevingsrisico op basis van de resultaten van de onderzoeken 1, 5 en 6, welke in opdracht van de Minister van Economische Zaken zijn uitgevoerd. Hiermee wordt voor de periode 2013-2016 een indicatie van het aardbevingsrisico bij ongewijzigde productie ("market demand" scenario) verkregen voor een "karakteristieke beving" op de locatie Huizinge. Het risico is onvolledig omdat 1) er alleen rekening is gehouden met schade aan gebouwen en letsel ten gevolge van schade aan gebouwen, 2) er in onderzoek 1 geen scenario's zijn doorgerekend voor grondversnellingen groter dan 0,49g terwijl deze wel kunnen optreden, 3) de cumulatieve invloed van alle bevingen in een jaar op verschillende locaties niet is meegenomen in de berekening, 4) er een mogelijkheid is dat een aardbeving met een lagere overschrijdingskans plaatsvindt nabij een dichtbevolkt gebied waarbij meer slachtoffers vallen, 5) de overschrijdingskansen voor grondversnellingen boven de 1g niet bepaald zijn en het risico ten gevolge van een beving met deze grondversnelling niet meegenomen kan worden in de analyse.

Het aardbevingsrisico voor de "karakteristieke beving" op de locatie Huizinge is in de context van het nationale veiligheidsbeleid en internationale veiligheidsbeleid ten aanzien van natuurlijke aardbevingen geplaatst. Bestaand nationaal extern veiligheidsbeleid voor industrie en buisleidingen gaat uit van een wettelijk vastgelegd (BEVI en BEVB) acceptatie criterium voor Plaatsgebonden Risico (PR), alsmede een door de overheid te verantwoorden richtwaarde voor Groepsrisico (GR). Landelijk worden ook andere externe veiligheidsrisico's tegen het PR en GR of vergelijkbare begrippen getoetst, zoals luchthavenveiligheid en overstromingsrisico's. Internationaal bestaat er een breed geaccepteerde richtwaarde voor acceptatie van bescherming tegen aardbevingen.

Het risico op grotere aantallen slachtoffers, het GR, in het gebied beïnvloed door de Huizinge beving is vergelijkbaar met het landelijk groepsrisico bij overstromingen. In vergelijking met de groepsrisico's in de andere externe veiligheidssectoren en Schiphol is het seismisch risico hoog.

Voor aardbevingsrisico geldt dat het risico van overlijden direct gerelateerd is aan het instorten van gebouwen. Om het risico van overlijden van een individu te kunnen kwantificeren wordt voor aardbevingsrisico in plaats van het PR het Lokaal Persoonlijk Risico (LPR) gedefinieerd als: "*de kans op overlijden voor een fictief persoon die zich permanent in of nabij een gebouw van een bepaalde kwetsbaarheidsklasse bevindt*".

Voor 90% van de huizen binnen een straal van 15 km van de Huizinge beving geldt dat het LPR ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen tussen de  $10^{-5}$  en  $10^{-4}$  per jaar ligt. Het hoogste LPR in dit gebied, van  $6,9 \times 10^{-5}$  per jaar, geldt voor een persoon in een huis uit de klasse "niet versterkte bakstenen huizen van vóór 1920". De risico's die bewoners in deze huizen ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen lopen zijn hoger dan de bouwcodenormen welke internationaal voor natuurlijke aardbevingen en nationaal voor andere (vergelijkbare) risico's ten gevolge van belastingen op huizen worden aangehouden.

Geconcludeerd wordt dat het seismisch risico voor door gaswinning geïnduceerde aardbevingen met een epicentrum in het gebied tussen Huizinge, Zandeweer en Hoeksmeer in vergelijking met andere risico's in de samenleving hoog is.

## 1 INTRODUCTIE

---

In januari 2013 is het Staatstoezicht op de Mijnen gekomen met een analyse van de aardgasbevingen (seismiciteit) in het Groningen gasveld [1]. Hierin werd geconcludeerd dat er voor het Groningen gasveld geen maximale magnitude uit de seismische data kan worden afgeleid. De tot dan toe gehanteerde "maximale magnitude" van 3,9 (in werkelijkheid de magnitude met een overschrijdingskans van 15% voor de gehele levensduur van het veld) moest dan ook worden verlaten, zonder dat een nieuw maximum kon worden bepaald. Het afgelopen jaar zijn er in opdracht van de Minister van Economische Zaken [2] 11 onderzoeken uitgevoerd om onder andere het aardbevingsrisico (seismisch risico), mogelijke mitigerende maatregelen en de gevolgen van deze maatregelen beter in kaart te krijgen. Onderdelen van de seismisch risico analyse zijn in verschillende studies uitgewerkt (onderzoeken 1, 5 en 6). De integratie van deze onderdelen zou in het winningsplan moeten worden gemaakt.

In deze notitie wordt op basis van de resultaten uit de onderzoeken 1, 5 en 6 het aardbevingsrisico boven het Groningen gasveld gekwantificeerd. Het gaat om een indicatie van het risico. Het is op basis van de rapporten niet mogelijk een volledige risico analyse uit te voeren. Tevens is alleen rekening gehouden met schade aan gebouwen en mogelijk letsel ten gevolge van schade aan gebouwen. Risico's ten gevolge van onder andere verzwakking van waterkeringen, schade aan infrastructuur, etc. zijn niet meegenomen in de achterliggende onderzoeken en derhalve ook niet in deze analyse. Tenslotte wordt het aardbevingsrisico in de context van het nationale veiligheidsbeleid en internationale veiligheidsbeleid ten aanzien van natuurlijke aardbevingen geplaatst.

## 2 AARDBEVINGSRISICO GRONINGEN

---

Het aardbevingsrisico (seismisch risico) voor gebouwen in een gebied wordt bepaald door de interactie tussen:

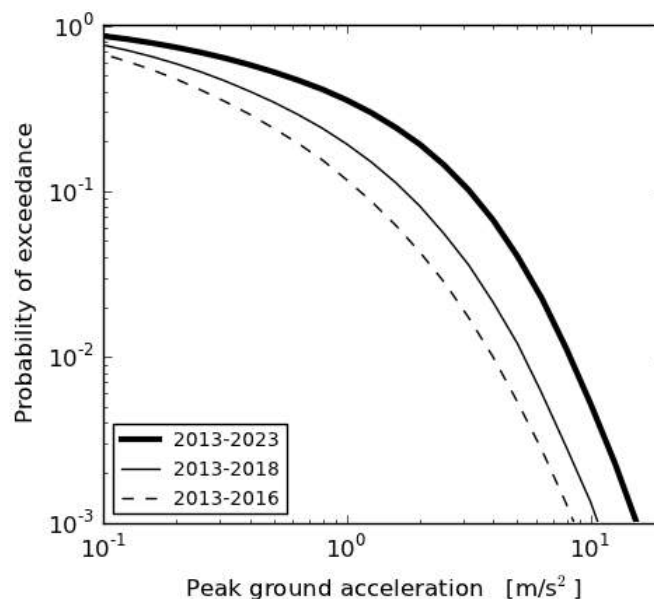
1. Seismisch hazard,
2. De gebouwen welke aan het hazard worden blootgesteld (exposure),
3. De kwetsbaarheid van de gebouwen (vulnerability).

Hieronder worden de verschillende onderdelen en de resultaten daarvoor uit de verschillende studies kort toegelicht. Vervolgens wordt het aardbevingsrisico voor het gebied boven het Groningen gasveld bepaald.

### 2.1 SEISMISCH HAZARD

In onderzoek 5 [3] is uitgebreid onderzoek gedaan naar de mogelijke maximale magnitude welke in het Groningen gasveld zou kunnen voorkomen. Uit deze studie is vast komen te staan dat het mogelijk is om een fysisch maximum te bepalen, maar geen meest waarschijnlijk maximum. De studie geeft samen met onderzoek 6 [4] tevens een probabilistische seismisch hazard berekening. In deze hazard analyse worden de onzekerheden in de verschillende parameters op een Monte Carlo manier meegenomen [3,4]. Het resultaat van deze berekening is een overschrijdingskansverdeling voor de maximale grondversnelling [Figuur 1] in het gebied. Daarnaast worden voor verschillende overschrijdingskansen kaarten gemaakt met de ruimtelijke verdeling van de grondversnellingen (een

voorbeeld is gegeven in Appendix A). De maximale grondversnelling kan de komende jaren slechts voorkomen in een beperkt gebied boven het Groningen gasveld. In onderzoeken 5 en 6 [3,4] is alleen een berekening gemaakt voor grondversnellingen, aangezien deze voor bevingen met magnitudes tot 4,5-5,5) de mate van schade aan gebouwen bepalen.



*Figuur 1: De overschrijdingskansverdeling voor de maximale grondversnelling (peak ground acceleration) boven het Groningen gasveld voor drie verschillende tijdsintervallen: 3, 5 en 10 jaar. (figuur 4.4 [4]). Voor de bepaling van deze kansverdeling is uitgegaan van het "market demand" productie scenario [4] en het time-decay compatie model met een tijdconstante van 7 jaar [4].*

## 2.2 BLOOTSTELLING (EXPOSURE)

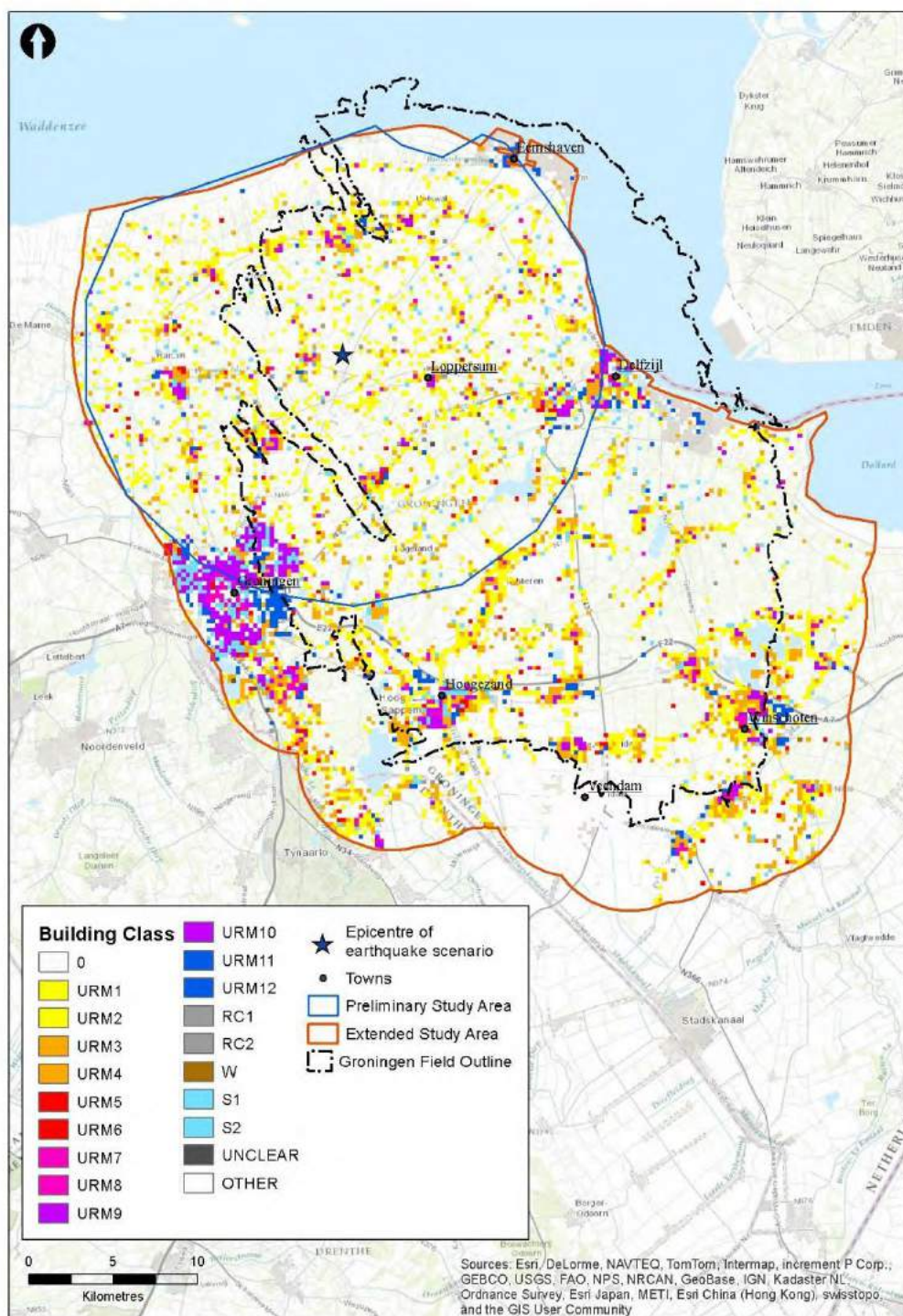
Om de gebouwen, welke aan het hazard worden blootgesteld, in kaart te brengen heeft de firma ARUP in opdracht van NAM [5,6] een uitgebreide database van gebouwen samengesteld. De database bestaat uit twee delen: 1) een gedetailleerde inventarisatie van alle gebouwen binnen een straal van 15 km ten opzichte van de Huizinge beving, 2) een uitbreiding van deze inventarisatie met alle gebouwen binnen een straal van 5 km buiten de rand van het Groningen gasveld. Elk gebouw in de dataset is op basis van zijn kenmerken ingedeeld in een van 19 gebouwtypen. In Figuur 2 is de ruimtelijke verdeling van de verschillende typen gebouwen in de twee datasets weergegeven. Het grootste deel van de gebouwen (90% van de beperkte database en 77% van de uitgebreide database) bestaat uit niet-versterkte bakstenen huizen. Een overzicht van de database is gegeven in Appendix B.

## 2.3 KWETSBAARHEID VAN GEBOUWEN (VULNERABILITY)

De kwetsbaarheid van een gebouw wordt gedefinieerd als de mate van schade aan een gebouw ten gevolge van een specifieke mate van hazard [5,6]. De mate van schade wordt vaak uitgedrukt in een empirische kwetsbaarheidsfunctie. Hierin wordt de kans op een bepaalde mate van schade uitgezet tegen de hazard. In het geval van een seismisch risico berekening wordt voor het hazard de grondversnelling (pga) gebruikt.

Verschillende typen gebouwen blijken even kwetsbaar voor grondversnellingen te zijn. Dit resulteert in de groepering van de verschillende gebouwtypen. Bijvoorbeeld: de 12 typen voor niet versterkte bakstenen huizen kunnen op basis van hun bouwjaar worden gegroepeerd in 3

kwetsbaarheidsgroepen: huizen van voor 1920, huizen gebouwd tussen 1920 en 1960 en huizen gebouwd na 1960. De kwetsbaarheidsfuncties voor deze 3 groepen wordt gegeven in Appendix B.



Figuur 2: Ruimtelijke verdeling van de verschillende typen huizen in de studie gebieden van ARUP (figuur A.3 [6]). De 12 verschillende niet-versterkte bakstenen huizen (URM) kunnen op basis van bouwperiode worden onderverdeeld in 3 kwetsbaarheidsgroepen: gebouwd voor 1920, gebouwd tussen 1920 en 1960 en gebouwd na 1960. 90% van de bebouwing binnen een straal van 15 km van het epicentrum van de Huizinge beving en 77% van de bebouwing in het gebied tot 5 km van de rand van het Groningen gasveld vallen binnen deze URM categorie. Deze categorie huizen is het meest gevoelig voor schade ten gevolge van aardbevingen.

## 2.4 SEISMISCH RISICO ANALYSE

Door ARUP [5] is in het kader van onderzoek 1 naar preventieve maatregelen een deterministische seismisch risico analyse uitgevoerd. Een gedetailleerde beschrijving van deze seismisch risico analyse wordt in een aparte achterliggende rapportage beschreven [6]. Een deterministische aanpak geeft voor een “karakteristieke beving” de gevolgen in termen van schade en letsel/dodelijke slachtoffers. Deze aanpak wordt internationaal met name gebruikt om risicomanagementplannen mee te ontwerpen en om te zorgen voor adequate hulpverlening. Het geeft echter geen volledig beeld van het aardbevingsrisico in een gebied. Een volledig beeld kan worden verkregen met behulp van een probabilistische aanpak, waarbij de onzekerheid in de locatie van een beving, de grondversnelling en de kwetsbaarheid van de gebouwen expliciet wordt meegenomen. Deze probabilistische aanpak, zoals wel gebruikt voor de bepaling van de overschrijdingskansen van de grondversnellingen, is op dit moment voor de bepaling van het aardbevingsrisico voor Groningen niet beschikbaar.

ARUP heeft de risico analyse uitgevoerd voor 4 verschillende sterkten van bevingen:  $M=3,6$  (vergelijkbaar met de Huizinge beving),  $M=4,0$ ,  $M=4,5$  en  $M=5$ . De analyse van ARUP gaat uit van een “karakteristieke aardbeving” op dezelfde locatie als de Huizinge beving van augustus 2012 [5,6]. Het berekende schade- en letselbeeld is dan ook specifiek voor de “karakteristieke beving” op deze locatie. In de hier volgende analyse wordt op basis van de verschillende deterministische scenario's voor een “karakteristieke beving” op de locatie Huizinge het seismisch risico gekwantificeerd.

### 2.4.1 Schade- en letselanalyse ARUP [4,5]

Zoals hierboven aangegeven heeft ARUP een analyse uitgevoerd voor 4 verschillende sterkten (magnitudes) van bevingen. Met behulp van een vergelijking tussen magnitude en grondversnelling (de Ground Motion Prediction Equation) [GMPE] bepaalt ARUP voor de verschillende magnitudes de grondversnellingen ( $pga$ ). Op basis van deze grondversnellingen, het aantal gebouwen en inwoners in het gebied en de kwetsbaarheid van de gebouwen, worden de schades die bij de verschillende magnitudes kunnen ontstaan en het aantal individuen dat gewond kan raken of kan komen te overlijden, bepaald.

ARUP doet deze analyse zowel voor de mediaan ( $P50$ ) van de GMPE, het gemiddelde van de GMPE (mean), als de mediaan van de GMPE vermeerderd met 1 standaard deviatie ( $P84$ ).

In de meer gedetailleerde rapportage van ARUP [5] worden ruimtelijke figuren gegeven voor de grondversnellingen behorende bij de verschillende scenario's. Een voorbeeld is gegeven in Appendix C. Het schade- en letselbeeld bij elk scenario wordt bepaald op basis van deze ruimtelijke distributie. Er is dus maar een beperkt aantal huizen dat aan de maximale grondversnelling wordt blootgesteld (zie ook tabel C1 in Appendix C). De maximale grondversnelling behorend bij elk van de scenario's heeft ARUP later ter beschikking gesteld (persoonlijke communicatie met NAM/ARUP). In Tabel 1 worden kenmerken van de verschillende door ARUP doorgerekende, deterministische scenario's en de daarbij behorende maximale grondversnellingen gegeven.

### 2.4.2 Kwantificering van het seismisch risico

Voor het kwantificeren van het seismisch risico moet het schade- en letselbeeld behorende bij de verschillende deterministische scenario's (onderzoek 1) worden gekoppeld aan de overschrijdingskansen van de bij de scenario's horende maximale grondversnellingen (onderzoeken 5 en 6). Hieruit volgt de overschrijdingskans voor het optreden van een bepaald type schade of een bepaald aantal dodelijke slachtoffers in een specifieke tijdsperiode. In deze notitie wordt hiervoor de periode van 3 jaar tussen 2013 en 2016 aangehouden. Dit geeft een goed beeld van het huidige risiconiveau. Daarnaast is het vanwege de op langere termijn sterk toenemende onzekerheden in de resultaten van de verschillende achterliggende studies niet verantwoord om verder vooruit te kijken.

Tabel 1: Maximale grondversnellingen ( $pga_{max}$ ) behorende bij de verschillende deterministische ARUP scenario's. Daarnaast wordt de overschrijdingskans (PoE) voor de periode 2013-2016 (bepaald uit Figuur 1) behorende bij de maximale  $pga$  waarden gegeven. Tenslotte wordt het aantal dodelijke slachtoffers (N) overdag en 's nachts volgende uit de analyse van ARUP gegeven. De GMPE is log-normaal verdeeld. De P50 geeft de mediaan voor de GMPE, de P84 de mediaan + 1 standaard deviatie en de mean het gemiddelde voor de GMPE relatie tussen  $pga$  en magnitude (M).

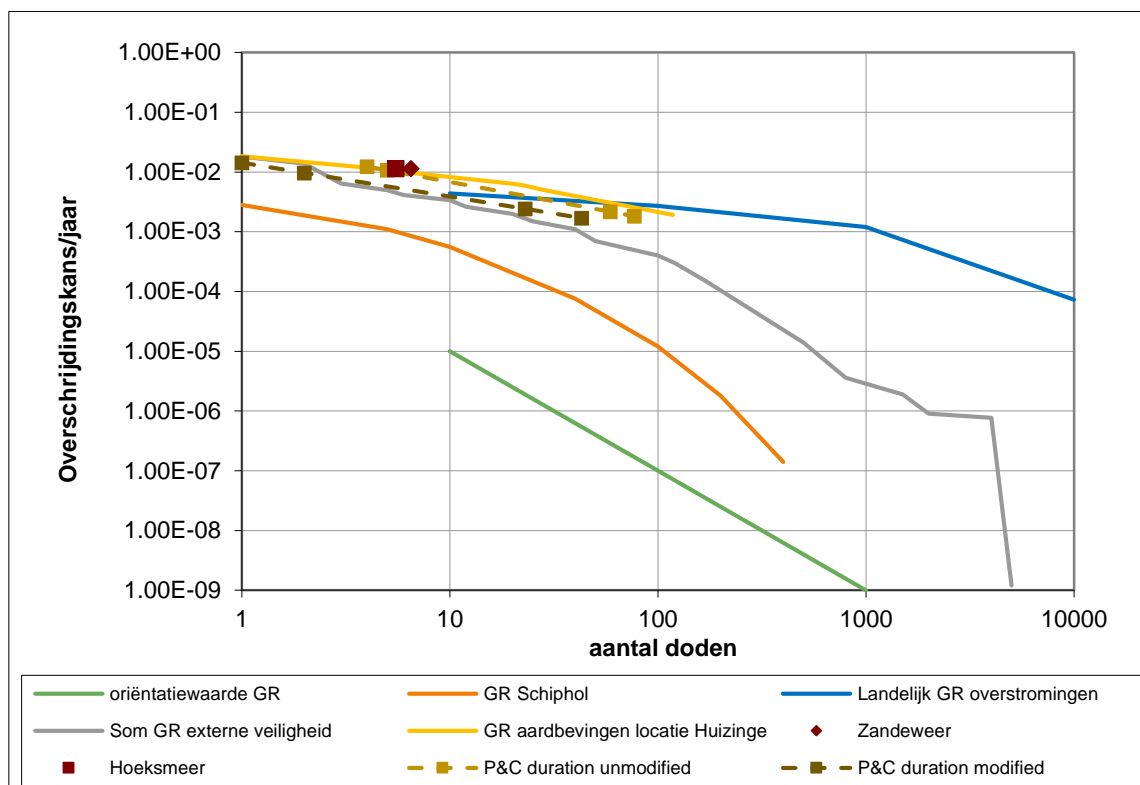
M	GMPE	$pga_{max}$ (g)	$PoE_{max}$	N dag	N nacht	locatie	fragility curve
3,6	P50	0,08	$1,50 \times 10^{-1}$	0	0	Huizinge	ARUP
3,6	P84	0,17	$5,52 \times 10^{-2}$	1	0,9	Huizinge	ARUP
4	P50	0,11	$1,05 \times 10^{-1}$	0	0	Huizinge	ARUP
4	P84	0,24	$3,10 \times 10^{-2}$	5	4	Huizinge	ARUP
4,5	P50	0,17	$5,52 \times 10^{-2}$	1	1	Huizinge	ARUP
4,5	P84	0,34	$1,53 \times 10^{-2}$	29	26	Huizinge	ARUP
5	P50	0,23	$3,44 \times 10^{-2}$	6	5	Huizinge	ARUP
5	P84	0,49	$5,95 \times 10^{-3}$	118	106	Huizinge	ARUP
5	mean	0,31	$1,86 \times 10^{-2}$	23	20	Huizinge	ARUP
5	P50	0,23	$3,44 \times 10^{-2}$	7	6	Zandeweer	ARUP
5	P50	0,23	$3,44 \times 10^{-2}$	5	4	Hoeksmeer	ARUP
5	P50	0,23	$3,44 \times 10^{-2}$	5	4	Huizinge	P&C duration unmodified
5	P84	0,49	$5,95 \times 10^{-3}$	77	59	Huizinge	P&C duration unmodified
5	P50	0,23	$3,44 \times 10^{-2}$	2	1	Huizinge	P&C duration modified
5	P84	0,49	$5,95 \times 10^{-3}$	43	23	Huizinge	P&C duration modified

De jaarlijkse overschrijdingskans is bepaald onder de aanname dat voor de komende drie jaar het systeem in eerste orde als stationair mag worden beschouwd. In realiteit is het systeem echter niet stationair, maar neemt de overschrijdingskans van een bepaalde grondversnelling bij de voorgenomen productie met de tijd toe. De hier gebruikte aanname betekent dat over de drie jaar bekeken het eerste jaar de overschrijdingskans waarschijnlijk wordt overschat en in het derde jaar wordt onderschat.

ARUP heeft in haar analyse rekening gehouden met het feit dat mensen overdag en 's nachts niet op dezelfde locatie aanwezig zijn en dus niet dezelfde kans lopen om letsel op te lopen. Bij de bepaling van het seismisch risico is er van uitgegaan dat de verhouding tussen dag en nacht 1:1 is. Dit betekent dat de jaarlijkse overschrijdingskans van de maximale grondversnelling voor de helft wordt toegekend aan het aantal dodelijke slachtoffers overdag en voor de helft aan het aantal dodelijke slachtoffers 's nachts. Door deze overschrijdingskansen voor een gelijk aantal slachtoffers te cumuleren wordt de totale curve voor het seismisch risico verkregen. Deze curve is weergegeven in Figuur 3.

Om twee redenen is deze curve onvolledig: 1) er zijn door ARUP geen scenario's doorgerekend voor grondversnellingen groter dan 0,49g terwijl deze wel kunnen optreden (Figuur 1), 2) de curve is specifiek voor een "karakteristieke aardbeving" op de locatie Huizinge. Er kan ook een aardbeving met een lagere overschrijdingskans plaatsvinden nabij een dichtbevolkt gebied waarbij meer

slachtoffers vallen. Het verloop van de curve voor meer dan 118 dodelijke slachtoffers is daardoor niet bekend.



Figuur 3: Het Groepsrisico (GR) voor de aardbevingen in Groningen uitgetzet in een F-N-curve. Dit Groepsrisico geldt voor de omgeving van Huizinge wat de komende jaren het gebied met het hoogste aardbevingsrisico is. Ter referentie worden ook de groepsrisico's voor Schiphol [9], het landelijke groepsrisico voor overstromingen [8] en de som van de groepsrisico's voor de externe veiligheidsdomeinen in Nederland gegeven [10].

### 2.4.3 Gevoeligheidsanalyse

Naast de 9 scenario's voor verschillende grondversnellingen voor een "karakteristieke aardbeving" bij Huizinge heeft ARUP ook een beknopte gevoeligheidsanalyse van het berekende schade- en letselbeeld uitgevoerd [5]. Hierbij is 1) de gevoeligheid voor de locatie van de "karakteristieke beving" en 2) de gevoeligheid van het schade- en letselbeeld van de gebruikte kwetsbaarheidsfunctie bepaald.

De gevoeligheid voor de locatie van de "karakteristieke beving" is vastgesteld door voor één specifieke grondversnelling het schade- en letselbeeld te bepalen voor twee alternatieve locaties: Hoeksmeer en Zandeweer. De resulterende punten zijn weergegeven in Figuur 3. Deze twee specifieke scenario's (punten) laten een vergelijkbaar beeld zien als bepaald voor de locatie Huizinge. Hieruit kan worden afgeleid dat de in deze notitie bepaalde risico's gelden voor aardbevingen met een epicentrum in het gebied waar de overschrijdingskans voor een bepaalde grondversnelling bij benadering gegeven wordt door de curve uit Figuur 1 en het schade- en letselbeeld vergelijkbaar is met een beving op de locatie Huizinge. Dit gebied wordt ongeveer begrensd door de 50% PGA/g contour in Figuur A1a van Appendix A. Voor bevingen buiten dit gebied gelden lagere overschrijdingskansen voor de maximale grondversnellingen en/of andere schadebeelden waardoor ook een ander risico zal ontstaan. Aangezien locaties buiten de bovengenoemde drie niet zijn onderzocht door ARUP is het risico buiten dit gebied op dit moment niet te kwantificeren.

Om de gevoeligheid voor de gebruikte kwetsbaarheidsfunctie te bepalen zijn voor twee grondversnellingen op de locatie Huizinge de gevolgen bepaald met een alternatieve



kwetsbaarheidsfunctie (P&C duration unmodified). De resulterende F-N-curve wordt maar gegeven door vier punten. De geïnterpoleerde curve lijkt een iets lager risico te geven dan de eerder afgeleide F-N-curve voor de locatie Huizinge [Figuur 3]. Naast deze kwetsbaarheidscurve heeft ARUP ook nog scenario's berekend met een tweede alternatieve kwetsbaarheidsfunctie waarin de functie gecorrigeerd is voor de duur van de beving. De andere twee gebruikte kwetsbaarheidsfuncties zijn gebaseerd op data afkomstig van veel sterkere bevingen. Minder sterke bevingen hebben een kortere duur. De F-N-curve voor deze alternatieve kwetsbaarheidsfunctie bestaat eveneens maar uit vier punten. Uit de interpolatie tussen deze punten in Figuur 3 is af te leiden dat de kans op 10 dodelijke slachtoffers of meer ten gevolge van de kortere duur van kleinere bevingen ongeveer halveert. De onzekerheid in deze curven (op basis van 4 punten) is groot. Het geeft dan ook alleen een indicatie van de orde grootte van de onzekerheid in het GR voor een beving bij Huizinge ten gevolge van de onzekerheid in de kwetsbaarheidsfunctie.

### 3 AARDBEVINGSRISICO GRONINGEN IN PERSPECTIEF

---

Externe veiligheid omvat risico's die onvrijwillig opgelegd worden. Bestaand extern veiligheidsbeleid voor industrie en buisleidingen gaat uit van een wettelijk vastgelegd (BEVI en BEVB) acceptatie criterium voor Plaatsgebonden Risico (PR), alsmede een door de overheid te verantwoorden richtwaarde voor GroepsRisico (GR). Tevens is hier sprake van een wettelijk vastgelegde rekenwijze voor bepalen van het risico.

Landelijk worden ook andere externe veiligheidsrisico's tegen het PR en GR of vergelijkbare begrippen getoetst, zoals luchthavenveiligheid en overstromingsrisico's. Ondanks de beperkte wettelijke basis hiervoor, blijkt dit toch gangbare praktijk. Voor aardgasbevingen bestaat dergelijke wetgeving nog niet in Nederland. Bovengenoemd acceptatiecriterium en richtwaarde zijn dermate gevestigd, dat het van nut is om het risico op aardgasbevingen daartegen te spiegelen.

Internationaal bestaat wel degelijk een breed geaccepteerde richtwaarde voor acceptatie van bescherming tegen aardbevingen, alsmede een breed geaccepteerde methodologie (Hazus 2.1.) voor het berekenen van risico's van aardbevingen. In dit document is waar mogelijk aansluiting gezocht met deze methodologie.

#### 3.1 GROEPSRISICO

Het groepsrisico geeft de kans per jaar dat in één keer een aantal mensen komt te overlijden ten gevolge van een calamiteit. Het groepsrisico wordt ook wel maatschappelijk risico genoemd: het is een maat voor de maatschappelijke ontwrichting welke het gevolg is van een calamiteit.

Het groepsrisico wordt weergegeven in een grafiek waarin de frequentie (per jaar) van het optreden van minimaal een bepaald aantal slachtoffers (N) wordt uitgezet (F-N grafiek). In het risicobeleid ten aanzien van externe veiligheid voor industrie wordt voor het beoordelen van het groepsrisico een oriëntatiewaarde aangehouden<sup>1</sup>. Dit is een lijn in de grafiek die loopt door het punt 10 of meer dodelijke slachtoffers eens per 100.000 jaar ( $F=10^{-5}$ ,  $N=10$ ), ook wel ankerpunt genoemd. Vervolgens is de aanname dat de maatschappelijke ontwrichting kwadratisch toeneemt met het aantal mensen dat bij een calamiteit om het leven komt. (Hierdoor loopt de lijn dus ook door  $F=10^{-7}$ ,  $N=100$ ).

Het aardbevingsrisico zoals hierboven bepaald is equivalent aan het groepsrisico en kan direct worden gerepresenteerd in een F-N grafiek. In Figuur 3 is het groepsrisico voor de "karakteristieke beving" bij Huizinge weergegeven. Duidelijk is te zien dat dit seismische groepsrisico aanzienlijk hoger ligt dan de oriëntatiewaarde voor externe veiligheid van inrichtingen.

---

<sup>1</sup> Let op: Voor transport en buisleidingen geldt een andere oriëntatiewaarde.

Het groepsrisico ten gevolge van aardgasbevingen is de komende drie jaar vergelijkbaar met het landelijke groepsrisico voor overstromingen<sup>2</sup> [8]. Het groepsrisico voor Schiphol [9] is een factor 10 tot 100 lager dan het groepsrisico voor aardbevingen in de omgeving van Huizinge. Het groepsrisico voor geïnduceerde bevingen in de omgeving van Huizinge ligt eveneens boven de totaalcurve van de andere externe veiligheidsrisico's in de samenleving [10]: de kans op grote aantallen slachtoffers is voor de geïnduceerde bevingen hoger dan voor alle andere externe veiligheidsrisico's bij elkaar opgeteld.

Geconcludeerd kan worden dat het groepsrisico in de periode 2013-2016 voor de "karakteristieke beving" bij Huizinge hoog is.

### 3.2 PLAATSGEBONDEN RISICO

Het plaatsgebonden risico (PR) is een maat voor het risico dat op een bepaalde locatie heerst. Deze wordt ook gehanteerd in het externe veiligheidsbeleid. Dit risico wordt bepaald door de kans op overlijden te berekenen voor een fictief persoon die onbeschermd continu op een specifieke locatie aanwezig is. De wettelijke norm welke voor het PR gehanteerd wordt is  $PR < 10^{-6}$ , hetgeen inhoudt dat de fictieve persoon op deze locatie een kans heeft van een op de miljoen om in een jaar te komen te overlijden.

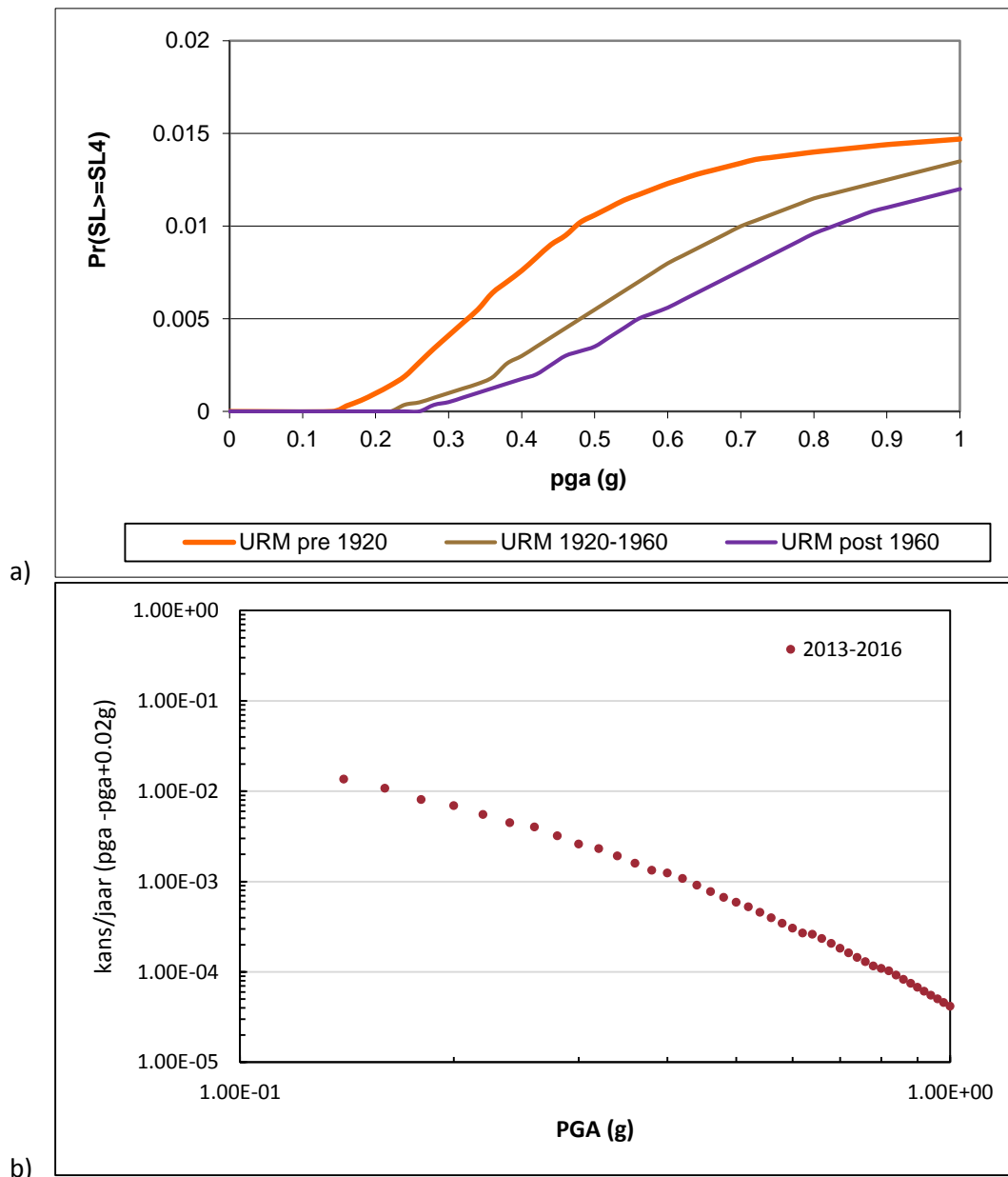
Bij overstromingen wordt in plaats van het PR gebruik gemaakt van het Lokaal Individueel Risico (LIR). Dit is het PR gecorrigeerd voor de mogelijkheid van evacuatie. Het LIR wordt bepaald voor verschillende buurten binnen de dijkeringen [8], waarna de maximale waarde als LIR aan de dijkering wordt toegekend. Ook voor het LIR wordt als referentiekader de wettelijke norm van  $10^{-6}$  aangehouden. Voor de meeste dijkeringen ligt het LIR tussen de  $10^{-5}$  en  $10^{-6}$  per jaar. Uitzondering hierop is het rivierengebied, waar het LIR hoger is dan  $10^{-5}$ /jaar.

Voor aardbevingsrisico geldt dat het risico van overlijden direct gerelateerd is aan het instorten van gebouwen. Om het risico van overlijden van een individu te kunnen kwantificeren wordt hier voor aardbevingsrisico het Lokaal Persoonlijk Risico (LPR) gedefinieerd als: *"de kans op overlijden voor een fictief persoon die zich permanent in of nabij een gebouw van een bepaalde kwetsbaarheidsklasse bevindt"*.

In principe zou, voor een adequate bepaling van het LPR, voor elke locatie binnen de invloedssfeer van een bepaalde aardbeving de kans dat daar iemand kan komen te overlijden bepaald moeten worden (gekoppeld aan een bepaald type huis). In de deterministische analyse van ARUP [5,6] wordt echter uitgegaan van de kans op instorten van een woning bij een bepaalde grondversnelling (gegeven door de kwetsbaarheidsfunctie; zie Appendix B). De kans dat vervolgens een individu kan komen te overlijden (de sterftkans) is gedefinieerd als een fractie van deze kans (HAZUS 2.1). In Figuur 4a wordt voor de drie meeste kwetsbare type gebouwen (niet versterkte bakstenen huizen) de sterftkans als functie van de grondversnelling weergegeven. Deze drie kwetsbaarheidsklassen representeren 90% van het totale huizenbestand in een straal van 15 km van de Huizinge beving en 77% van het huizenbestand in het door aardgasbevingen getroffen gebied.

---

<sup>2</sup> In deze referentiesituatie zijn de overstromingskansen van de onderscheiden dijkringdelen getalsmatig gelijk gesteld aan de huidige wettelijke normfrequenties in termen van overschrijdingskansen.



Figuur 4: a) Kans dat een individu kan komen te overlijden voor de drie meest kwetsbare woningtypen (niet versterkte bakstenen huizen (URM) onderverdeeld in huizen voor 1920, gebouwd tussen 1920 en 1960 en huizen gebouwd na 1960) ten gevolge van een beving met een bepaalde grondversnelling; b) Jaarlijkse kansdichtheidsfunctie voor een specifieke grondversnelling. De grondversnelling is hier gegeven als een fractie van de zwaartekrachtversnelling ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Tabel 2: Overzicht van het aardbevingsrisico in Groningen, specifiek voor de omgeving van Huizinge waar de komende jaren het grootste aardbevingsrisico heerst.

Groepsrisico		Lokaal Persoonlijk Risico	
F (/jaar)	N	Gebouwtype	LPR/jaar
$1,9 \times 10^{-2}$	1	URM pre 1920	$6,9 \times 10^{-5}$
$8,9 \times 10^{-3}$	10	URM 1920-1960	$2,7 \times 10^{-5}$
$2,2 \times 10^{-3}$	100	URM post 1960	$1,8 \times 10^{-5}$

Op basis van figuur 1 is voor intervallen van 0.02g de jaarlijkse kansdichtheidsfunctie voor de periode 2013-2016 bepaald [Figuur 4b]. Door de sterftkans uit Figuur 4a te vermenigvuldigen met de jaarlijkse kansdichtheidsfunctie uit Figuur 4b en vervolgens te cumuleren over de verschillende grondversnellingsintervallen, kan het jaarlijkse LPR voor een persoon in dit type huizen voor de periode 2013-2016 worden bepaald.

Het hoogste LPR van  $6,9 \times 10^{-5}$  per jaar geldt voor een persoon in een huis uit de klasse “niet versterkte bakstenen huizen van vóór 1920”. Voor de overige twee klassen is het LPR  $2,7 \times 10^{-5}$ /jaar respectievelijk  $1,8 \times 10^{-5}$ /jaar. Een overzicht van het LPR naar gebouwtype is gegeven in Tabel 2.

De resultaten in de onderzoeken 1, 5 en 6 zijn berekend tot een grondversnelling van 1g. In de berekening van het LPR is het risico van bevingen met een grondversnelling groter dan 1g derhalve niet meegenomen. Dit betekent dat het berekende LPR een ondergrens is. Net als bij het groepsrisico dient ook voor het LPR opgemerkt te worden dat het berekende LPR geldt voor het gebied dat ongeveer begrensd wordt door de 50% PGA/g contour in Figuur A1a van Appendix A. Het LPR buiten dit gebied kan op dit moment op basis van de resultaten uit de onderzoeken 1, 5 en 6 niet worden bepaald.

Geconcludeerd kan worden dat 90% van de huizen in de omgeving van Huizinge ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen een LPR heeft tussen de  $10^{-5}$  en  $10^{-4}$  per jaar. Dit is een factor 10-100 boven de wettelijke norm voor industriële activiteiten. Bij (woning)bouw wordt op grond van NEN 8700 voor bestaande bebouwing gewerkt met een norm van  $10^{-5}$ /jaar voor belastingen, zoals bijvoorbeeld door een storm, sneeuw of ontploffingen. Geconcludeerd kan worden dat het LPR door gaswinning geïnduceerde aardbevingen voor 90% van de huizen in de omgeving van Huizinge eveneens boven de NEN 8700 bouwnorm voor belastingen uitkomt.

### 3.3 INTERNATIONALE CRITERIA

Internationaal zijn in verschillende bouwcodes voorwaarden vastgelegd waar gebouwen in relatie tot seismiciteit aan moeten voldoen. Deze codes zijn opgesteld voor natuurlijke bevingen, maar kunnen en worden ook toegepast voor geïnduceerde bevingen. Voorbeelden van deze codes zijn de “Uniform building code” uit de Verenigde Staten, de “Building standard law” uit Japan en de “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance” [7] in Europa.

De Eurocodes zijn de huidige technische standaarden voor het structureel ontwerpen van gebouwen in Europa. Ze zijn verplicht in de 28 landen van de Eurocode zone en vervangen nationale standaarden. Eurocode 8 gaat specifiek in op het aardbevingsbestendig ontwerpen van gebouwen. Elk land dat gebruik maakt van de Eurocode 8 moet een Nationale Annex opstellen, waarin uitgewerkt wordt hoe de code wordt geïmplementeerd in de bouwcodes. Nederland heeft op dit moment nog geen nationale annex.

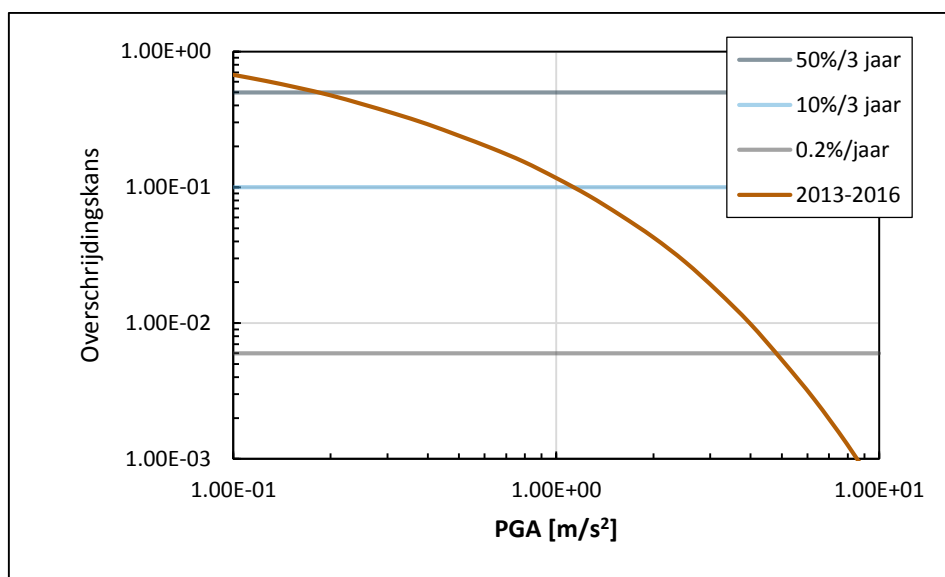
De Eurocode 8 [7] gaat uit van 2 verschillende voorwaarden:

1. “No-collapse”: Het gebouw moet dusdanig ontworpen en gebouwd zijn dat het bij grondbewegingen met een overschrijdingskans groter dan 0,2%/jaar niet mag instorten.
2. “Damage limitation”: Het gebouw moet dusdanig ontworpen en gebouwd zijn dat er bij grondversnellingen met een grotere overschrijdingskans ( $0,2\%/jaar < P < 1,1\%/jaar$ ) geen schade mag ontstaan waarvan de kosten disproportioneel groot zijn in vergelijking met de kosten van het bouwwerk zelf.

Het uitgangspunt van de “no-collapse” overschrijdingskans is dat een gebouw tijdens zijn gemiddelde levensduur van 50 jaar 10% kans mag hebben om in te storten. Deze overschrijdingskans als basis voor het ontwerp is als eerste geïntroduceerd in de Verenigde Staten en is wereldwijd in de meeste bouwcodes voor seismiciteit overgenomen. De Eurocode stelt dat bestaande bebouwing aan dezelfde normen moeten voldoen als nieuwe bebouwing [7]. Hiermee is de Eurocode bijzonder conservatief.

Om het risico in Groningen in perspectief te plaatsen is de grondversnelling en het aantal slachtoffers behorende bij de overschrijdingskans van de Eurocode 8 “no-collapse” voorwaarde

bepaald. De grondversnelling behorende bij deze overschrijdingskans is  $4,9 \text{ m/s}^2$  (0,5g) [Figuur 5]. Bij deze grondversnelling berekend ARUP [5,6] dat er niet ‘geen’, maar meer dan 1200 huizen zouden kunnen instorten waarbij overdag 118 dodelijke slachtoffers en ‘s nachts 106 dodelijke slachtoffers te betreuren zouden kunnen zijn.



Figuur 5: De overschrijdingskans voor de maximale grondversnelling (peak ground acceleration) binnen het Groningen gasveld voor de periode 2013-2016. Tevens is de door NAM in het winningsplan gebruikte 50% overschrijdingskans in de periode van 3 jaar en de 10% overschrijdingskans in de periode van 3 jaar aangegeven. Daarnaast is ook de 0.2%/jaar overschrijdingskans behorende bij de Eurocode 8 norm weergegeven.

## 4 CONCLUSIE

In deze notitie is het aardbevingsrisico voor de periode 2013-2016 ten gevolge van een “karakteristieke aardbeving” op de locatie van de Huizinge beving bepaald. Dit risico is op een zodanige wijze gepresenteerd dat het vergeleken kan worden met risico’s in andere sectoren. Er is vergeleken met de sectoren Externe Veiligheid (gevaarlijke stoffen), Schiphol, overstromingen en de bouwcodes. Uit de analyse volgt dat het risico ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen, bepaald voor een “karakteristieke beving” op de locatie van de Huizinge beving, in vergelijking met andere risico’s in de maatschappij hoog is.

Het risico op grotere aantallen slachtoffers, het groepsrisico, in het gebied beïnvloed door de Huizinge beving is vergelijkbaar met het landelijk groepsrisico bij overstromingen. In vergelijking met de groepsrisico’s in de andere externe veiligheidssectoren en Schiphol is het seismisch risico hoog.

Voor 90% van de huizen binnen een straal van 15 km van de Huizinge beving geldt dat het LPR ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen tussen de  $10^{-5}$  en  $10^{-4}$  per jaar ligt. Het hoogste LPR in dit gebied, van  $6,9 \times 10^{-5}$  per jaar, geldt voor een persoon in een huis uit de klasse “niet versterkte bakstenen huizen van vóór 1920”. De risico’s die bewoners in deze huizen ten gevolge van door gaswinning geïnduceerde aardbevingen lopen zijn hoger dan de bouwcodenormen welke internationaal voor natuurlijke aardbevingen en nationaal voor andere (vergelijkbare) risico’s ten gevolge van belastingen op huizen worden aangehouden.

## 5 REFERENTIES

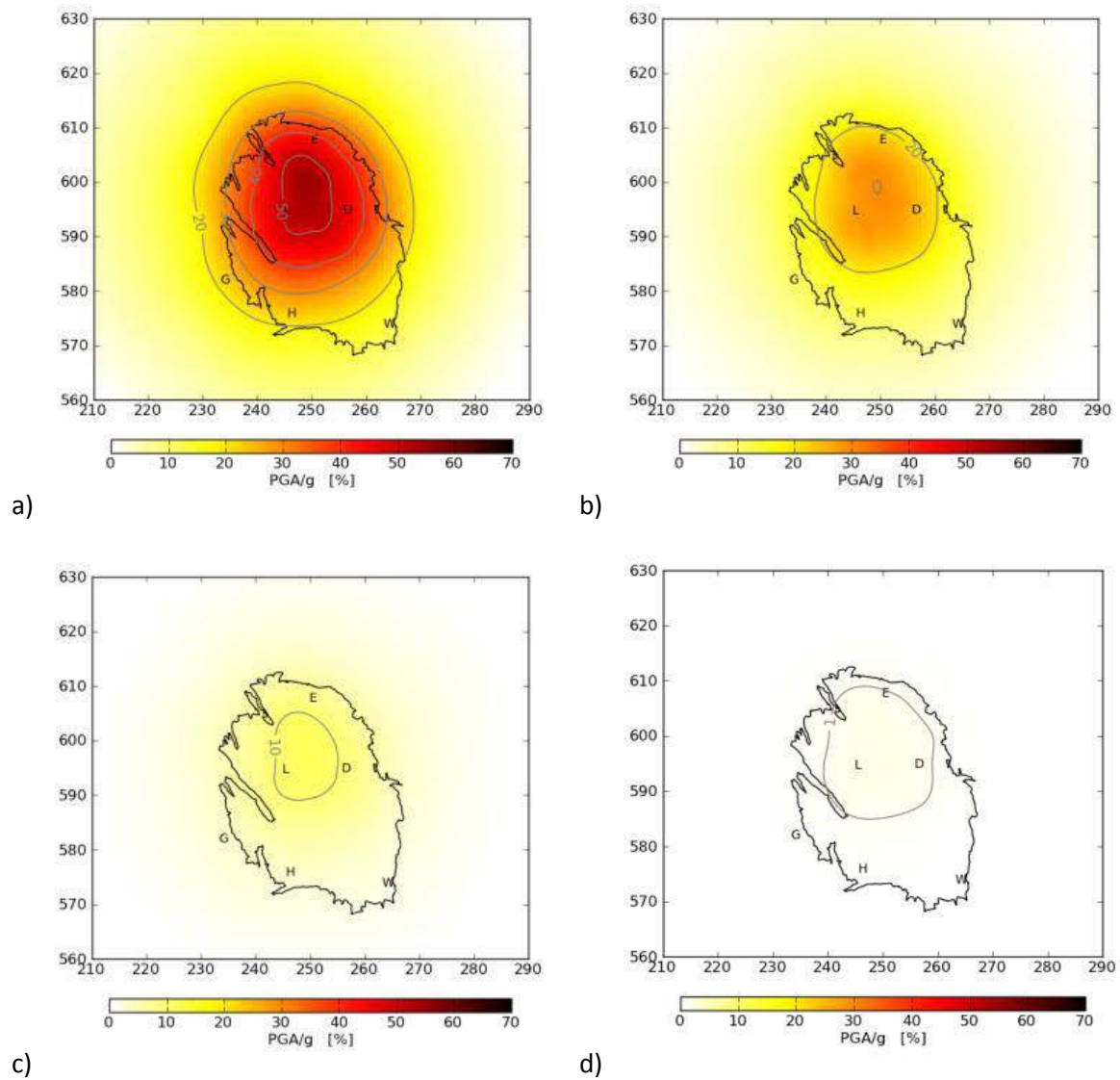
---

- [1] Muntendam-Bos, A.G. and J.A. de Waal (2013) Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field, Report of the State Supervision of Mines, 16 January 2013.
- [2] Kamerbrief Minister van Economische Zaken (2013) Toezending stukken naar aanleiding van gedane toezeggingen in Algemeen Overleg gaswinning Groningen, kenmerk: DGETM-EM / 13021701, dd 11 februari 2013.
- [3] NAM (2013) Report on Subsurface Aspects of Induced Earthquakes in the Groningen field, October 2013.
- [4] NAM (2013) Report to the Technical Guidance Committee (TBO) on production measures – Part 1: Depletion scenarios and hazard analysis, October 2013.
- [5] ARUP (2013) Groningen 2013, Structural upgrading strategy, REP/229746/ST001, 13 November 2013.
- [6] ARUP (2013) Groningen 2013, Seismic Risk Study – Earthquake scenario-based risk assessment, REP/229746/SR001, 26 November 2013.
- [7] CEN (2004) Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Technical Report. Comit\_e Europ\_eeen de Normalisation, .. Brussels.
- [8] Deltares (2011) Analyse van slachtofferrisico's; Waterveiligheid 21e eeuw, 1204144-005-ZWS-0001.
- [9] Post, J.G., E.S. Kooi en J. Weijts (2005) Ontwikkeling van het groepsrisico rond Schiphol, 1990-2010 door de ontwikkeling van de luchtvaart en omgeving, RIVM rapport 620100004/2005.
- [10] Milieu- en Natuurplanbureau (2004) Risico's in bedijkte termen; een thematische evaluatie van het Nederlandse veiligheidsbeleid tegen overstromen, RIVM rapport 500799002.

## 6 BEGRIPPENLIJST

Hazard:	Een situatie welke een bedreiging is voor een (mensen-)leven, de gezondheid, een gebouw of de omgeving.
Seismisch hazard:	In het geval van seismisch hazard is de bedreigende situatie een aardbeving. In de weergave van seismisch hazard wordt vaak al de interactie bepaald tussen de bedreigende situatie en de (overschrijdings-)kans dat de bedreigende situatie optreedt. Maatgevend voor de mate van bedreiging is de grondsnelheid en, voor kleinere bevingen ( $M < 5-5,5$ ) met name bepalend, de grondversnellingen.
Risico:	De interactie tussen het hazard, de kans dat het hazard optreedt en de gevolgen die optreden indien een hazard zich voordoet.
Seismisch risico:	De interactie tussen het seismische hazard en de gevolgen die optreden indien het hazard zich voordoet.
Plaatsgebonden risico:	Maat voor het risico dat op een bepaalde locatie heerst. Dit risico wordt bepaald door de kans op overlijden te berekenen voor een fictief persoon dat onbeschermd continu op een specifieke locatie aanwezig is.
Groepsrisico:	De kans per jaar dat in één keer een groot aantal mensen komt te overlijden ten gevolge van een calamiteit. Het groepsrisico wordt ook wel maatschappelijk risico genoemd: het is een maat voor de maatschappelijke ontwrichting welke het gevolg is van een calamiteit.
Individueel risico:	De kans dat 1 op de x aantal mensen in een jaar komt te overlijden.
Lokaal individueel risico (LIR):	Het plaatsgebonden risico gecorrigeerd voor de mogelijkheid van evacuatie.
Lokaal persoonlijk risico (LPR):	De kans op overlijden voor een fictief persoon die zich permanent onbeschermd in een gebouw van een bepaalde kwetsbaarheidsklasse bevindt.
Kans op overlijden:	De waarschijnlijkheid dat in een bepaalde periode een specifiek aantal mensen overlijdt als gevolg van een aardgasbeving
Overschrijdingskans t.a.v overlijden:	De waarschijnlijkheid dat in een bepaalde periode minimaal een specifiek aantal mensen overlijdt als gevolg van een aardgasbeving
Probabilistisch:	Een berekening waarbij expliciet rekening wordt gehouden met onzekerheden.
Deterministisch:	Een berekening waarbij uitgegaan wordt van specifieke waarden en geen rekening wordt gehouden met onzekerheden.

## APPENDIX A



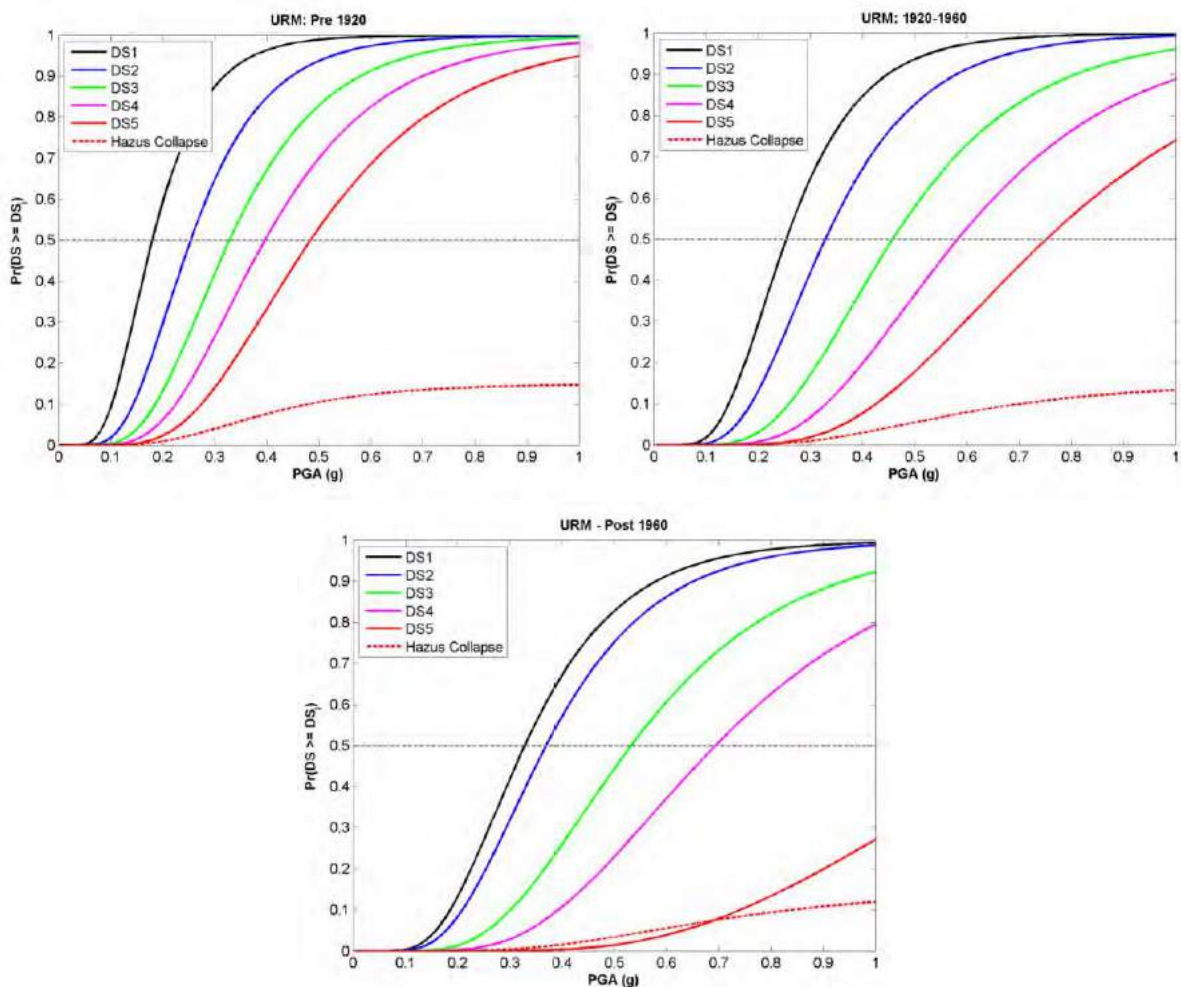
Figuur A1: Grondversnellingskaarten voor de drie jaar van 2013-2016 met a) 0,16%, b) 2%, c) 10% en d) 50% overschrijdingskans. De maximale grondversnelling is a) 0,54g, b) 0,30g, c) 0,12g en d) 0,02g.



## APPENDIX B

Tabel B1: Gebouwtypen voor de seismisch risico analyse met de verdeling in het beperkte en uitgebreide gebied.

Material	Building typology	Building type	Age	Storeys /Height	15 km database		Extended database	
					Sub-total	Total (%)	Sub-total	Total
Unreinforced masonry	Detached/villa/semi-detached, flexible diaphragms	URM1	Pre 1920	1-2	3,299 (5.03%)	57,628 (89%)	7,500 (2.40%)	189,100 (77%)
		URM2		≥3	2,295 (3.5%)		5,200 (2.10%)	
		URM3	1920-1969	1-2	8,062 (12.4%)		23,000 (9.30%)	
		URM4		≥3	2,551 (3.9%)		7,500 (3%)	
	Detached/villa/semi-detached, rigid diaphragms	URM5	Post 1970	1-2	7,729 (11.9%)		23,000 (9.30%)	
		URM6		≥3	2,600 (5%)		6,100 (2.50%)	
	Terraced house, flexible diaphragms	URM7	Pre 1920	1-2	209 (0.3%)		3200 (1.3%)	
		URM8		≥3	404 (0.6%)		8400 (3.4%)	
		URM9	1920 - 1969	1-2	2,569 (4%)		15,000 (6.1%)	
		URM10		≥3	6,645 (10.2%)		31,800 (13%)	
	Terraced house, rigid diaphragms	URM11	Post 1970	1-2	9,608 (14.8%)		27,000 (11%)	
		URM12		≥3	11,656 (18%)		31,400 (12%)	
Reinforced concrete	Concrete bearing wall, rigid diaphragms	RC1	Post 1980	1-3	2,345 (3.6%)	3,498 (5.40%)	6,800 (3%)	10,200 (4%)
		RC2	Post 1970	≥4	1,153 (1.8%)		3,400 (1%)	
Wood	Wooden barns of all ages (with possible non-bearing masonry façade)	W	All	All	78 (0.1%)	78 (0.1%)	600 (0.2%)	600 (0.2%)
Steel	Lightweight steel frame structures (e.g. industrial, building footprint larger than 200 m <sup>2</sup> )	S1	Post 1960	<15 m	51 (0.1%)	111 (0.20%)	1400 (0.6%)	106 (1%)
	Other steel buildings (steel offices, residential)	S2	Post 1960	>15 m	60 (0.10%)		200 -0.10%	
Unclear	Objects with unknown functions or under construction	UNCL	All	All	3,262 (5%)	3,262 (5%)	44,600 (18%)	3,311 (18%)
Other	To be ignored: (Electricity poles, demolished and non-existing buildings, caravans, docking bays, defence buildings)	OTHER	All	All	353 (0.5%)	353 (0.5%)		
				<b>TOTAL</b>	<b>64,931</b>		<b>246,100</b>	

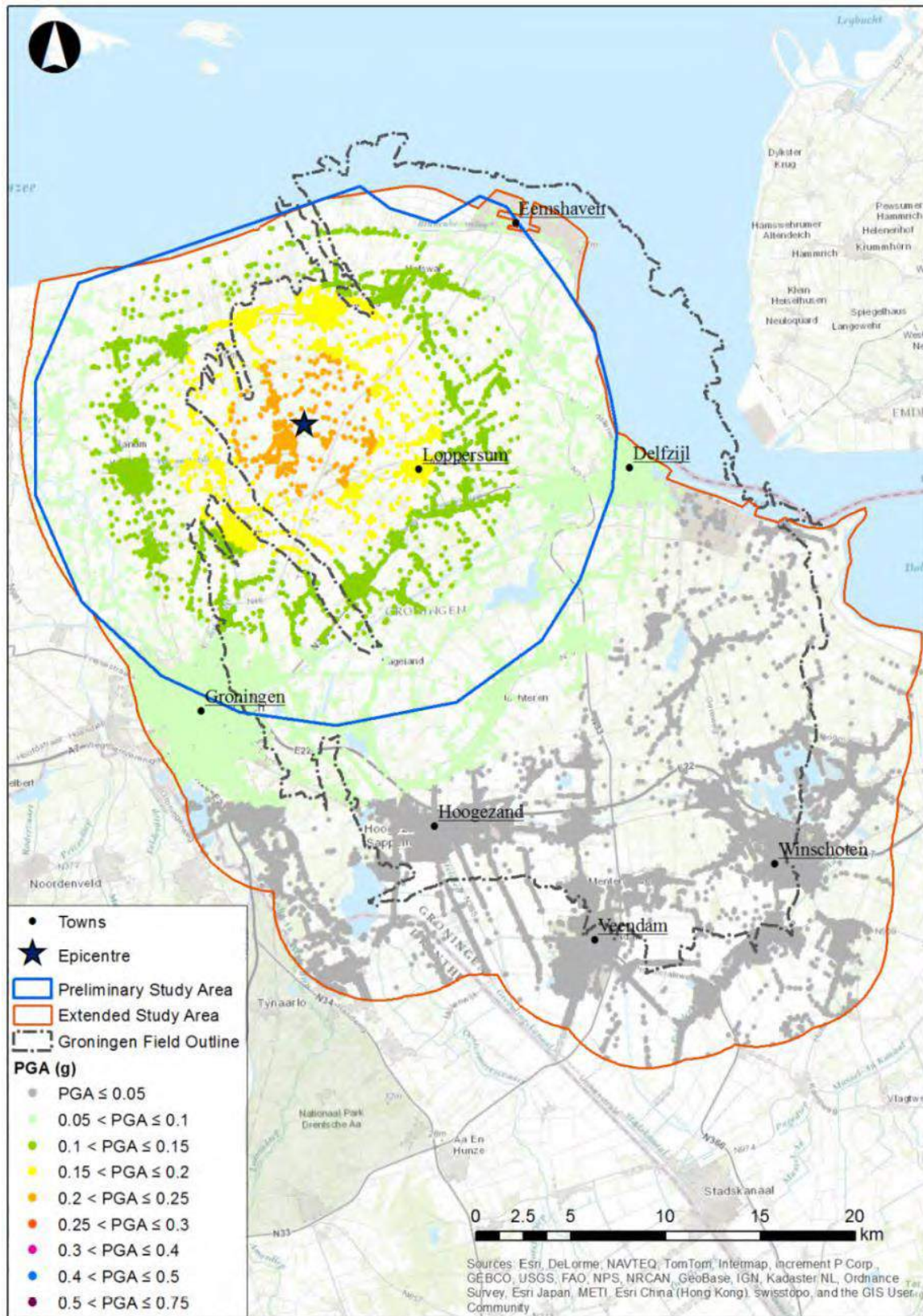


Figuur B1: ARUP kwetsbaarheidscurven voor de drie URM kwetsbaarheidsgroepen voor alle 5 “damage states”. De “HAZUS collapse” curve is het resultaat van het toepassen van de HAZUS factor voor het instorten van huizen op de DS4 curve. Deze curve is de basis voor het bepalen van het aantal slachtoffers.

Tabel B2: Omschrijving van de schade- en letselcategorieën zoals gebruikt in de ARUP studies [5,6].

Damage state	classification	Severity (Injury) level	classification
DS1	Slight damage	SL1	injuries that require basic medical aid and could be administered by paraprofessionals. They would need bandages or observations.
DS2	Moderate damage	SL2	injuries requiring a greater level of medical care and use of medical technology (x-rays or surgery) but not expected to progress to a life threatening status.
DS3	Extensive damage	SL3	injuries posing immediate life threatening conditions if not adequately treated.
DS4	Complete damage	SL4	instantaneously killed or mortally injured
DS5	Collapse		

# APPENDIX C



Figuur C1: Ruimtelijke verdeling van de grondversnelling voor een beving met magnitude 5 op 3 km diepte op de locatie van het Huizinge epicentrum. De grondversnelling is bepaald met de mediaan van de GMPE relatie van ARUP [3].

Tabel C1: Aantal gebouwen dat bij het scenario weergegeven in Figuur C1 wordt blootgesteld aan een specifieke grondversnelling.

<b>Building Type</b>	<b><math>0 \leq PGA &lt; 0.05</math></b>	<b><math>0.05 \leq PGA &lt; 0.1</math></b>	<b><math>0.1 \leq PGA &lt; 0.15</math></b>	<b><math>0.15 \leq PGA &lt; 0.2</math></b>	<b><math>0.2 \leq PGA &lt; 0.25</math></b>
URM: Pre 1920	4307	15735	2352	1412	442
URM: 1920-1960	24395	44534	4411	3132	648
URM: Post 1960	26545	49134	6552	4501	644
RC1	1796	4192	473	315	37
RC2	749	2494	69	62	4
Wood	253	156	109	50	21
S1	478	705	132	62	13
S2	61	121	5	1	2



# memo

## Beoordeling Risicoanalyse aardgasbevingen

Het Rijksinstituut voor volksgezondheid en milieu (RIVM) heeft op verzoek van het Staatstoezicht op de Mijnen een beoordeling uitgevoerd van de notitie "Risico Analyse Aardgasbevingen Groningen"<sup>1</sup>.

### Reikwijdte van de beoordeling

De beoordeling van het RIVM was gericht op de risicomaten die gebruikt zijn en de vergelijking met andere risicobronnen. Hierbij is beoordeeld of de gebruikte risicomaten gangbaar zijn en vergelijkbaar zijn met de risicomaten voor andere risicobronnen. Ook is beoordeeld of de berekening van de risicomaten juist is uitgevoerd en de analyse begrijpelijk is.

Het RIVM heeft geen inhoudelijke expertise op het gebied van aardbevingen. De gepresenteerde kansen op aardbevingen en de gevolgen van aardbevingen zijn daarom als een gegeven aangenomen en niet beoordeeld. Om dezelfde reden zijn de onderliggende onderzoeksrapporten niet meegenomen in deze beoordeling.

### Proces van de beoordeling

Het RIVM heeft een eerdere versie van de notitie becommentarieerd en besproken met de auteurs. Op basis van het commentaar is een aangepaste versie uiteindelijk ter beoordeling voorgelegd aan het RIVM.

### Resultaten van de beoordeling

- Er zijn twee risicomaten gebruikt voor de presentatie van de risico's van aardbevingen in Groningen, namelijk het groepsrisico en het Lokaal Persoonlijk Risico. Dit is in lijn met de standaard risicomaten voor externe veiligheid, waar het groepsrisico en het plaatsgebonden risico als risicomaten worden gebruikt. Zowel voor het plaatsgebonden risico als het Lokaal Persoonlijk risico wordt hetzelfde uitgangspunt gehanteerd, namelijk een persoon die continu aanwezig is op de meest kwetsbare plaats (binnen danwel buiten). Dat maakt deze risicomaten vergelijkbaar.
- De berekening van de risicomaten is gebaseerd op een overschrijdingskans voor de maximale grondversnelling (figuur 1). Een belangrijke aanname in de analyse is dat deze overschrijdingskans voornamelijk kan worden toegekend aan het gebied rond Huizinge. Indien deze kans verspreid is over een (aanzienlijk) groter gebied, heeft dit invloed op zowel het berekende groepsrisico als het berekende Lokaal Persoonlijk Risico.

<sup>1</sup> De beoordeelde versie is op 13 december 2013 ontvangen van mevr. dr. A.G. Muntendam-Bos van het Staatstoezicht op de Mijnen

- De berekende groepsrisicocurve is gebaseerd op een aantal 'karakteristieke bevingen' (tabel 1) en is weergegeven in figuur 3. Er zijn geen karakteristieke scenario's doorgerekend met een maximale grondversnelling groter dan 0,49g, hoewel deze wel een kans van optreden hebben (figuur 1). Dit heeft tot gevolg, zoals ook in de notitie is opgemerkt, dat de groepsrisicocurve niet is berekend voor meer dan 118 slachtoffers. Uit figuur 3 mag dus niet geconcludeerd worden dat er geen aardbevingen kunnen optreden met meer dan 118 slachtoffers.
- De gevoeligheidsanalyse van het groepsrisico geeft in tabel 1 een goed beeld van de gevoeligheid van het aantal slachtoffers voor locaties in de omgeving van Huizinge en voor de gebruikte kwetsbaarheidsfunctie<sup>2</sup>.
- Het Lokaal Persoonlijk Risico is berekend uit de kans op een aardbeving met een bepaalde grondversnelling, de kans op het instorten van huizen en de kans op het overlijden van personen in een instortend huis. In de berekening is aangenomen dat bij het instorten van een woning de sterftekans van een individu gelijk is aan 10%<sup>3</sup>. Het is niet duidelijk waar deze kans op is gebaseerd en hoe deze zich bijvoorbeeld verhoudt tot de waarden in de richtlijn PGS-1<sup>4</sup>.
- De risico's van aardbevingen zijn vergeleken met de risico's van overstromingen, Schiphol en externe veiligheid van gevaarlijke stoffen. Ook is een vergelijking uitgevoerd met de oriëntatiewaarde voor inrichtingen met gevaarlijke stoffen. Omdat de risicomaten vergelijkbaar zijn voor deze verschillende domeinen, is deze vergelijking mogelijk. De vergelijking is ook correct uitgevoerd.

**Datum**

16 december 2013

**Ons kenmerk**

225/2013 M&V MvR/pudh

## Conclusie

De notitie "Risico Analyse Aardgasbevingen Groningen" geeft de risicomaten groepsrisico en Lokaal Persoonlijk Risico weer voor aardgasbevingen in Groningen voor de komende drie jaar. Daarnaast worden deze risico's vergeleken met de risico's van andere domeinen. Deze berekening en de vergelijking zijn, op enkele details na, correct uitgevoerd en geven een goed beeld van de risico's van aardbevingen, gegeven de gepresenteerde kansen op aardbevingen en de gevolgen van aardbevingen.

<sup>2</sup> De vertaling van de scenario's in tabel 1 naar de punten in de groepsrisicocurve is voor de gevoeligheidsanalyse niet volledig navolgbaar.

<sup>3</sup> Deze waarde lijkt niet te zijn gebruikt voor de berekening in paragraaf 3.3, waar in het scenario 1200 huizen instorten en 's nachts 106 dodelijk slachtoffers zijn.

<sup>4</sup> PGS-1. Methoden voor het bepalen van mogelijke schade. Deel 2A: Effecten van explosie op personen  
<http://www.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/PGS1.html>, geraadpleegd op 15 december 2013. In dit document wordt een sterftekans van 20 tot 50% gehanteerd indien een gebouw instort.



## **Notitie**

Onderwerp: Review notitie SodM :  
'Risicoanalyse aardgasbevingen Groningen'  
Auteur: Chris Pietersen, Safety Solutions Consultants  
Datum: 6 januari 2014

## **Algemeen**

SodM heeft SSC verzocht een review uit te voeren van de hierboven genoemde notitie. Dit op basis van de kennis en ervaring van het berekenen, evalueren en toetsen van risico's in andere sectoren dan die van aardbevingen. Die kennis heeft bij SSC met name betrekking op de risico's van het omgaan met gevaarlijke stoffen: verwerking, gebruik, opslag en transport. Opgemerkt wordt dat SSC ook eerdere concept notities van SodM heeft gereviewed. Op basis daarvan heeft SodM in de uiteindelijke versie een aantal aanpassingen gemaakt.

### *Aanpak SodM notitie*

Een deterministische seismische risico analyse is uitgevoerd door ARUP. De deterministische aanpak geeft voor een "karakteristieke beving" de gevolgen in termen van schade en letsel/doden. Vervolgens heeft SodM de resultaten van de ARUP aanpak gecombineerd met de door NAM probabilistisch bepaalde overschrijdingskansen van de grondversnellingen. De resultaten daarvan zijn gebruikt om het seismisch risico uit te drukken in risicomaten die in Nederland worden gehanteerd voor andere sectoren. Het gaat dan met name om het Groepsrisico (GR) en het Plaatsgebonden Risico (PR). Een vergelijking maakt het mogelijk om uitspraken te doen over de grootte van het seismisch risico in vergelijking met de risico's in andere sectoren en de daarbij gehanteerde normering.

## **Review**

SSC heeft geen verdere opmerkingen over de wijze waarop SodM de ARUP analyse resultaten heeft verwerkt in een risico analyse. Daar waar het niet goed mogelijk was om aan de definities van GR en PR voor de aardbevingen te voldoen zijn door SodM opmerkingen gemaakt binnen welk kader de berekende waarden moeten worden geïnterpreteerd. Dat laat onverlet dat de berekende risico's een basis bieden voor vergelijking met risico's in andere sectoren. Dit alles uiteraard gegeven de genoemde randvoorwaarden en onzekerheden. De conclusie van SodM dat het seismisch risico in Groningen in vergelijking met de risico's in de meeste andere sectoren (m.u.v. het risico op overstromingen) aanzienlijk hoger is wordt door SSC onderschreven.

Een eerdere suggestie van SSC om ook de interne beoordeling van letsel risico's door NAM op te nemen is door SodM niet gehonoreerd. Voor de discussie over de hoogte van de risico's is dit echter van belang. In de bijlage bij deze notitie wordt deze methode alsnog gepresenteerd. Uit een toepassing van deze 'SIL matrix' voor de aardbevingen blijkt het risico volgens deze matrix ontoelaatbaar hoog.

## **SSC conclusie**

### *Risico evaluatie*

SSC onderschrijft de conclusie van SodM dat de oriënterende waarde voor Het Groepsrisico voor gevaarlijke stoffen door het aardbevingsrisico met 3-4 orden van grootte wordt overschreden (factor 1000- 10.000). Deze oriënterende waarde geldt echter niet voor aardbevingen. Ook de norm voor Plaatsgebonden Risico is formeel niet van toepassing.

Normering van risico's is een maatschappelijke zaak van belangen afweging. Deze dient voor aardbevingsrisico's nog plaats te vinden. Op dit moment kan alleen vergelijkenderwijs met andere sectoren geconcludeerd worden dat het risico hoog is.

**Bijlage Shell/ NAM risico matrix voor Safety Integrity Levels**

Deze methode wordt door NAM gebruikt in het kader van het bepalen van de noodzakelijke risicoreductie factor (op basis van een Safety Integrity Level- SIL) van het risico van scenario's voor mensen bij het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. De SIL matrix weerspiegelt de interne risico acceptatie van de NAM voor persoonlijk letsel.

Het SIL concept is afkomstig uit de internationale normen NEN-EN-IEC-61508/ 6151. Deze benadering is door Shell/ NAM geïmplementeerd in onderstaande SIL matrix (Shell DEP 32.80.10.10).

Toepassing voor de aardbevingen Groningen:

**Frequentie** ('demand rate'): 1x in de 10-100 jaar of 1x in de 1-10 jaar

**Gevolgen** ('severity') is 3 : Major injury.

**Resultaat:** het risico is in alle gevallen ontoelaatbaar hoog: SIL 2 of SIL 3.

SIL 3 betekent dat het risico gereduceerd dient te worden met een factor 1000- 10000. Voor SIL 2 is dat een factor 100-1000.

Een in alle opzichten onacceptabel hoog risico dus.

**Table 1 SIL decision matrix for personal safety risks**

Inverse Virtual Demand rate (years per demand) on IPF	Health/Safety (Requisite SILs)						Notes for demand rate selection
	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4	X	
<1	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4	X	Continuous mode
1-10	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 4	SIL 4	Difficult/complex controls, happens between shutdowns Unspared machinery (pumps, compressors)
10-100	-	-	SIL 1	SIL 2	SIL 3	SIL 3	Control loop failure with operator intervention as a safeguard Spared machinery (pumps, compressors)
100-1000	-	-	-	SIL 1	SIL 2	SIL 2	Single effective barrier (omit IPF or operator intervention in the count)
>1000	-	-	-	-	SIL 1	SIL 1	Two or more effective barriers present (omit IPF or operator intervention in the count)
Personnel Safety	No injury or health effect	Slight injury or health effect	Minor injury or health effect	Major injury or health effect	PDT or 1-3 casualties	> 3 casualties	All independent layers of protection, conditional modifiers, exposure, possibilities for aversion etc. will need to be separately considered, documented and taken into account in LOPA for severity 3 and higher.
Severity (Numeric)	0	1	2	3	4	5	



## **Review of Arup Report**

# **“Seismic Risk Study: Earthquake Scenario-Based Risk Assessment”**

**Julian Bommer, Helen Crowley & Rui Pinho**

### **Scope**

This document presents a brief review of the report by Arup (REP/229746/SR001, Draft Rev. A.09, issued 26 November 2013) on scenario-based seismic risk assessments for the Groningen area. The review was carried out by the authors of this report between Wednesday 4<sup>th</sup> and Friday 6<sup>th</sup> December.

The review begins with a general assessment of the report, and then addresses each section (Sections and Appendices in the order in which they appear in the report) with more specific comments, many of which serve to illustrate the basis for the general conclusions. A list of references cited in this review is also included at the end of the document.

In view of the limited period of time in which this review has been conducted, the focus has been placed firmly on major technical issues and not on any minor details of presentation. However, in some cases ambiguities in the technical narrations and use of terminology are noted because these may have implications beyond this specific report.

### **General Assessment**

The report covers the development of a database for exposure in the Groningen field area, focused primarily on buildings, and on the characterisation of their seismic resistance through the development of fragility curves for different categories into which the exposed building stock is classified. The study then identifies a number of scenario earthquakes (of magnitudes  $M_w$  3.6, 4, 4.5 and 5) and estimates the resulting levels of building damage and consequent casualties in terms of deaths and numbers of injured. The study includes some sensitivity analyses to explore the influence of varying different factors in the risk model, such as the ground-motion exceedance level and the fragility curves adopted.

The work that Arup have conducted on developing and characterizing the exposure database for the Groningen area is first class. This element of the work is very

commendable and constitutes an extremely valuable contribution from the Arup team. The exposure database and the building classification scheme that has been applied to it provide an excellent basis for conducting seismic risk analyses to quantify the threat presented by potential future induced earthquakes in the Groningen field.

Uncertainties in the technical data, such as the fragility curves, are significant. The results from the technical assessment of the hazard and the risk need to be understood with this in mind. The results of this risk assessment is not in line with that seen for other earthquakes of comparable magnitude, as noted in the report. In particular the estimates for casualties seems to be high in comparison to the impact of other similar magnitude earthquakes and suggest conservativeness in these results.

A number of technical issues need to be addressed. Most importantly, the conclusion that the three sets of damage and casualty estimates obtained using three different sets of fragility curves can be taken as *“providing a good indication of the possible levels of damage and numbers of casualties that could occur in future earthquakes in the Groningen region”* will need to be further substantiated. Firstly, while there is clearly very considerable epistemic uncertainty in the risk assessments, estimates of the uncertainty ranges should be inferred from viable models rather than simply a collection of available models. In this regard, fragility functions adopted from studies based entirely on different building typologies and the damage experienced in moderate-to-large magnitude earthquakes, without any adjustment for short-duration motions, are unlikely to represent genuine epistemic uncertainty. Secondly, many vitally important aspects of epistemic uncertainty have not been considered, which therefore undermines the claim that the results might be taken to represent the range of possible outcomes due to potential future earthquakes in the Groningen field. One of the key uncertainties not explored in this study is that associated with the choice of the most appropriate ground-motion prediction model, both in terms of medians and standard deviations. Thirdly, none of the calculations presented in the Executive Summary represent realistic simulations in terms of the treatment of variability in the ground-motion fields due to these scenario earthquakes.

## **Executive Summary**

All results in the Executive Summary make use of median or 84<sup>th</sup> percentile ground motions, yet reference is repeatedly made to the damage and casualties that are “expected”. We strongly believe that mean results should be presented in this scenario risk assessment, in order to provide the “expected” values. Otherwise, stronger justification is needed for the presentation of median (or 84<sup>th</sup> percentile) results based on full correlation of ground motions. Furthermore, it should be made

clear in this Executive Summary that the damage and loss results have a 50% (or 16%) probability of being exceeded (should fully correlated ground motions occur), but are not the results that would occur, on average, should the event be repeated many times.

It is not clear whether the results for the casualties that are presented in this Executive Summary are for a day- or night-time scenario.

In the closing sentence on p.7 there is an important statement regarding the more pessimistic loss estimates obtained in the Arup calculations: “*These higher building damage and casualty estimates are possible but appear to be higher than observed levels of damage and casualties from tectonic earthquakes of similar magnitude elsewhere in the world*”. The higher estimates of damage and deaths correspond to fragility curves for the more severe damage states (DS4, DS5) that are unproven for the region—and indeed for which no compelling arguments are offered—and the entirely unrealistic scenario of an earthquake producing shaking at the 1-in-6 probability level at all locations. Exactly how this is deemed to be “possible” is not explained. Moreover, it is noted also that the statement to the effect that those estimates of damage and numbers of casualties appear to be inconsistent with available field data is not followed up or discussed in any way. Not a single physical argument is put forward for why such devastating outcomes (that exceed anything observed following comparable tectonic earthquakes around the world) could be expected in Groningen. We believe this is an indication that the loss estimates are conservative. This is further compounded by the lower impact due to the expected shorter duration of the small-magnitude induced earthquakes compared to larger tectonic earthquakes from which the empirical fragility functions have been calibrated.

## **Chapter 1: Introduction**

The equation presented in Section 1.2 is not the one applied in the risk analyses presented, as the hazard is not modelled as the “*rate of exceeding different measures of earthquake ground motion*”, but is either modelled as conditioned on both a given magnitude and percentile of ground motion (50 or 84) or just conditioned on a given magnitude.

## **Chapter 2: Seismic Hazard**

The use of loss estimations based on a single earthquake scenario and median ground-motion levels at all sites is justified on the basis of the same approach having been used by Chen *et al.* (2013) for studies in California. The Chen *et al.* (2013) study makes use of the HAZUS approach and includes a simple flat statement that

they calculate median motions for their scenario ground motions, for which no justification is given (although this is standard procedure in the HAZUS approach). Bommer & Crowley (2006) explored this issue and concluded that it is justified since the ground-motion variability is embedded in the HAZUS vulnerability curves. Since the HAZUS methodology is not being applied for the damage calculations in the Arup study (an element of the HAZUS approach is only adopted for casualty estimates) the invocation of the Chen *et al.* (2013) study is not a robust justification for their approach. Moreover, the Chen *et al.* (2013) study then goes on to produce state-wide loss estimations calculated using hazard curves obtained from PSHA calculations at multiple locations, an approach that has been shown to give incorrect results for a distributed portfolio of exposure (Crowley & Bommer, 2006).

On p.16 the authors state that they do not use the version of the Akkar *et al.* (2013) GMPE with the modification at small magnitudes proposed by Bommer (2013) since they are considering scenarios with magnitudes  $M_w$  3.6, 4, 4.5 and 5. Since the modifications to the PGA equation affect predictions for earthquakes of less than  $M_w$  4.2, the explanation given is questionable. The  $M_w$  3.6 scenario is clearly chosen to replicate the 2012 Huizinge event and the modified PGA equation was calibrated to the ground-motion recordings from that event, hence it is difficult to understand why the modified equation was not used for that case. The original equation, when compared to that modified using the Groningen field recordings, leads to overestimations of PGA by a factor of 2 at the epicentre, increasing with distance to a factor 4 just beyond 20 km, for the  $M_w$  3.6 scenario earthquake. For the  $M_w$  4.0 event, the overestimation is less severe, at about 1.3 at the epicentre and above 1.5 at 20 km. Clearly, these overestimated accelerations will have resulted in overestimations of the resulting damage and human consequences in these scenarios.

Another point we note in passing here concerns the equation at the top of p.17 to define the mean of normal distribution. The equation is mathematically correct but if one is to use only a single value of ground motion this might indeed be considered more meaningful and useful than the median (although it will not yield the same mean loss estimate as obtained from sampling the full distribution of ground-motion variability). See comments on Section 6 regarding the use of this value.

The discussion of the spatial correlation of ground motion near the top of p.17 is confused, and needs to clarify that the proximity or separation of locations (which may, for example, all be at the same distance from the source) affects their respective value of  $\epsilon_\phi$  rather than the “*ground motion level*”. Similarly, the statement at the beginning of the second paragraph that “*for a given earthquake, the ground motion inter-event variability ( $\tau$ ) is the same*”, is meaningless: it should instead have been stated that for a given earthquake,  $\epsilon_\tau$  is the same.

There are some serious shortcomings in the discussion of the influence of the surface geology on ground motion and hazard levels (Section 2.5). At the foot of p.20, there is a statement that “*weak soils can significantly reduce or amplify earthquake ground motions depending on the amplitude and characteristics of the incoming ground motion.*” Although very weak soils can limit ground motions by failing under very strong shaking (or through liquefaction in the case of saturated cohesionless deposits), it is the stiffness rather than the strength of the soils that influences the nature of the surface motion. Site response analyses require characterisation of the soil stiffness and not the soil strength.

Then, at the top of p.21, the authors state that “*the Dost et al. (2004) GMPE is based on ground motion records measured directly on the local ground conditions*”, something that the analyses we have conducted—and shared with Arup—clearly demonstrated not to be the case. Although that equation was developed from recordings on soil sites in the northern Netherlands, it is well established that despite the widespread use of the time-averaged shear-wave velocity over the uppermost 30 m at the site,  $V_{s30}$  (which stems from boreholes often being limited to 30 m rather than any geophysical rationale), the ground motion depends on the stratigraphy over several 10s or 100s of metres, or even kilometres, at the site. The presence of the basal anhydrite layer in the Groningen field (whereas it is below the reservoir in the Roswinkel field from where the Dost et al. data were obtained) has been put forward as a viable explanation for the remarkable over-prediction of Groningen PGA data by the Dost et al. (2004) equation.

At the end of the second paragraph on p.21 there is a passing comment about work by TNO indicating that the local soils can amplify ground motions by factors of between 2 and 4. Does this refer to PGA? At what frequencies do these factors apply? Given the soft nature of these soils and the likelihood of nonlinear response, for what levels of motion do these amplifications apply? Most importantly, what are these amplifications relative to? In other words, a factor of 2 to 4 higher surface motions on the soil sites than motions at what locations or horizons? The statement as it currently stands is meaningless.

The value of the comment on anecdotal observations regarding site response at the start of the third paragraph on p.21 is not clear.

### **Chapter 3: Building Exposure**

As noted earlier in this review report, and also in previous meetings and review exercises, we believe the exposure work to be of very high quality, and not only commend Arup for it, but also strongly recommend for Arup to continue its good activities on this front. The comments below are thus of a relatively minor nature.

The occupancy modelling would probably warrant a few sentences in this Chapter, given its importance for casualty modelling. We understand that HAZUS casualty model requires the population in each usage category during the day and during the night to be estimated. Did the population data from Bridgis require further elaboration to get these figures? Although the work on the building database—documented briefly herein because it is covered in other Arup reports—is outstanding, it is difficult to assess the models for occupancy because it is limited. Given the fact that the report presents estimates of injuries and deaths this is an important omission.

## Chapter 4: Building Vulnerability

For the calibration of fragility functions, it is noted that the USGS ShakeMaps for the Roermond earthquake are based only on the ground-motion prediction equation. We actually understand that the macroseismic intensity values from Haak *et al.* (1994) were used as observations, and transformed to PGA values<sup>1</sup> in the ShakeMap using the equation by Wald *et al.* (1999).

The choice of the latter equation for converting the intensity measures of existing fragility functions is not explained, and the arguments defending the mathematically incorrect procedure of inverting the Wald *et al.* (1999) equation to obtain PGA from intensities are not tenable, not least because the variability in the relationship must also be propagated, as for PSI. If the authors need to convert from MMI to PGA, they could have made use of the more recent—and, by virtue of a large amount of small-magnitude data, potentially more applicable—relationship by Worden *et al.* (2012), which was derived in such a way as to be usable in either direction (*i.e.*, to obtain MMI from PGA or PGA from MMI).

The conversion of PSI to PGA, although done correctly from a mathematical perspective, is based on the equation of Spence *et al.* (1992), which was used because it is the only such correlation that is available. The relationship is based on a very small dataset, which could have led to an underestimated standard deviation, and its applicability here is not discussed at any point. Given the availability of fragility curves derived in terms of PGA, and the questionable applicability of the curves adopted by Arup (given that they are based on different building types and calibrated to much larger magnitude earthquakes), this additional level of uncertainty could have been avoided.

We assume that the same fragility functions presented in Section 4.8 are used for all building use types? We would suggest that a clarifying comment on this is made, as it could be necessary to differentiate the vulnerability of public buildings, schools etc. in future studies.

---

<sup>1</sup><http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/atlas/shake/199204130120/download/stationlist.xml>

Are the unreinforced masonry fragility functions (Section 4.8.1) for in-plane failure (or perhaps they cover both in-plane and out-of-plane as they are based on observed damage data)? This could be important to understand when comparing the results of analytical models with these empirical functions.

The fragility functions of the RC buildings (as presented in Figure 22 and Table 7) lead to more fragile buildings (for DS3, 4 and 5) than the 1920-1960 and post-1960's unreinforced masonry buildings. Whilst poorly designed and constructed RC moment frame buildings can behave very badly under seismic action, it is stated in the report "*most RC buildings in the Groningen area are expected to be shear wall buildings*". We also understand (from Table A.2) that the majority of these buildings are 1-3 storeys (and hence of a similar height to the unreinforced masonry) and were constructed after the 1980's. We would thus have expected these recently constructed, stiff, low-rise RC wall buildings to have a fragility that is at least lower than that of the older unreinforced masonry buildings. We would also have expected there to be a distinction between the fragility functions for the low rise (1-3 storey) and the mid-rise ( $\geq 4$ -storey) RC buildings. Although the percentage of these buildings within the exposure model might be small, we wonder if they may accommodate a not insignificant proportion of the population, especially during the day, and thus they might have an appreciable effect on the day-time losses.

The report contains the following phrase (p.35): "*These UK fragility functions for reinforced concrete buildings were developed in a consistent format with the Coburn and Spence (2002) fragility functions for unreinforced masonry*". We wonder if it would not have been better to take the reinforced concrete functions from Coburn and Spence (2002), for better consistency between the results of different building types? Indeed, it is earlier stated by the authors that "*It is therefore preferred to calibrate 'sets' of 'families' of fragility functions with available functions that cover the full range of adopted building typologies (i.e. a set of functions developed by the same authors using the same dataset), which can be validated based on the masonry data alone, and trust that the reinforced concrete buildings (and those of other materials) will be well-represented.*" In the end, however, the fragility functions for reinforced concrete and steel buildings were not taken from Coburn and Spence (2002).

It is noted that the results of the dynamic analyses in the Structural Upgrading study are not inconsistent with the results of Figure 24; we believe the citation should be to Figure 25?

## Chapter 5: Risk Calculation

The HAZUS methodology for population distribution and casualty estimation has been used in this report. We believe it is necessary to comment in this section on the other population distribution and casualty models available, and the potentially significant sensitivity of the results to this part of the analysis. In particular, the reasons for selecting the HAZUS approach for casualty estimation—beyond availability—should be discussed, given the potential impact of presenting casualty estimates that can be expected to cause very significant alarm.

## Chapter 6: Risk Assessment Calculation Results

The fact that the time of day does not affect the casualty results is quite surprising to us, given that a larger proportion of people are outside during the day. We were comparing, for example, Table 27 and 28 on page 62, and we noticed slightly higher SL=4 outcomes for day-time than night-time. We wonder what is giving rise to these similar figures? Is the day-time residential population very small, and is there an increase of the total population of the region during the day (that is then found predominantly within non-residential buildings, such as commercial buildings and schools)?

One question we have on this section is why the loss estimates obtained using the mean ground-motion level (which, unsurprisingly, lie between the losses estimated for the 50<sup>th</sup> and 84<sup>th</sup> percentiles of motion) are shown since they are not really discussed or used at any point.

At the end of Section 6.3.3 the casualty estimates based on 84<sup>th</sup> percentile ground motions are presented. The authors note that they are conservative, but that “*as noted previously, it is recommended that these higher casualty estimates are taken into consideration*”. What do the authors mean here?

We are not sure what is the objective of Section 6.4. We do not understand why the median number of buildings has been considered as the metric for presenting the results of the scenario assessment. One reason could be to show (indirectly) the influence of the ground motion variability on the distribution of losses, but in this case we would propose that the mean and standard deviation is presented, rather than the median. In Section 6.4.1 there is a reference to “*the mean number of damaged buildings*”, but we believe this should be the “median number of damaged buildings”.

Another comment on Section 6.4 concerns the results shown in Figure 42. The text above indicates that the simulations of the uncorrelated motions included samples of the variability up to 3 sigmas and above, whereas no indication is given regarding



the ranges of epsilon values covered by the simulations for the fully correlated case. This makes it rather difficult to interpret these results.

The modelling of the ground-motion field for a scenario earthquake by randomly sampling from the intra-event variability (with or without spatial correlation) is actually the correct approach for risk calculations with a distributed exposure, and certainly more coherent than using median or 84<sup>th</sup> percentile motions at all locations. We are not clear why Arup have explored such calculations but then made no use of them in their final conclusions.

The last section of this chapter refers to other casualty models. Some brief comments on the difference between these models and the one applied by the authors (from HAZUS) would be useful, given that they were not included in the sensitivity study. The motivation for choosing the HAZUS approach in preference to any of these other approaches is worthy of documentation.

The overview of small-magnitude damaging earthquakes in Section 6.6 is a useful idea but the limited level of information provided here reduces the value of this material. Nonetheless, as noted earlier, Arup do make the observation that their loss calculations do not seem to be reconcilable with any of these case histories, which is pertinent and relevant, but then this does not prompt them to question the validity or credibility of their model. A calibration or comparison with the case histories in the overview of small-magnitude damaging earthquakes would have strengthened the credibility of the overall analysis.

## **Chapter 7: Conclusions and Recommendations**

Subsection 7.2.1 is given the promising title of *Uncertainty Reduction by Research and Development*. The key point that it fails to make is that the necessary first step is to develop a comprehensive model for what the epistemic uncertainties actually are and to quantify them through analyses and appropriate experts judgements (rather than assembling a risk estimation calculation from readily available models), although it is recognised that such information may be available in other documents not available to the reviewers. When this has been done, the next stage is to conduct detailed and systematic sensitivity analyses (see, for example, Crowley *et al.*, 2005) to identify the absolute and relative influence exerted by the various uncertainties, in order to establish where it is worthwhile expending effort towards reducing uncertainties. To propose a list of activities—some of which are potentially very expensive and time-consuming—without such a framework is not appropriate.

## **Appendix B: Building Vulnerability**

There is an error in Equation (3), Section B5, as the “sigma” on the left-hand side of the equation should be squared.

In Section B6.1 a reference is made to Table A.4 which is not included in the report.

Does Figure B.4 come from Haak *et al.* (1994)?

## **Appendix C: Arup Ground Motion Duration Study**

One general observation that can be made from the outset is that we find it questionable to calibrate the simplified SDOF analytical model (aimed at representing the actual hysteretic behaviour of masonry buildings analysed as SDOF structures) on the basis of output from a complex Finite Elements analysis (of the ‘Villa’ structure) that, as the authors themselves point out, does not adequately consider several aspects of masonry response. This may have some influence on the very minor influence of duration that the authors end up finding, which does not match what has more generally been found in studies of the seismic performance of masonry (*e.g.*, Bommer *et al.*, 2004).

The finding of a limited influence for duration may also be influenced by the choice of ground-motion records used in the analyses, and in particular the accelerogram suite representing the “short-duration motions”. Although it is a seemingly convincing argument for using the magnitude of  $M_w$  4.7 from the PGV disaggregation rather than the  $M_w$  4.2 from the PGA disaggregation, for calibration of curves expressed in terms of PGA, the smaller magnitude would have been more correct by virtue of consistency. Even accepting this step, they then search for records from earthquakes in the range from  $M_w$  4.5 to 5.5, which is hardly centred on the chosen value (and hence the unsurprising result that the durations of the chosen records were skewed towards larger values). We are told that the 30 records with the shortest were then selected but these still remain biased high with comparison to their target (Figure C.1).

In Section C3.5 it is noted that DS5 was based on displacement at the level where “a large reduction in capacity occurred”. How do the authors define “large”? Although Arup consider a maximum displacement criterion for DS5, it is defined according to the reduction in capacity, and thus is consistent with the approach of Pinho and Crowley (2013). However, in order to appreciate how similar the two assumptions might or might not be, it would be necessary to know the reduction in capacity assumed by Arup for the definition of DS5.

The fragility functions (based on long duration records) presented in Figure C.9 lead to a median collapse capacity of over 2.5g which is twice the median collapse capacity of the functions used by Arup for unreinforced masonry (post-1960) buildings in the seismic risk study. We are comparing with the post-1960 masonry structures as we understand that the “Villa” model is closer to this category; if this assumption is wrong, the differences between the collapse capacities would be even higher. We wonder if similar conclusions on the reduced impact of short duration records would be obtained with models that produce fragility functions that are closer to those used in the study. Finally, we would have expected the study to have been carried out on the pre-1920s structures which are the most predominant structure and which are more likely to have stiffness and strength degrading behaviour.

#### **Appendix D: Detailed Results of the Risk Assessment Study**

We find some of the results presented in D11 rather confusing and difficult to interpret, and as mentioned before we believe interpretation of the mean damage/loss and standard deviation would be easier. We would have expected this section to also discuss and show that the standard deviation of the damage/loss is lower (and underestimated) when uncorrelated ground motions are used, and is much higher (and overestimated) when fully correlated ground motions are used.

## References

- Akkar, S., M.A. Sandikkaya and J.J. Bommer (2013). "Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East", *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s10518-013-9461-4, *in press*.
- Bommer, J.J. (2013). "Proposals for New GMPEs for the Prediction of PGA and PGV in the Groningen Gas Field", *Project Report*, 9<sup>th</sup> October.
- Bommer, J.J., G. Maegenes, J. Hancock & P. Penazzo (2004). "The influence of strong-motion duration on the seismic response of masonry structures", *Bulletin of Earthquake Engineering* **2**(1), 1-26.
- Bommer, J.J. & H. Crowley (2006). "The influence of ground motion variability in earthquake loss modelling", *Bulletin of Earthquake Engineering* **4**(3), 231-248.
- Chen, R., Branum, D.M. and Wills, C.J. (2013). "Annualized and Scenario Earthquake Loss Estimations for California", *Earthquake Spectra*, *early view*.
- Coburn, A. and Spence, R. (2002). *Earthquake Protection*, John Wiley and Sons Ltd, 2nd Edition, 420 pp.
- Crowley, H., J.J. Bommer, R. Pinho & J.F. Bird (2005). "The impact of epistemic uncertainty on an earthquake loss model", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **34**(14), 1635-1685.
- Crowley, H. & J.J. Bommer (2006). "Modelling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure", *Bulletin of Earthquake Engineering* **4**(3), 249-275.
- Haak, H.W., van Bodegraven, J.A, Sleeman, R., Verbeiren, R., Ahorner, L., Meidow, H., Grunthal, G., Hoang-Trong, P., Musson, R.M.W., Henni, P., Schenkova Z. and Zimova, R. (1994) "The macroseismic map of the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands," *Geol. Mijnbouw*, v. 73.
- Pinho, R. and Crowley, H., (2013) "Preliminary fragility functions for unreinforced masonry building types within the Groningen region". Version 2. 25 September 2013
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. and Kanamori, H. (1999) "Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California," *Earthquake Spectra*, v. 15, no. 3, p. 557-564.
- Worden, C.B., Gerstenberger, M.C., Rhoades, D.A. and Wald, D.J. (2012) "Probabilistic relationship between ground-motion parameters and Modified Mercalli intensity in California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vo.102, no. 1, pp. 204-221.

**Report on the expected PGV and PGA values for induced  
earthquakes in the Groningen area**

**Bernard Dost, Mauro Caccavale, Torild van Eck, Dirk Kraaijpoel**

**KNMI  
December 2013**

## Summary

Recent developments in the analysis of seismic activity of the Groningen gas field showed that the estimated maximum magnitude for induced events in the region can be higher than previously thought ( $M_{\max} > 3.9$ ). A preliminary new value for the  $M_{\max}$  was estimated at  $M=5$ . This report presents the results of an analysis of the expected peak ground velocities (PGVs) and peak ground accelerations (PGAs) assuming a maximum magnitude  $M=5$ .

Selection of the most appropriate ground motion prediction equation (GMPE) for the Groningen area is a key issue in the analysis. Since there is no known natural seismicity in the region and recorded induced seismicity is limited to  $M \leq 3.6$ , relations based on shallow earthquakes from other regions have been evaluated. The selected GMPE, based on shallow earthquakes from Europe and the Middle-East, has been modified to fit recorded PGAs and PGVs in Groningen for 8 induced events and was adopted as a reference model for Groningen. The model includes a correction factor for a shallow low velocity layer, which is present in the region.

Based on this new GMPE for Groningen and a selection of the source region, deterministic scenario's are calculated for a  $M=5$  event. The source region was selected based on the occurrence of previous events with  $M \geq 3$  and contours of the highest median PGV and PGA are presented. The highest median value for PGV is 10.5 cm/s and for PGA 0.2g.

In addition, a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) was carried out. Induced seismicity in Groningen shows a time varying pattern and increases with increasing production. This non-stationary character has been taken into account by estimating the increase in seismicity rate for the next five years, since there is no resolved change in the b-value of the Gutenberg-Richter relation for the region over time. The maximum magnitude is one of the parameters in the PSHA. A re-evaluation of the estimation of this parameter for Groningen did not result in a reliable new value, so  $M_{\max}=5$  was used in the analysis. Results are shown as PGA and PGV contours for a 10% probability of exceedance in 50 years. The maximum PGA value is 0.42g and the maximum PGV is 16 cm/s.

Uncertainties in the parameters used in the PSHA are high and this results in a possible overestimation of the hazard. Further research is focused on reducing the uncertainties in these parameters.

## Introduction

The largest recorded induced earthquake in the Netherlands,  $M_w = 3.6$ , occurred August 16, 2012 near Huizinge in the province of Groningen at a depth of 3 km. This event caused over 3000 damage claims in the region and a re-assessment of the seismic hazard for the region was made based on recorded induced seismicity data up to September 2012 (Dost and Kraaijpoel, 2013; Muntendam and de Waal, 2013). One of the conclusions was that the maximum probable magnitude ( $M_{max}$ ) for the Groningen field could not be reliably assessed from the data. Due to the sparse dataset, previous estimates of  $M_{max}$  were based on seismicity data for all gas producing fields in the Netherlands together. Comparison with induced seismicity in other hydrocarbon fields in the world led to the conclusion that  $M_{max}$  was not expected to exceed a magnitude 5. The current report investigates the expected ground motion in the Groningen area due to a magnitude 5 earthquake.

As a first step, the most appropriate Ground Motion Prediction Equation (GMPE) will be selected. A GMPE relates magnitudes to peak ground velocities (PGV) and peak ground acceleration (PGA) and forms one of the basic building blocks in seismic hazard calculations. Existing GMPEs are usually constructed for earthquakes of magnitude larger than 5, while in the Groningen area we have measured PGV and PGA values only for events of  $M \leq 3.6$ . Extrapolation from large to small earthquakes, using empirical GMPEs, have the tendency to overestimate the PGA and PGV values (Bommer et al., 2007), which was also concluded in the derivation of an attenuation relation for shallow events in the Netherlands (Dost et al., 2004).

A second step is the selection of the source area where a magnitude 5 earthquake can be expected. The driving force behind the occurrence of hydrocarbon induced seismicity is thought to be (differential) compaction of the reservoir (e.g. Dost and Haak, 2007). In addition Van Eijs et al. (2006) found that fault density and the ratio in Young's moduli between overburden and reservoir are key indicators for the occurrence of seismicity in the gas fields in the Netherlands. This implies that compaction, fault density and the ratio of the Young's moduli play an important role in the definition of the source region.

In addition to a deterministic scenario for a magnitude 5 earthquake, also results from a probabilistic hazard analysis will be included. These results are presented in terms of a 10% probability in 50 years to exceed PGA and PGV values, or its equivalent a return period of 475 years.

The last step to convert the PGA or PGV values for Groningen into Intensities has not been carried out in this report. Existing relations developed for other regions have been evaluated. Since this conversion adds a very large uncertainty and there is an urgent need to have PGA and PGV estimates as input for other research topics (e.g. quick-scan), this report will be limited to a presentation of contour plots of the expected PGA and PGV values.

## Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)

In the Groningen area a rather limited dataset is available of recorded (peak) ground motions for magnitudes  $M \leq 3.6$ . No reliable local ground motion measurements are available to constrain the ground motion for  $M > 3.6$  and therefore empirical GMPEs are evaluated based on data from other seismic areas with some similarity to our local situation.

Bommer (2013a) compiled a set of GMPEs that may be relevant for the Groningen region and presented a revised set of selection criteria with respect to earlier work on this topic (Bommer et al., 2010). The focus is on horizontal components of motion.

Important criteria are:

- Magnitude range used
- Horizontal component definition
- Magnitude scale
- Distance metric
- Site classification

Since this research is focused on shallow events,  $< 5$  km depth, of magnitude  $3.5 < M < 5$ , GMPEs should preferably include at least this magnitude range. Although recently there is a tendency to include smaller magnitudes in the GMPEs, application of this criterion alone limits the number of available models to 16 (Bommer 2013a). Although in general the geometric mean of the two horizontal components is used in the definition of the PGA and PGV values, some models use the larger component or even the largest of three components. A number of GMPEs do not specify which definition of the horizontal component was used, thus adding a degree of uncertainty since different definitions can yield peak motions varying by 10-15% (Beyer & Bommer, 2006). As a distance metric the hypocentral distance ( $R_{hyp}$ ) is preferred, which means that earthquakes are regarded as point sources. This is in line with the requirements of initial hazard models based on the selected GMPE. Bommer et al. (2012) show that the key issue in seismic hazard analysis is consistency between the distance metric in the GMPE and the way earthquakes are represented in the seismicity model. In addition Bommer et al. (2010) mention that the use of  $R_{hyp}$  as distance metric becomes inappropriate for larger earthquakes associated with fault ruptures of tens or even hundreds of kilometres in length. Most important in the selection was the issue of site classification. Models based on only a limited number of site classes were rejected, since they are difficult to adopt for the northern Netherlands. Also, models only predicting motions on hard rock sites were rejected.

Especially the last criterion reduced the total number of models to the Chiou et al. (2010) model (C10) and the Dost et al. (2004) model (D04). Since the C10 model uses a different distance metric,  $R_{rup}$ , being the distance to the closest point on the rupture plane, which is difficult to estimate for larger recorded events in the Groningen field, it was decided to use the D04 model in initial hazard calculations. Rupture dimensions of the larger recorded events are small enough for  $R_{hyp}$  to be used as a surrogate. However, for extrapolation to higher magnitudes the D04 model does not include an appropriate non-linear scaling effect and will, most likely, overestimate PGV and PGA. Bommer (2013a) proposed to modify D04 to include this non-linear scaling following a newly developed model for Europe and the Middle East (Akkar et al., 2013), based on shallow earthquakes and includes short distances. This last model is based on a magnitude range  $4 < M_w < 7.6$ , is developed for the geometric mean of the horizontal components and for different distance metrics, including  $R_{hyp}$ . In addition it has a similar site classification as the C10 model and qualifies as an additional model in this analysis.



In the construction of a general GMPE for induced seismicity in geothermal areas, Douglas et al. (2013) used data from the Roswinkel gas field, a small field south-east of the Groningen field, combined with acceleration data from other sources of induced seismicity in very different tectonic environments. They produce two types of models: uncorrected and corrected for site effects. The uncorrected model provides an average value over a large variation of shallow structure. As a consequence the variance is large. The corrected version will need the addition of shallow structure, which means that site amplification effects need to be added, since the adjusted Douglas et al. (2013) equations are referenced to hard rock sites ( $V_{s30} > 1$  km/s). This information is not available for Groningen. Therefore, it was decided not to use this model, which was also recommended by Bommer (2013a).

Based on these considerations, two models have been selected: the local model by Dost et al. (2004), referred to as D04, and the European model of Akkar et al. (2013), referred to as ASB.

## Model characteristics

### D04

This model is partly based on measured accelerations near the Roswinkel gas field and on an attenuation relation calculated for the determination of  $M_L$  using the regional borehole network in the north of the Netherlands (Dost and Haak, 2007). The distance metric is  $R_{hyp}$ , the definition of horizontal components is the geometric mean of the rotated components and for the magnitude  $M_L$  was selected, assuming an equivalence of  $M_L$  and  $M_w$  for the small magnitudes ( $M \leq 3.9$ ) used.

The relation for PGV is:

$$\log(PGV) = -1.53 + 0.74M_w - 0.00139R_{hyp} - 1.33 \log(R_{hyp}) + \epsilon \sigma \quad [1]$$

PGV in cm/s and  $R_{hyp}$  measured in km,  $\epsilon$  is the standard normalised residual and  $\sigma$  is the standard deviation. The D04 model shows a linear dependence on magnitude. Since most models based on larger magnitude events show a saturation of the PGV levels, Bommer (2013) proposed a modification of the D04 model. This modification was constructed by comparison with the ASB model. For  $M \geq 4.5$ , equation [1] is replaced by:

$$\log(PGV) = -1.3972 + 0.7105M_w - 0.0829(M_w - 4.5)^2 - 0.00139R_{hyp} - 1.33 \log(R_{hyp}) + \epsilon \sigma \quad [2]$$

The relation for PGA is:

$$\log(PGA) = -1.41 + 0.57M_w - 0.00139R_{hyp} - 1.33 \log(R_{hyp}) + \epsilon \sigma \quad [3]$$

PGA in  $m/s^2$ . Modified along similar lines as for PGV (pers. comm., Bommer, 2013):

$$\log(PGA) = -1.609 + 0.614M_w - 0.1116(M - 4.5)^2 - 0.00139R_{hyp} - 1.33 \log(R_{hyp}) + \epsilon \sigma \quad [4]$$

Standard deviation for both relations is  $\sigma = 0.33$ . Since most other relations are in the natural logarithm (ln), the equivalent in ln is equal to  $\sigma/\log(e) = 0.76$ .

## ASB

This model is the latest generation ground motion models based on pan-European databases. The model includes a non-linear site amplification function that is a function of  $V_{s30}$  and is based on a dataset containing events with a minimum magnitude of  $M_w=4$ . All earthquakes in the database used are shallower than 30 km and 20 events have a depth shallower than 5 km and a normal faulting mechanism, which is the assumed dominant mechanism in Groningen. The model is developed for a number of distance metrics ( $R_{epi}$ ,  $R_{hyp}$ ,  $R_{jb}$ ) and uses the geometric mean of the unrotated horizontal components.

The equation used is:

$$\ln(X) = \ln(X_{REF}) + \ln(S) + \epsilon\sigma \quad [5]$$

where X can be PGV or PGA and

$$\ln(PGV_{REF}) = 6.72743 + 0.0029(M_w - 6.75) - 0.11474(8.5 - M_w)^2 + [-1.17694 + 0.2529(M_w - 6.75)] \ln(\sqrt{R^2 + 7.5^2}) - 0.0616F_N + 0.063 \quad [6]$$

$$\ln(S) = -0.72057 \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right) - 0.19688 \ln\left(\frac{PGA_{REF} + 2.5\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^{3.2}}{(PGA_{REF} + 2.5)\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^{3.2}}\right) \quad [7]$$

$PGA_{REF}$  is calculated using

$$\ln(PGA_{REF}) = 3.26685 + 0.0029(M_w - 6.75) - 0.04846(8.5 - M_w)^2 + [-1.47905 + 0.2529(M_w - 6.75)] \ln(\sqrt{R^2 + 7.5^2}) - 0.1091F_N + 0.0937F_R \quad [8]$$

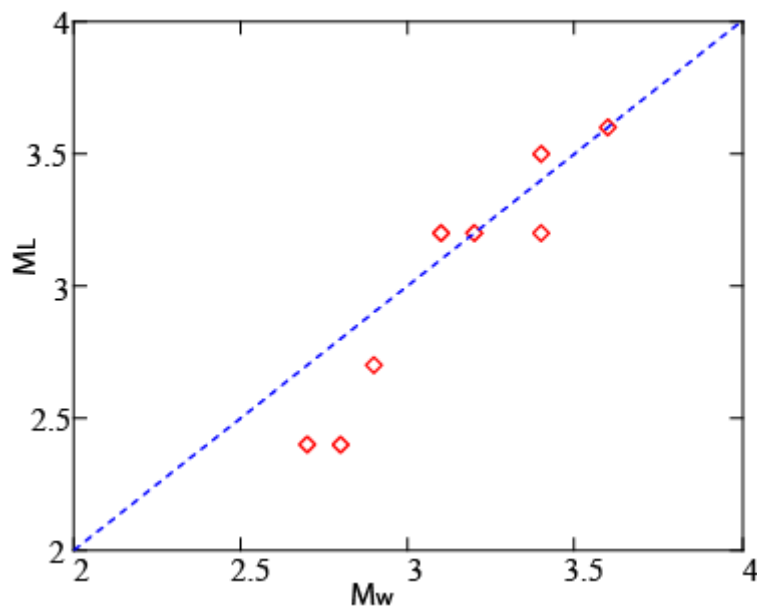
$$\ln(S) = -0.41997 \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right) - 0.28846 \ln\left(\frac{PGA_{REF} + 2.5\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^{3.2}}{(PGA_{REF} + 2.5)\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^{3.2}}\right) \quad [9]$$

In these equations R is the hypocentral distance,  $F_N$  and  $F_R$  are unity for normal and reverse faults respectively. The  $V_{REF}$  is defined at 750 m/s and the average  $V_{s30}$  for Groningen is around 200-300 m/s. The variance is specified for PGV ( $\sigma=0.71$ ) and for PGA ( $\sigma=0.7347$ ). The units of the predicted quantities are [g] for PGA and [cm/s] for PGV.

## Magnitudes

Local magnitudes ( $M_L$ ) of induced earthquakes in the Netherlands are calculated using an empirical attenuation function, derived on the basis of Wood-Anderson simulated recordings of 200m deep borehole sensors in the region (Dost et al., 2004). In the GMPEs both  $M_w$  and  $M_L$  are used and for small events,  $3 < M < 5$ , it is assumed that  $M_L = M_w$  (Hanks and Boore, 1984; Deichmann, 2006). The latter showed that for  $M_w < 2$ ,  $M_L$  is expected to be systematically underestimated.

Bommer (2013a) discussed this issue in relation to the Douglas et al (2013) findings that for Roswinkel data a relation between both magnitudes was developed:  $M_w = 0.578 * M_L + 1.168$ , based on measured  $M_w$  values using an automated procedure. Although in this procedure the regional very low Q values ( $20 < Q < 80$ ) and high values for the site attenuation factor ( $0.02 < \kappa < 0.05$ ) have not been taken into account, the outcome inspired to process the available data for Groningen.



**Figure 1 . Comparison of measured  $M_w$  and  $M_L$  data for events located in the Groningen field**

Figure 1 plots the results, using the same model parameters as in Dost and Kraaijpoel (2013). Results seem to corroborate the findings of Hanks and Boore (1984), although the dataset needs to be enlarged. Bommer (2013a) investigated the effect of the magnitude conversion proposed for the larger magnitudes, but concluded this would lead to unrealistic PGV values. It should be noted that the D04 model does not include saturation for the larger magnitudes.

### Horizontal component definition

The D04 model is based on the geometric mean of the rotated components of measured accelerations. Other models, including the ASB model, use the unrotated components. Although the difference may not be very large, we investigate the difference for the measured accelerations of the Huizinge event.

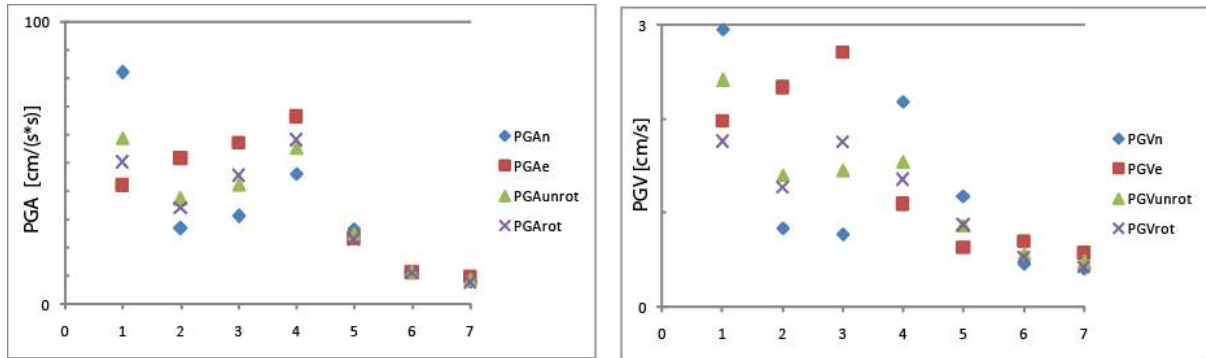


Figure 2. Left: Unrotated (PGAunrot) and rotated (PGArrot) PGA geometrical mean values, compared with the original unrotated PGA measurements. Right: same for PGV.

From the left panel in Figure 2 it is clear that there is a difference in PGA, especially for the larger values. For this event the maximum difference in PGA is 17% and this should be taken into account. The same for PGV shows a similar result with even larger difference up to 37% for the largest motion. This was recorded in station Middelstum-1 (MID1) at a hypocentral distance of 3.2 km. Due to a highly polarized signal, the geometric mean of the two rotated components gives a smaller value than the original measured NS and EW components.

### Decomposition of the standard deviation

Bommer (2013a) discusses the necessity to decompose the standard deviation in the GMPEs into an inter- and intra-event (or between- and within-event) component, a requirement when calculating the hazard – and risk- at multiple locations simultaneously. The between-event component ( $\tau$ ) reflects differences in source features, while the within-event component ( $\phi$ ) reflects azimuthal differences in radiation pattern, travel path and subsurface structure.

The D04 model only delivers a total standard deviation and Bommer (2013a) proposes to use a ratio  $\phi/\tau = 2$ , based on a comparison with other published models. This leads to:

$$\tau = 0.1476 \quad \text{and} \quad \phi = 0.2952 \quad \text{and} \quad \sigma = \sqrt{\tau^2 + \phi^2},$$

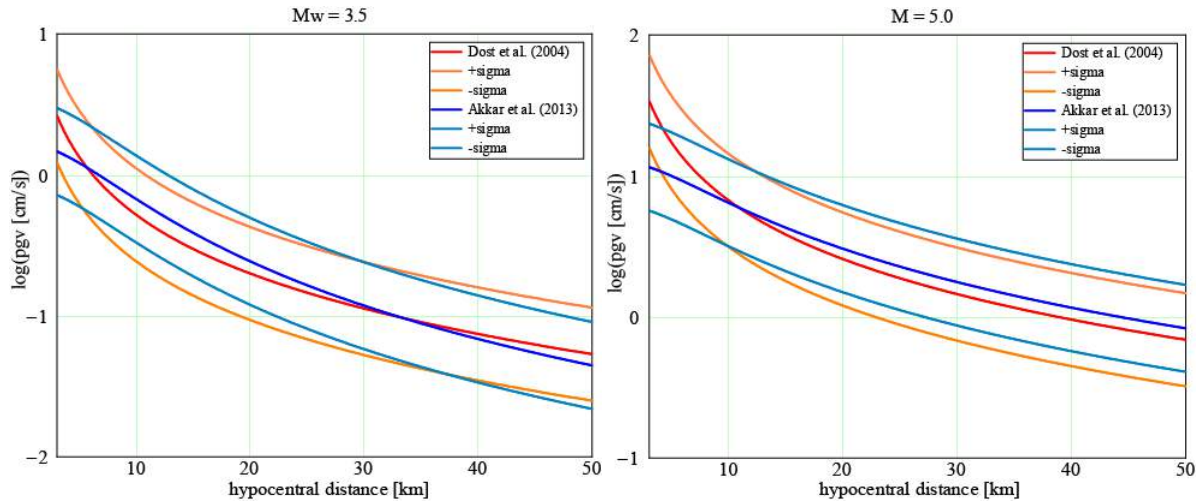
where  $\sigma$  is the standard deviation of  $\log(\text{PGV})$ . The same is valid for  $\log(\text{PGA})$ . For  $\ln(\text{PGV})$  the values are:  $\tau = 0.3399$  and  $\phi = 0.6798$  ( $\sigma = 0.76$ )

In the ASB model the total standard deviation is decomposed in terms of  $\tau$  and  $\phi$ :

For  $\ln(\text{PGV})$ :  $\tau = 0.3312$  and  $\phi = 0.6280$  ( $\sigma = 0.71$ )  
 For  $\ln(\text{PGA})$ :  $\tau = 0.3472$  and  $\phi = 0.6475$  ( $\sigma = 0.7347$ )

**Model validation - PGV**

Both remaining GMPEs are dependent on hypocentral distance and magnitude. First their relation with hypocentral distance is investigated. Figure 3 shows both models for two selected magnitudes:  $M_w=3.5$  can be compared to measured accelerations in the region (validation) and  $M_w=5.0$  is the target magnitude. Both the median value and the median  $\pm\sigma$ , the standard deviation, are shown for each model. Results are shown for the uncorrected version of the D04 model.



**Figure 3. Log(PGV) as a function of hypocentral distance for two selected models (D04 and ASB) for  $M_w=3.5$  (left) and  $M_w= 5.0$  (right). Models are shown including their standard deviation  $\sigma$ .**

Both models are comparable and start to deviate for small hypocentral distances. For  $M_w=5.0$  the differences are pronounced for  $R<10$  km, while for  $M_w=3.5$  this distance is reduced to  $R<5$  km.

Important in the evaluation of these GMPEs is the calibration with existing data. In Figure 4 both models are shown together with the PGV data from the 2012 Huizinge event. In Dost and Kraaijpoel (2013) the values for the epicentral distance are given with respect to the original location based on the borehole data and only arithmetic mean values are listed. In Table 1, we give updated values with respect to the final epicentre and provide geometrical mean values for PGA and PGV values. Please note that data from station FRB2 are not included due to suspected malfunctioning of the instrument.

Station	PGAr hor. [cm/s <sup>2</sup> ]	PGVr hor. [cm/s]	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]	Epic dist. [km]	Hypoc. dist. [km]
MID1	50.5	1.76	58.8	2.41	1.2	3.2
KANT	34.2	1.28	37.3	1.40	2.7	4.0
WSE	45.6	1.76	42.4	1.45	3.7	4.8
GARST	58.3	1.36	55.5	1.55	4.1	5.1
STDm	22.9	0.87	25.1	0.86	5.2	6.0
WIN	11.0	0.52	11.4	0.57	7.6	8.2
HKS	7.8	0.43	8.8	0.48	11.0	11.4

**Table 1. Measured geometric mean horizontal values of PGA and PGV for the 120816 Huizinge event. Both the rotated (PGXr) and unrotated (PGX) values are given, where X equals A or V.**

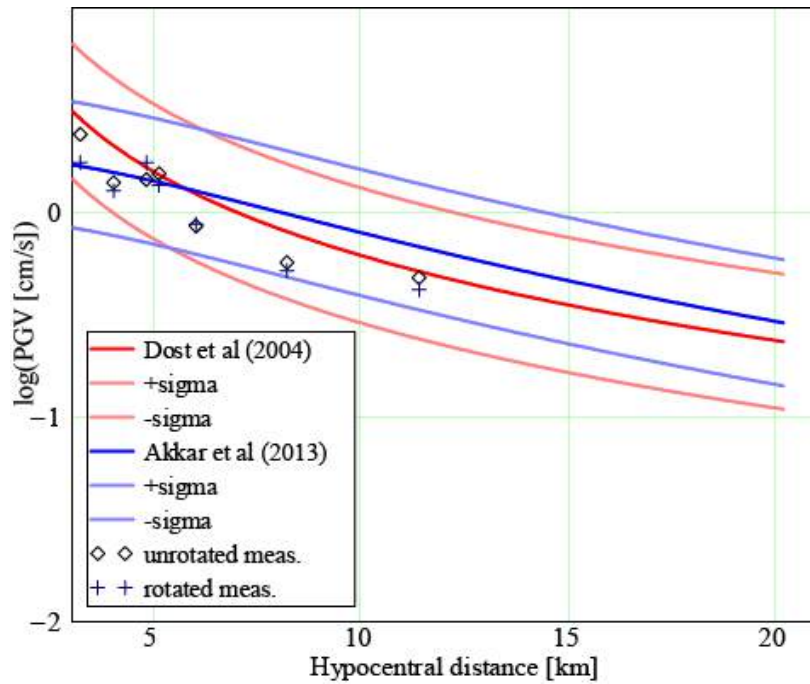


Figure 4. Log(PGV) as a function of hypocentral distance for selected models compared to measured values of the 120816 Huizinge event. Both unrotated and rotated measurements are shown.

Although the measurements in Figure 4 do not seem to support the large increase in PGV at  $R < 5\text{ km}$  in the D04 model, this should be investigated using a larger dataset. Since the D04 model is based on polarized recordings, polarized (rotated) measurements (+) should be compared to the model output, while unpolarized data should be compared to the ASB model.

In Figure 5 both models are compared with respect to their magnitude dependence. The effect of the linear dependence of magnitude in D04 is clearly seen at the high magnitude level. Differences between the GMPEs are mainly restricted to the lower values of  $R$ .

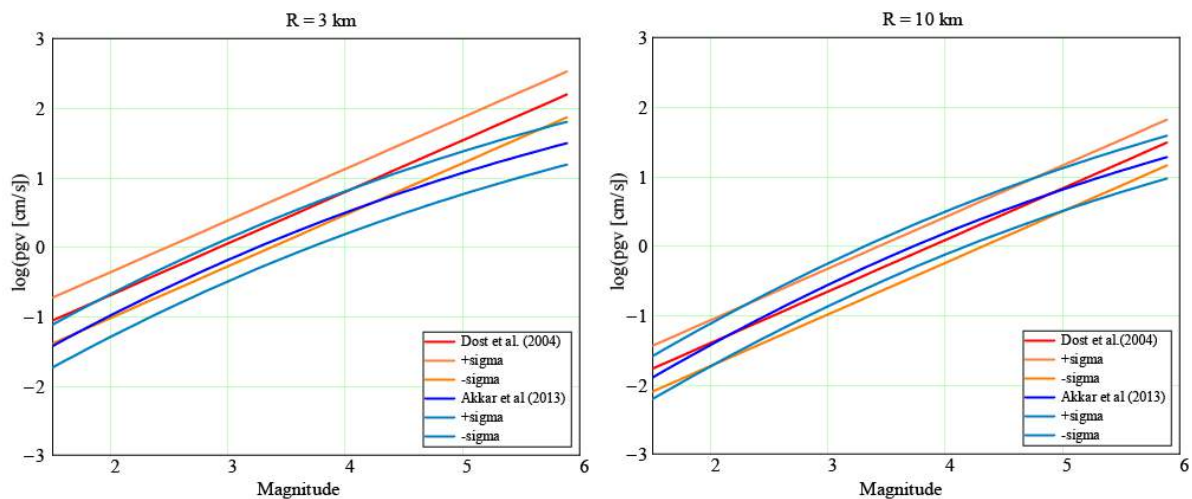


Figure 5. Comparison of the selected GMPEs (D04 and ASB) as a function of magnitude for  $R=3\text{ km}$  (left) and  $R=10\text{ km}$  (right).

Model validation - PGA

Similar to the PGV calculations, Figure 6 shows the relation between PGA and hypocentral distance for selected magnitudes.

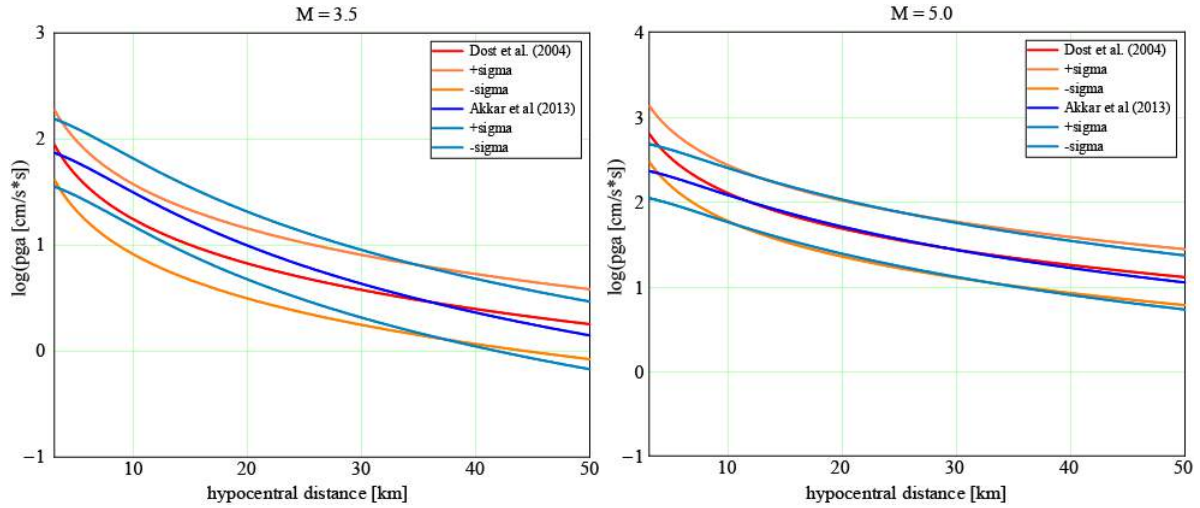


Figure 6. Log(PGA) as a function of hypocentral distance for two selected models (D04 and ASB) for  $M_w=3.5$  (left) and  $M_w=5.0$  (right).

For the low magnitude  $M_w=3.5$ , the amplitude attenuation with distance is much more pronounced in the PGA case, compared to the PGV. For  $M_w=5.0$  both models provide similar output, except for the short distances ( $R < 10$ km).

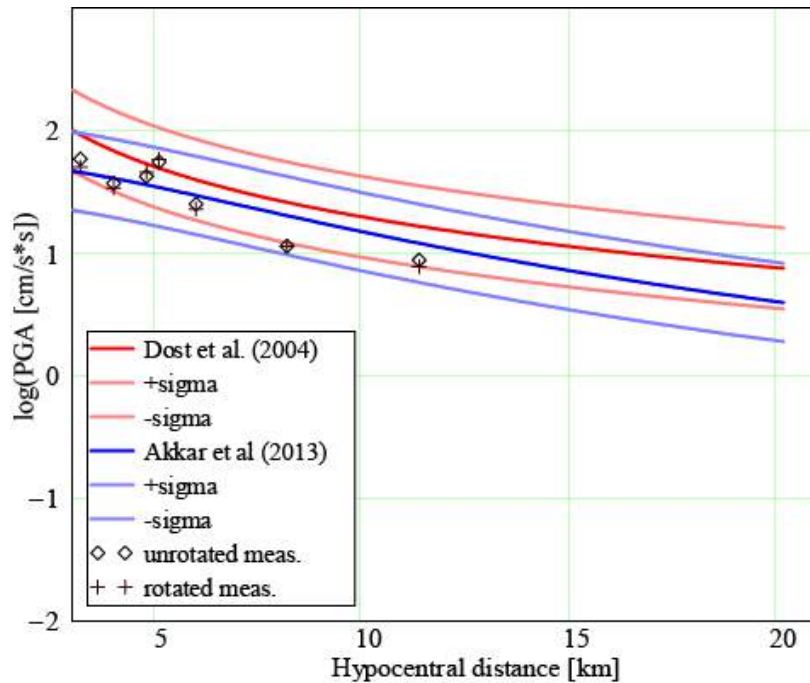


Figure 7. Measured acceleration data (PGA) from the Huizinge event compared to models D04 and ASB. For the ASB model  $V_{s30}=200$ m/s is used.



Figure 7 shows the fit of the measured accelerations to the selected models. Similar to the conclusions for PGV, the PGA measurements do fit both models reasonably well. As discussed before, there is less difference between the polarized and unpolarized measurements and there is no indication for a strong increase in PGA or PGV at small values of R.

Comparison of both D04 and ASB with existing acceleration data for Groningen shows that the ASB model is the preferred starting model for hazard calculations. Both D04 and ASB models fit the data reasonably well, but there are two main problems with the D04 model. Due to the availability of data from only small magnitude events D04 cannot be used to provide reliable estimates of PGV and PGA for larger events, although modifications based on the ASB model are proposed by Bommer (2013b) to overcome this problem. The second issue is the large increase of the PGV and PGA value at short distances, which is regarded as unrealistic (Bommer, 2013b). Comparison with the data from the Huizinge event showed that there is no need to include such an increase to explain the data. In addition Korff et al. (2013) showed that the recorded acceleration spectra in Groningen fit well with the predicted values using the ASB model. Thus suggesting that shallow induced events can be modelled similar to tectonic events.

An extension of the acceleration database was prepared, consisting of recordings from seven other events that occurred in the Groningen field. Bommer (2013b) evaluated the dataset, found that a] the ASB model overestimates the PGA and PGV measurements and b] the model shows a trend with magnitude and proposed a modification to the model to fit the data. For events of  $M_w \leq 4.2$  the modification for PGA is:

$$\ln(PGA_{REF}) = -3.161825 + 1.5029M_w - 0.04846(8.5 - M_w)^2 + [0.55634M_w - 4.460575] \ln\left(\sqrt{R^2 + (2.593M_w - 3.389)^2}\right) \quad [10]$$

For PGV the threshold magnitude is  $M_w$  3.8 and the modification:

$$\ln(PGV_{REF}) = 1.136255 + 1.4529M_w - 0.11474(8.5 - M_w)^2 + [0.480586M_w - 3.749226] \ln\left(\sqrt{R^2 + (3.043M_w - 4.065)^2}\right) \quad [11]$$

The residuals of the Groningen data with respect to the proposed modifications are small and do not show significant trends with distance or magnitude. In addition the relations for the higher magnitudes did not change. The estimated variance in both modified relations is  $\sigma = 0.4$ . These modified relations are preferred for hazard assessment. It should be kept in mind that the PGA and PGV values for magnitudes larger than the thresholds mentioned are not constrained by any data from Groningen or the Netherlands. The dataset used to construct the ASB model includes shallow events and  $V_{s30}$  values comparable to measured  $V_{s30}$  in Groningen and is therefore assumed to be representative for Groningen.

## Deterministic PGV and PGA contours for Groningen

For the construction of a PGV or PGA contour map in the Groningen area due to an  $M_w=5$  in the region, a selection of the source region should be made. Different options are considered, assuming only an  $M=5$  event will be generated:

- along one of the larger faults systems in the region that are known from 3D seismics. The source region could be defined by mapped faults that have shown to be re-activated.
- at a threshold level of compaction
- at locations where in the past  $M \geq 3.0$  earthquakes have been recorded

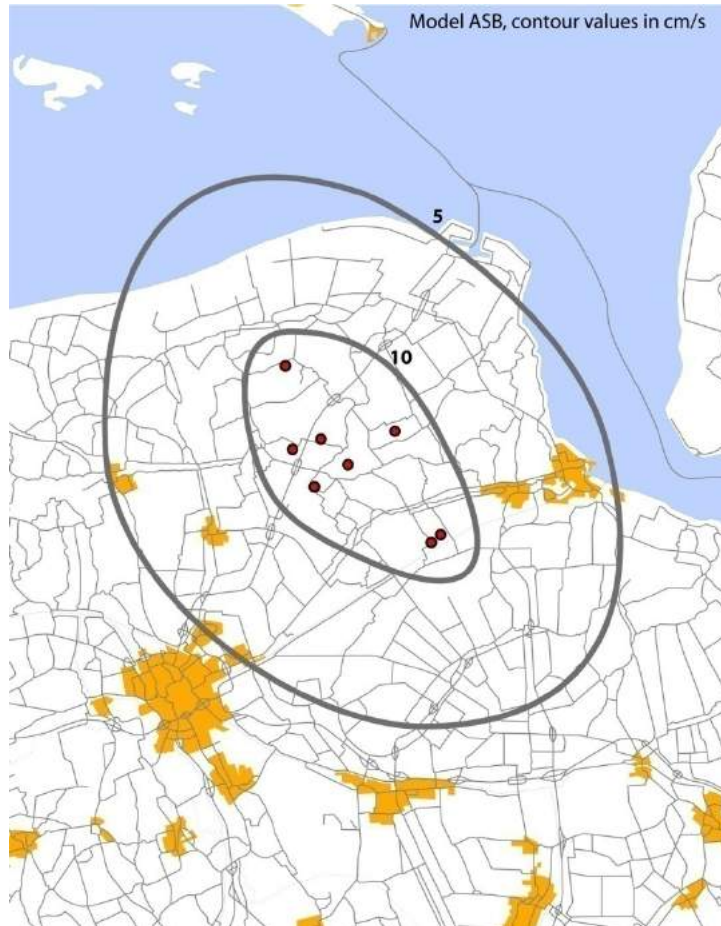
The first option could be considered, since larger fault systems in the region are mapped. However, the location of the induced earthquakes has limited accuracy in the horizontal plane (0.5-1 km) and around 2 km in the vertical plane, due to the existing sparse network in the region. The seismicity patterns seem to line up with existing faults, but this cannot be quantified and fault re-activation studies are being carried out at this moment. The empirical relationship of Wells & Coppersmith (1994; Table 2A), relating subsurface rupture length to magnitude, suggests that an  $M=5$  earthquake would only require a total rupture length of 3.2 km. However, for shallow earthquakes in weak sediments the shear modulus is small and therefore a given seismic moment is reached by either larger slip or a larger source area (e.g. Cesca et al., 2011)

The second option to use the compaction model of the Groningen field and impose a minimum level of compaction needed to create larger events is a valid alternative. However, since Van Eijs et al. (2006) showed a correlation between fault density and seismicity, it is recommended to combine both compaction and fault density or the existence of large faults.

In this report we selected the third option as a starting point, mainly because of limitations in applying either of the other two, which may be updated if more information is available to use either of the two other options. There is an implicit assumption that the spatial distribution of earthquakes is stationary in time.

**Deterministic PGV contour**

Figure 7 shows the contours of the highest median PGV value due to any  $M=5$  earthquake in the area spanned by the historic  $M \geq 3$  earthquakes. Although an unrealistic scenario, it provides an overview in one Figure. An alternative is to provide a separate figure for each possible source.



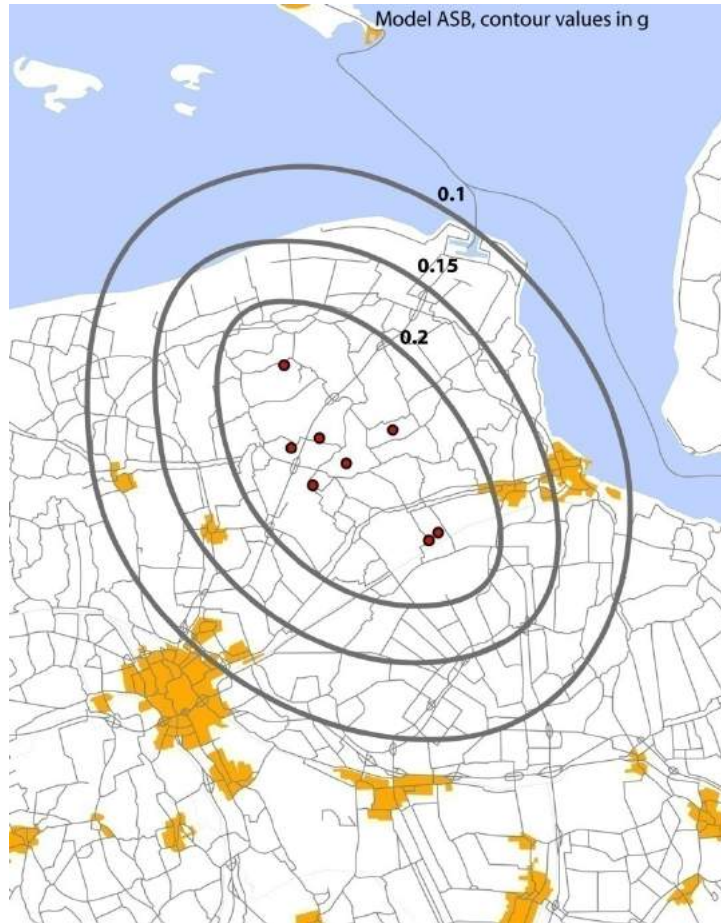
**Figuur 7. Contours for the highest median PGV due to a  $M_w=5$  event in the area spanned by the location of historical  $M \geq 3$  events. Seismic sources are indicated as red circles, contours as grey lines. Median values are shown in cm/s.**

The figure was constructed by calculating the radius of the selected contours, using the ASB model, applying circles with this radius to all seismic sources and to contour the envelope of the combined set of circles.

The contours are based entirely on median predictions from the model equations. Addition of one standard deviation provides approximately a factor two increase in the PGV and PGA values. The maximum PGV value in Figure 7 is 10.5 cm/s. Lower and upper limits for the maximum PGV (median  $\pm \sigma$ ) are: 5.2 cm/s and 21.3 cm/s.

**Deterministic PGA contour**

Figure 8 shows similar contours for PGA. Values are given in  $[g]^1$  instead of  $cm/s^2$ , which was used in the rest of the text. This was requested by other research groups that will be using these preliminary results in their study.



**Figuur 8. Contours for the highest median PGA due to a  $M_w=5$  event in the area spanned by historical  $M \geq 3$  events. Seismic sources are indicated as red circles, contours as grey lines. Median values are shown in g.**

Both the PGV and PGA contours have been constructed using a  $V_{s30} = 300$  m/s. Lowering this value to 200 m/s will increase the PGV value by 10% and decrease the PGA by approximately the same amount. The assumed style-of-faulting for the region is normal. In Figures 7 and 8 this means a maximum shift in the contours of ca 2 km and quantifies the uncertainty of the median value contours due to variations in the  $V_{s30}$  parameters. The maximum PGA value in Figure 8 is 0.26g. Lower and upper limits for the maximum PGA (median  $\pm \sigma$ ) are: 0.13 g and 0.55 g.

In an integration of recent studies on seismic hazard of induced earthquakes in the Netherlands, Wassing and Dost (2012) provide an overview of soil categories in a site response map (Appendix 3, map 3). For the Groningen area two classes are of importance: “weak” soil ( $V_{s30} \leq 200$  m/s) in the north-west of the Groningen gas field and “stiff” soil ( $V_{s30} > 200$  m/s) to the south-east. Although only little information on measured  $V_{s30}$  in the region has been published, the contours shown in Figure 7 and 8 may provide a lower limit of the expected PGV and an upper limit for the PGA value in the region.

<sup>1</sup> 1 g= 981  $cm/s^2$

## Probabilistic seismic hazard assessment (PSHA)

Van Eck et al. (2004, 2006) published a first probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) for the Groningen field, based on recorded induced seismicity data for the period 1991-2003. The authors used the method originally proposed by Cornell (1968) and further developed by Cornell and Mertz (1975). In this method the probability of exceeding a specified ground motion at specific locations is calculated. The deterministic approach in the previous chapter provides specific scenarios, while the PSHA approach integrates over magnitude and distance, weighted by appropriate probability density functions.

The method requires characterization of the seismicity in the region and a proper attenuation relation (GMPE). An alternative method, based on a model relating gas production induced strain to earthquake activity was developed by Bourne & Oates (2013). Their PSHA calculations are based on a Monte Carlo simulation.

PSHA results will be used in a national guideline (NPR), currently in development by the Netherlands Standardization Institute (NEN), and later included in the national annex for Eurocode 8.

## Seismicity

The dataset used by Van Eck et al. (2004, 2006) was limited to 54 events of  $M_L \geq 1.5$  out of a total of 179 recorded events for the Groningen field. This dataset is now extended to 01-10-2013 and contains 195 events of  $M_L > 1.5$ . The classic PSHA method assumes seismicity to be a stationary Poisson process. In Groningen, however, the process is shown to be non-stationary.

Figure 10 shows the cumulative number of events and the annual number of events in the Groningen field per year. The cumulative number of events shows a linear trend in the log scale, which relates to an exponential growth. The annual number of events shows considerable fluctuations in time, as expected in a Poisson process. However, from 2003 on, a positive trend becomes apparent. Therefore, Dost and Kraaijpoel (2013) separated the database in two time intervals, 1991-2003 and 2003-2012. A comparison of the Gutenberg-Richter frequency-magnitude distribution calculated for the two time intervals showed that seismicity rate ( $a$ ) increases with time and the  $b$ -value remains constant ( $b=1.0 \pm 0.2$ ). In this analysis a bounded Gutenberg-Richter relation is assumed.

The fact that only the seismicity rate changes over time allows a conservative estimate of the hazard by extrapolating the seismicity rate to the end of the period assessed. It was decided to take a 5 year period: 2013-1018.

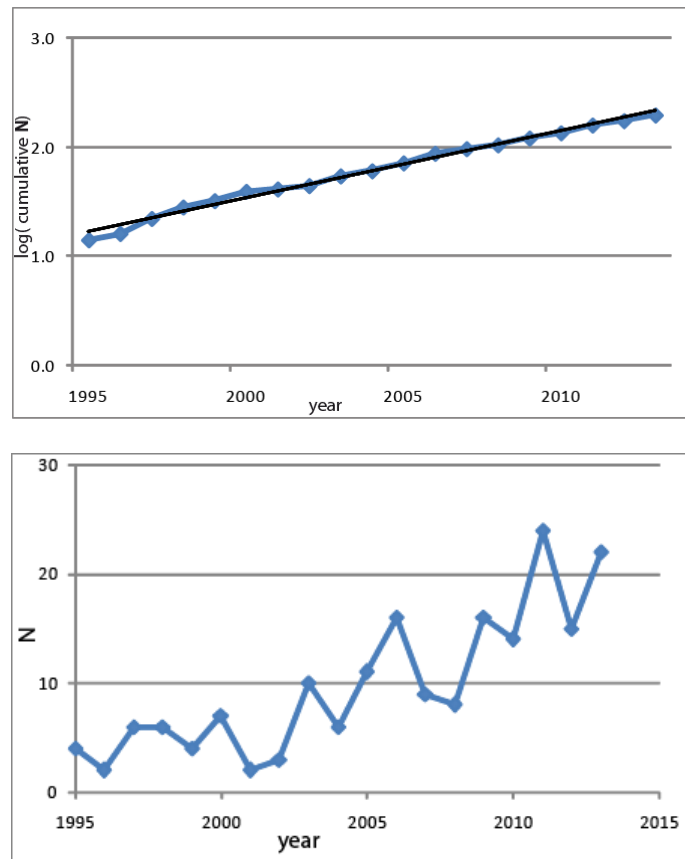


Figure 10. Upper: The logarithm of the cumulative number of events in the Groningen field and calculated trend for  $M \geq 1.5$ . Lower: annual number of events for  $M \geq 1.5$ . The seismicity dataset runs until October 1, 2013.

To forecast the annual number of events for 2018, we attempt linear fits to both the cumulative and annual numbers of recorded events (Figure 10). Fitting a linear trend to the logarithm of the cumulative annual number of events shows that this number will double in the next 5 years. A linear fit to both functions, starting at 2003, predicts for 2018 an average annual number of events of 26 and 33 respectively. Of course, this linear extrapolation depends on the production schedule for the coming years and possible other factors, so it is a first rough estimate.

At present the annual number of earthquakes of magnitude  $M \geq 1.5$ , the level of completeness for the region, is around 20. In the hazard evaluation we show results for an annual rate of 40 events.

*Seismic source zones*

Van Eck et al. (2006) used two source models for the Groningen field. The first one assumed the seismicity to be uniformly distributed over the gas field and the second assumed that seismicity is distributed over four identified main faults. The last ten years seismicity developed over a larger part of the field and shows a clear correlation with compaction.

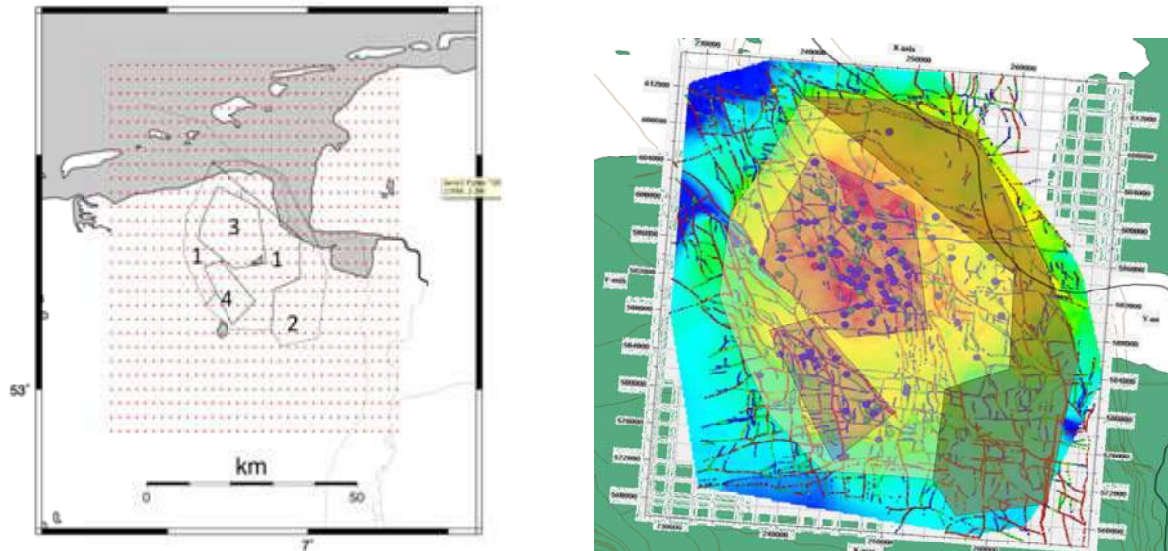


Figure 11. Left: Groningen gas field divided into source zones (1-4). Right: same source zones with information added on compaction (after Bourne & Oates (2013), red: >20cm), faults and seismicity.

Figure 11 shows the proposed definition of source zones for Groningen. Triggered events, which would be expected also at some distance to the field, are not considered. The most active zone (3) corresponds to the region of largest compaction and a high fault density. A large background zone (1) with more scattered seismicity is identified as second most active zone, followed by zone 4 and 2. An alternative classification can be introduced based on earthquake density instead of activity rate.

The assumed activity rate is distributed over the identified source zones using weights (table 2).

Background (1)	0.364
Eastern block (2)	0.017
Central north (3)	0.498
Central south (4)	0.121

Table 2: source zones and weights, based on the total number of events per zone since 1995

## Maximum magnitude

A difficult parameter to estimate is the  $M_{\max}$ . Bourne & Oates (2013) discuss physical limits of the maximum magnitude, based on arguments with respect to the limit on finite strain, finite fault size and finite mass. The authors argue that if all strain accumulated over the life cycle of the field were released in one event at the end of production, the maximum magnitude is 6.5 for the Groningen field. Although this gives an absolute maximum, it is an unrealistic scenario, since many events have been recorded already and strain in elastic media that does not lead to failure is excluded. Until now only 0.1% of the total available strain energy is released in seismic energy. This value may increase with time, but we also assume that larger magnitude events require existing faults. The Groningen field is known to have many faults, but only a limited number of larger faults that may accommodate larger magnitude events.

Arguments based on a finite fault size provides an estimate of  $M=5.8$  as a maximum value. However, this value corresponds to a slip of 0.3 m over a fault dimension of 3 km width and 60 km length. Since the part of the fault directly influenced by compaction is only 0.3 km, a more realistic estimate is a fault width of 1 km and a fault length of 20 km assuming a similar high aspect ratio of 20. This provides a  $M=4.9$  and a slip of 0.1 m. In all calculations a stress drop of 1 MPa is assumed.

Finally, application of the relation between human made mass shifts and maximum magnitude from Klose (2013) to Groningen, with an estimated mass shift of 2.0 to 2.5 Gt, results in an expected maximum magnitude of around 4.5. However, Bourne & Oates (2013) argue that due to a substantial variation within the catalogue, a reasonable upper bound must be around 6. In his analysis Klose (2013) included larger magnitude events with  $M>5$ . In our view these events are triggered and not representative for the situation in Groningen, since there is no reported historical seismicity in the region and there is no evidence of events that have hypocenters far away from the gas producing layer.

There is some confusion on the interpretation of some of the events used by Klose (2013). The influence of larger tectonic events in the Pyrenees, located 20-30 km from the Lacq gas field and connected to the North Pyrenean Fault, was investigated by Grasso et al. (1992). The authors concluded that major regional events may trigger seismic instabilities in the vicinity of the gas extraction. This did not imply that the regional events were induced or triggered. More recently, Bardainne et al. (2008) state explicitly that the Lacq seismicity is clearly not linked to the natural seismicity of the Pyrenean range recorded 30 km further to the south.

These estimates show a large variety of physical limits to the maximum magnitude. Under the assumption that only induced events may occur, no triggered events, there are in our opinion no convincing arguments based on the finite mass limit or finite fault size to adopt a maximum magnitude higher than  $M=5$  in our analysis. The absolute maximum has a relatively small influence on the PSHA results and a comparison for different choices for  $M_{\max}$  will be given.



The assumed activity rate in the present calculations can be compared to activity rate in the model used by Bourne & Oates (2013). Following Kagan (2002) the annual occurrence rate of events ( $\alpha$ ) with moments in the interval  $[M_1, M_x]$  can be related to the annual seismic moment rate  $\dot{M}$  through:

$$\dot{M} = \frac{\alpha M_0^{\beta} \beta}{1-\beta} M_x^{1-\beta} \quad [12]$$

with  $\beta = (2/3)b$  and  $M_x \gg M_1$ . Equation 12 is derived for a truncated Gutenberg-Richter distribution. Kagan (2002) also gives equations for other distributions e.g. a tapered Gutenberg-Richter distribution.

Bourne & Oates (2013) give estimates for the expected annual total seismic moment release for the period 2013-2023. The median of this parameter for 2018 is estimated at  $1.9 \cdot 10^{14}$  Nm and in 2023 at  $2.7 \cdot 10^{14}$  Nm. Assuming  $M_x=5$ , the calculated event rate equals 10 in 2018 and 14 in 2023. An alternative is to assume an annual occurrence rate of 40 and calculate the maximum magnitude  $M_x$ . This results in  $M_x=3.8$  and 4.1 respectively. In all calculations  $M_0=1.5$  and  $b=1.0$ .

It should be noted that due to the Pareto sum distribution, the values for the upper bound of the 95% confidence interval of the total annual seismic moment are a factor 100 higher. For 2018 this value is  $1.3 \cdot 10^{16}$  Nm and the assumption of  $M_{max}=5$  leads to an annual occurrence rate of 643.

### Other parameters

The preferred attenuation relation (GMPE) for the Groningen field is the modified ASB relation, as discussed earlier, including the proposed standard deviation.

Van Eck et al. (2004, 2006) showed PSHA results for return periods of 10 and 100 years. This value was chosen since the duration of gas production is usually limited to one or several decades only. Since results from the PSHA calculations will be used in the national annex for Eurocode 8, it was decided to show results for a return period of 475 years, or 10% probability of exceedance in 50 years.

## Results

Figure 12 shows results in terms of PGA and PGV for a 10% probability in 50 years (return period 475 years). The maximum value for PGV is 16 cm/s and for PGA the maximum value is 0.42 g. Comparison with previous results by Van Eck et al. (2004, 2006) is difficult, since different return periods are used.

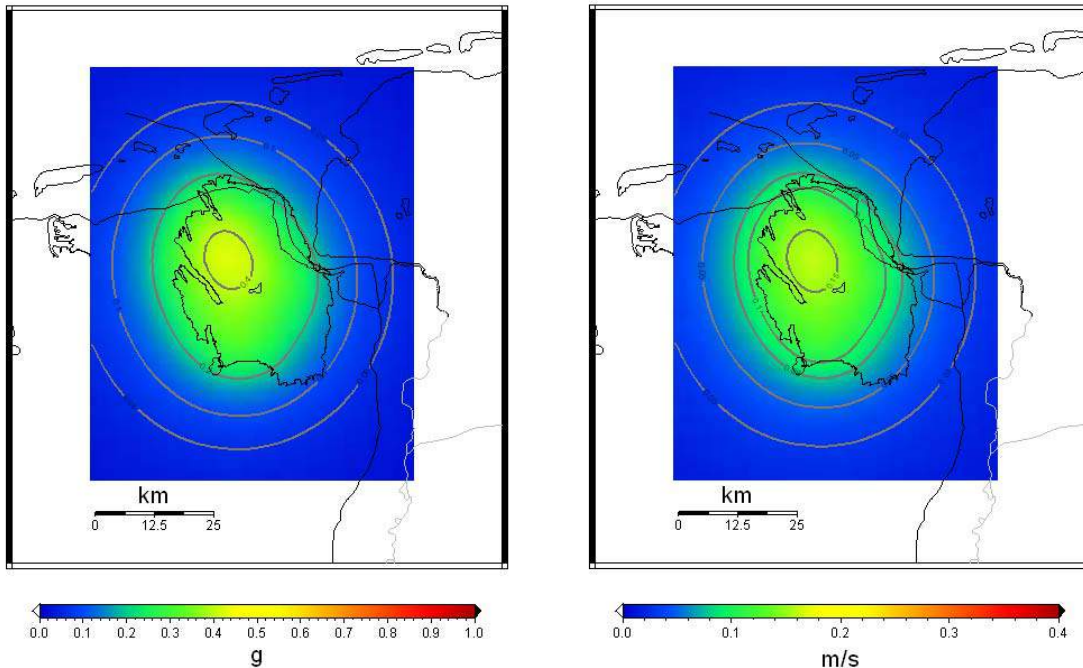


Figure 12. Estimated hazard around the Groningen field. Results for PGA (left, contour levels 0.05, 0.1, 0.2 and 0.4 g) and PGV (right, contour levels 0.03, 0.05, 0.07, 0.1 and 0.15 m/s) are shown for a return period of 475 year using the modified ASB13 model as GMPE and  $M_{max}=5$ .

The PGA hazard map for  $M_{max}=5$  shows a small contour of  $PGA=0.4g$  in the north-western part of the field. The small area of higher PGA values is possibly controlled by the chosen source area. The 0.2g contour spans most of the field area. For comparison results have been calculated for an assumed  $M_{max}=6$ . The maximum value for PGA increases to 0.50g and the PGV to 24 cm/s. This demonstrates the relative importance of the selected maximum magnitude.

The deterministic analysis provides one scenario for PGA and PGV, taking the median value of the GMPE used. The probabilistic results include the uncertainty in the GMPE and, as a result shows higher values. Both deterministic and probabilistic results are based on horizontal ground motions that dominate the seismic waveforms.

## Further developments

The applicability of the selected GMPE for earthquakes of magnitude larger than 4 to Groningen is uncertain, although the model selected is the best available model. All GMPEs considered are empirical models, derived from measured acceleration data recorded in different tectonic settings. In case of Groningen the challenge is to extrapolate the calibrated part of the GMPE to higher magnitudes where no observations are available.

A solution is to calculate synthetic waveforms and to compare the predicted amplitudes at the surface to the empirical GMPEs. Therefore, it is recommended to investigate the influence of the local subsurface structure on the regional GMPE. The influence of a thick high velocity salt layer on top of the gas reservoir, which is the case in Groningen, was demonstrated to result in strong defocusing of seismic energy and in strong mode conversions (Kraaijpoel and Dost, 2013). Modelling the seismic wave field using a local velocity model will provide insight in the physics behind the empirical derived GMPEs and may be used to constrain the PGA and PGV values for events of magnitudes higher than so far recorded.

The results from the probabilistic seismic hazard analysis do include statistical uncertainties in the parameters used. Often we have limited knowledge on the parameters, e.g. for the  $M_{\max}$  or GMPEs, and we like to assess the influence of the lack of knowledge in these parameters (epistemic uncertainty) in the final results. It is recommended to investigate the influence of epistemic uncertainty in a logic-tree approach.

## Conclusions

Evaluation of existing GMPEs and validation with acceleration data recorded during the Huizinge earthquake and 7 earlier events resulted in the creation of a reference GMPE for Groningen. Based on this relation and the assumption that the region where large events may occur is defined by past seismicity of  $M \geq 3$ , results of a deterministic hazard analysis are shown as contour maps of PGV and PGA for an  $M=5$  event. These contour maps can be used as deterministic scenario's of what may happen during an earthquake of magnitude 5.

In addition to these deterministic scenarios also results of a probabilistic hazard analysis are presented. Results show contours of PGA and PGV values with a 10% chance in 50 years to be exceeded, or a return rate of 475 years which is commonly used in building-code guidelines. The presented results will be used in preparation for a national building-code guideline (NPR) and in the preparation of a national annex for Eurocode 8 for the Netherlands.

Uncertainties in the results presented are large, therefore research continues to further understand the influence of the subsurface in Groningen and to reduce these uncertainties.

## Acknowledgements

Thanks to Julian Bommer for many stimulating discussions on this topic and for sharing his notes. Reviews by Julian Bommer and Torsten Dahm are much appreciated and greatly improved the report.

## References

- Akkar, S., M.A. Sandikkaya and J.J. Bommer, 2013, Empirical Ground-Motion Models for Point- and Extended-Source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering*, in press, DOI 10.1007/s10518-013-9461-4.
- Bardainne, T., N. Dubos-Sallee, G. Senechal, P. Gaillol and H. Perroud, 2008, Analysis of the induced seismicity of the Lacq gas field (Southwestern France) and model of deformation, *Geophysical Journal International*, **172**: 1151-1162
- Beyer, K. and J.J. Bommer, 2006, Relationships between median values and aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94** (4A): 1512-1522.
- Bommer, J.J., P.J. Stafford, J.E. Alarcon & S. Akkar, 2007, The influence of magnitude range on empirical ground-motion prediction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**: 2152-2170.
- Bommer, J.J., J. Douglas, F. Scherbaum, F. Cotton, H. Bungum and D. Faeh, 2010, On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis, *Seismological Research Letters*, **81**: 783-793.
- Bommer, J.J. and S. Akkar, 2012, Consistent Source-to-Site Distance Metrics in Ground-Motion Prediction Equations and Seismic Source Models for PSHA. *Earthquake Spectra* **28**(1), 1-15.
- Bommer, J.J., 2013a, Seismic Hazard Assessment for Groningen Gas Field; Selection of Ground Motion Prediction Equation, *NAM Internal note* 30 pp.
- Bommer, J. J., 2013b, Proposals for New GMPEs for the Prediction of PGA and PGV in the Groningen Gas Field, *NAM internal note*, 37pp.
- Bourne, St. and S. Oates, 2013, Induced strain and induced earthquakes within the Groningen Gas Field: Earthquake probability estimates associated with future gas production, Rijswijk, the Netherlands, 68 pp.
- Cesca, S., T. Dahm, C. Juretzek and D. Kuehn, 2011, Rupture process of the 2001 May 7 Mw 4.3 Ekofisk induced earthquake, *Geophysical Journal International*, **187**: 407-413
- Chiou, B., R. Youngs, N. Abrahamson & K. Addo, 2010, Ground-motion attenuation model for small-to-moderate shallow crustal earthquakes in California and its implications on regionalization of ground-motion prediction models. *Earthquake Spectra* **26**(4), 907-926
- Cornell, C.A., 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**: 1503-1606
- Cornell, C.A. and H.A. Mertz, 1975, Seismic risk analysis for Boston, *J. Structural Div.* **ST10**: 2027-2043
- Deichmann, N, 2006, Local magnitude, a moment revisited. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**: 1267-1277.
- Dost, B., T. Van Eck and H. Haak, 2004, Scaling of peak ground acceleration and peak ground velocity recorded in the Netherlands, *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **45**(3): 153-168.

Dost, B. and H.W. Haak, 2007, Natural and induced seismicity, in Th. E. Wong, D.A.J. Batjes and J. de Jager, eds., *Geology of the Netherlands, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*: 223-229.

Dost, B. and D. Kraaijpoel, 2013, The August 16, 2012 earthquake near Huizinge (Groningen), *KNMI report*, 26pp.

Douglas, J., B. Edwards, V. Convertito, N. Sharma, A. Tramelli, D. Kraaijpoel, B. M. Cabrera, N. Maercklin and C. Troise, 2013, Predicting Ground Motion from Induced Earthquakes in Geothermal Areas, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, doi: 10.1785/0120120197.

Grasso, J-R., J-P Gratier J.F. Gamond and J-C. Paumier, 1992, Stress transfer and seismic instabilities in the upper crust: example of the western Pyrenees, *Journal of Structural Geology*, **14**: 915-924.

Hanks, T. C. and D. M. Boore, 1984. Moment-magnitude relations in theory and practice, *Journal of Geophysical Research*, **89**: 6229-6235.

Kagan, Y.Y., 2002, Seismic moment distribution revisited: II. Moment conservation principle, *Geophysical Journal International*, **149**: 731-754.

Klose, C.D., 2013, Mechanical and statistical evidence of the causality of human-made mass shifts on the Earth's upper crust and the occurrence of earthquakes, *Journal of Seismology*, **17**: 109-135, DOI 10.1007/s10950-012-9321-8

Korff, M., H.M.G. Kruse, T.P. Stoutjesdijk, J. Breedveld, G.A. van den Ham, P. Holscher, G. de Lange, P. Meijers, E. Vastenburger, T. Vermaas and M.A.T. Visschedijk, 2013, Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen – Quick Scan naar de sterkte van de infrastructuur-, Deltares rapport, 87pp.

Kraaijpoel, D. and B. Dost, 2013, Implications of salt-related propagation and mode conversion effects on the analysis of induced seismicity, *Journal of Seismology* **17**: 95-107. DOI 10.1007/s10950-012-9309-4.

Muntendam, A.G. and J. A. de Waal, 2013, Reassessment of the probability of higher magnitude earthquakes in the Groningen gas field, Including a position statement by KNMI, *State Supervision of Mines report*, 35pp.

Van Eck, F. Goutbeek, H. Haak and B. Dost, 2004, Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes, KNMI Scientific report; WR-2004-01, 52pp.

Van Eck, T., F. Goutbeek, H. Haak and B. Dost, 2006, Seismic hazard due to small-magnitude, shallow source, induced earthquakes in the Netherlands, *Engineering Geology*, **87**:105-121.

Van Eijs, R.M.H.E, F.M.M. Mulders, M. Nepveu, C.J. Kenter and B.C. Scheffers, 2006, Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands, *Engineering Geology*, **84**: 99-111.

Wassing, B.B.T. and B. Dost, 2012, Seismische hazard van geïnduceerde aardbevingen; Integratie van deelstudies, *TNO/KNMI rapport (TNO 2012 R11139)*, 23pp.

Wells, D.L. and K.J. Coppersmith, 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84** (4): 974-1002.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## Review TBO rapportage onderzoek 6

Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO),  
Den Haag, Utrecht, de Bilt, 9 december 2013

Joost Haenen	Voorzitter Technische Begeleidingscommissies
Bernard Dost	KNMI
Karin van Thienen-Visser	TNO
Barthold Schroot	EBN
Hans de Waal	SodM

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## 1. Inleiding

In deze notitie beschrijft de Technische Begeleidingscommissie Ondergrond (TBO) de resultaten van het reviewproces voor de rapportage van NAM over onderzoek 6, getiteld “Report to the Technical Guidance Committee (TBO) on Production Measures”. Dit rapport bestaat uit twee delen:

- “Report on Production Measures – Part 1: Depletion Scenario’s and Hazard Analysis”, gedateerd oktober 2013<sup>1</sup>
- “Report on Production Measures – Part 2: Pressure Maintenance”, gedateerd oktober 2013<sup>2</sup>

### *Vraagstelling*

Onderzoek 6 maakt onderdeel uit van de 11 onderzoeken die de Minister van Economische Zaken heeft aangekondigd in zijn brief aan de Tweede Kamer van 11 februari 2013. In die brief spreekt de minister over een “onderzoek naar alternatieve winningstechnieken om aantal en maximum bevingen te verkleinen (inclusief effecten van productiebeperking)”.

De bovengenoemde rapportage van NAM beschrijft dit onderzoek maar doet ook verslag van vervolgstudies die betrekking hebben op de vraagstelling van onderzoek 5, bijvoorbeeld ten aanzien van de verwachte compactie en seismische hazard.

### *Proces*

De TBO is sinds mei 2013 periodiek geïnformeerd over de voortgang en de (tussentijdse) resultaten van de studies die in het kader van de onderzoeken 5 en 6 plaatsvonden. Zo zijn er drie grote workshops georganiseerd, waarop deelstudies zijn gepresenteerd en bediscussieerd. Voor het geomechanische werk en de productiescenario’s geldt echter dat een groot deel van het werk en de resultaten daarvan pas in de laatste zes weken beschikbaar zijn gekomen en niet of nauwelijks zijn gedeeld met de TBO voorafgaand aan de rapportage. Bovendien geeft NAM aan dat belangrijke onderdelen van de rapportage moeten worden gezien als ‘*work in progress*’ dat nog slechts zeer beperkt resultaten heeft opgeleverd. Als gevolg van de geringe tijd en dientengevolge een beperkt begrip van de gehanteerde modellen en aannames, is deze review minder diepgaand dan de review van onderzoek 5. Overigens heeft NAM zelf ook slechts een beperkt aantal conclusies getrokken op basis van onderzoek 6.

### *Inhoud*

In paragraaf 2 worden de bevindingen van NAM in het kort beschreven. In paragraaf 3 geeft de TBO haar oordeel over het werk en de resultaten, voor zover dat op basis van de huidige rapportage en de bij de TBO aanwezige kennis van het onderliggende werk mogelijk is. In paragraaf 4 volgen de conclusies van de TBO over onderzoek 6. De review eindigt met een paragraaf waarin de TBO voor de onderzoeken 5 en 6 gezamenlijk tot een eindoordeel komt.

---

<sup>1</sup> De TBO heeft deze rapportage ontvangen op 13 november 2013.

<sup>2</sup> De TBO heeft deze rapportage ontvangen op 1 november 2013.



# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## 2 Bevindingen van NAM

In deel 1 van de rapportage over onderzoek 6 wordt aandacht besteed aan:

- a. productiescenario's voor het Groningenveld
- b. reservoircompactie
- c. de seismische hazard
- d. geomechanische modellering
- e. een plan voor gegevensverzameling en nader onderzoek in de komende periode

Deel 2 beschrijft de mogelijkheid om de druk in het reservoir op niveau te houden door de injectie van stikstof.

### 2.2.1 Deel 1: Depletiescenario's en hazard analyse

#### a. Productiescenario's

Op dit moment stuurt NAM bij de depletie van het Groningenveld op het zo beperkt mogelijk houden van drukverschillen: geprobeerd wordt de druk in het veld overal zo veel mogelijk gelijk te houden. NAM heeft onderzocht welke maatregelen genomen zouden kunnen worden, die bijdragen aan het minimaliseren van de seismiciteit. Sommige van deze maatregelen kunnen beschouwd worden als alternatieve productiescenario's. De genoemde maatregelen zijn:

1. een alternatieve productiefilosofie die eruit bestaat dat voorrang gegeven gaat worden aan productie uit het zuidelijk deel van het veld en zo weinig mogelijk gas wordt geproduceerd uit het noordelijk deel, waar de seismiciteit het grootst is. Daardoor loopt de reservoirdruk in het noorden de komende jaren langzamer terug en wordt de compactie daar beperkt. NAM stelt dat deze maatregel een tijdelijk positief effect zal hebben op de seismiciteit rond Loppersum.
2. het reduceren van het jaarlijkse productieniveau voor het gehele veld. NAM heeft in de hazard analyse naast het *base case* scenario (het handhaven van het tot nu voorgenomen productieprofiel) andere scenario's doorgerekend, waarin de productie wordt beperkt tot respectievelijk maximaal 40 en 30 miljard kubieke meter (bcm) per jaar. Daarnaast is gekeken naar de effecten van het stopzetten van de productie.
3. de depletie van enkele randblokken aan de westkant het veld, waar de druk nu relatief hoog is, met als doel het drukverschil met de rest van het veld te reduceren, onder de verwachting dat dit de seismiciteit zal verminderen. Extra putten in deze randblokken zijn daarvoor nodig.
4. Het op peil houden van de reservoirdruk (*'pressure maintenance'*) door het injecteren van een vloeistof of een gas. Deze maatregel is onderzocht in deel 2 van de rapportage.

#### b. Compactie

NAM heeft voor negen verschillende productiescenario's gekeken naar de ontwikkeling van de cumulatieve compactie van het veld, die in het model van NAM de belangrijkste bepalende factor voor seismiciteit is. In eerste instantie wordt een vergelijk gepresenteerd tussen die

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

negen scenario's onderling, waarbij alle negen gebruik maken van het door NAM geprefereerde *time-decay* compactiemodel. Vervolgens worden voor één enkel productiescenario (nl. door produceren volgens het *market demand* profiel) drie verschillende compactiemodellen (fysische relaties tussen de opgelegde spanning en de resulterende volumeverandering) vergeleken: een bilineair model, een *time-decay* model en een lineair isotach model. In de rapportage heeft NAM een *time-decay* model als *base case* gebruikt. In onderzoek 5 werd een (bi)lineaire model als *base case* gebruikt. NAM concludeert dat de onzekerheid die wordt geïntroduceerd door het gebruik van verschillende compactiemodellen groter is dan de spreiding in de uitkomsten ten gevolge van het gebruik van verschillende door de NAM doorgerekende productiescenario's.

## c. De seismische hazard

In aanvulling op de rapportage van onderzoek 5 heeft NAM nu ook gekeken naar de seismische hazard in de komende drie en vijf jaar, zoals door de TBO in de review van onderzoek 5 was aanbevolen. De resultaten van de Probabilistische Seismische Hazard Analyse zien er in de *base case* als volgt uit:

Hazard:	50% kans op overschrijding			10% kans op overschrijding			2% kans op overschrijding		
	10 jaar	5 jaar	3 jaar	10 jaar	5 jaar	3 jaar	10 jaar	5 jaar	3 jaar
Periode:									
PGA:	0,06g	0,03g	0,02g	0,33g	0,18g	0,12g	0,67g <sup>3</sup>	0,42g	0,3g

Deze hazard analyse kent grote epistemische onzekerheden, die vooral samenhangen met de partiticoëfficiënt, de gebruikte Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) - dat zijn de empirische verbanden tussen de sterkte van een beving en de grondversnelling op een bepaalde afstand van het epicentrum - en de compactie van het reservoir. Met een 'logic tree' benadering heeft NAM de relatieve impact van deze belangrijkste factoren op de geschatte hazard onderzocht. De conclusie is dat de partiticoëfficiënt de grootste bijdrage levert aan de onzekerheid.

De probabilistische seismische hazard analyse is uitgevoerd voor 19 scenario's. De belangrijkste variabelen in deze scenario's zijn:

- Compactiemodel: in de berekeningen zijn een *time-decay* en een isotachmodel gebruikt en (ter vergelijking) in één scenario een bilineair model.
- Productiescenario's: gekeken is naar het huidige productieprofiel (genoemd *market demand*), naar scenario's met maximaal respectievelijk 40 en 30 bcm productie per jaar en naar het scenario van het stopzetten van de productie.
- Productiefilosofie: naast de huidige filosofie, waarbij de drukverschillen binnen het veld zo klein mogelijk worden gehouden, zijn scenario's doorgerekend waarbij een alternatieve filosofie wordt gehanteerd, nl. het primair uit het zuiden van het veld winnen.

---

<sup>3</sup>Dit cijfer wijkt af van het getal dat in de rapportage over onderzoek 5 werd genoemd (0,57g). Dat komt doordat hier het *time decay* compactiemodel is gehanteerd, waar in onderzoek 5 het lineaire model werd gebruikt.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

Daarnaast worden in de scenario's verschillende aannames gemaakt over de ontwikkeling van het veld (extra putten en compressie) en twee verschillende mogelijkheden met betrekking tot de sterkte van de aquiferdruk in het noordwesten (zogenaamde 'geologische' scenario's). NAM rapporteert dat vrijwel al deze scenario's, bij een gegeven compactiemodel, voor de komende tien jaar een vergelijkbare seismische hazard opleveren (binnen een 5% bandbreedte). Er zijn slechts twee scenario's die een substantieel lagere hazard laten zien: het scenario waarin de productie wordt beëindigd en een scenario van productieverlaging tot 30 bcm per jaar. In dit laatste scenario wordt ook uitgegaan van de KHM<sub>1</sub>-ontwikkeling (*hook up*, 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> fase van compressie).

Het stopzetten van de productie verlaagt de seismische hazard (2% in de komende tien jaar) tot 0,41g, een reductie met 38%. Het scenario met de KHM<sub>1</sub>-ontwikkeling verlaagt de hazard met 12% tot 0,58g voor een overschrijdingskans van 2% voor de komende tien jaar.

## d. Geomechanische modellering

NAM presenteert voorlopige resultaten van 2D- en 3D *finite element* geomechanische modelleringen, met behulp waarvan is gekeken naar de rol die breuken spelen bij de seismische activiteit in Groningen. Daarbij wordt berekend hoeveel energie bij een beweging langs een breuk vrij kan komen. Daarmee zou de onzekerheid ten aanzien van de partiticoëfficiënt aan de bovenkant begrensd kunnen worden. De eerste inzichten worden door NAM als hoopgevend gekwalificeerd en geven richting aan het programma voor gegevensverzameling en verder onderzoek.

## e. Een plan voor gegevensverzameling en nader onderzoek in 2014

Dit plan richt zich primair op het reduceren van de belangrijkste onzekerheden rond de compactie en de partiticoëfficiënt, op het verkrijgen van meer geomechanisch begrip, op de GMPEs en op de bepaling van de b-waarde. Daarnaast zal NAM opties onderzoeken om de seismiciteit te reduceren, vooral op door middel van stikstofinjectie (de haalbaarheid van deze optie verder onderzoeken) en stress management. Het verzamelen van meer en betere gegevens, bv. met een uitgebreid net van geofoons, maakt onderdeel uit van het plan.

### 2.2.2 *Deel 2: Stikstofinjectie*

In deel 2 is de mogelijkheid om stikstof in het veld te injecteren onderzocht, waarmee de druk in het veld op een constant niveau kan worden gehouden. Omdat daarmee de verdere compactie wordt beperkt, leidt dit in de door NAM gehanteerde modellen tot een grote beperking van de seismiciteit.

NAM tekent daarbij aan dat deze optie zeer grote investeringen en hoge operationele kosten met zich meebrengt en vanwege de omvang van de stikstof productie een enorme impact op de omgeving zal hebben. De optie scoort om die reden bij NAM niet hoog, maar zal toch verder worden onderzocht. Als uit nadere studie blijkt dat het project uitvoerbaar is, zal niet voor 2018 met de injectie van stikstof kunnen worden begonnen.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

## 3 Beoordeling door de TBO

In deze paragraaf geeft de TBO haar oordeel over de inhoud van de rapportage en de conclusies die NAM daaruit trekt.

### 3.1 *Proces*

De rapportage van onderzoek 6 is (in twee delen) pas op 1 en 13 november aangeleverd. Het was van meet af aan duidelijk dat vooral de resultaten van de door Exxon uitgevoerde geomechanische modellering, die onderdeel vormde van onderzoek 5, op zijn vroegst begin november beschikbaar zouden zijn. NAM heeft ervoor gekozen deze resultaten mee te nemen in de rapportage over onderzoek 6. Een aanzienlijk deel van de rapportage over de geomechanische modellering betreft overigens een beschrijving van lopend onderzoek met slechts enkele tussenresultaten. De met de TBO afgesproken planning voor het opleveren van de resultaten van de scenario-analyses werd hierdoor niet gerealiseerd. Een uitgebreide analyse en review waren daardoor in de voor de TBO beschikbare tijd niet meer mogelijk.

Ook voor rapportage over de verschillende productiescenario's en de nadere analyse van de seismische hazard geldt dat door de opgetreden vertraging de tijd voor een uitgebreide analyse door de TBO ontbrak. Ook hier zijn de resultaten te laat ontvangen om daar bijvoorbeeld nog diepgaand met NAM over te kunnen spreken, wat voor een goed begrip van de rapportage noodzakelijk was geweest, of om onafhankelijke eigen berekeningen te kunnen (laten) uitvoeren.

Alleen de inhoud van deel 2 (stikstofinjectie) is eerder met de TBO gedeeld.

### 3.2 *Inhoud*

#### 3.2.1 *Deel 1: Depletiescenario's en hazard analyse*

##### a. Productiescenario's

Met betrekking tot de verschillende in het rapport besproken scenario's merkt de TBO allereerst op dat onduidelijk is waarop de selectie van de doorgerekende scenario's is gebaseerd. Zo noemt de tabel op pagina 37 een C20 scenario (productiebeperving tot 20 bcm per jaar); de keuze om dit scenario niet door te rekenen wordt niet gemotiveerd. Verder suggereert tabel 2.2 dat 22 scenario's zijn beschouwd (*'have been assessed'*), terwijl er elders (o.a. in tabel 4.3) van 19 scenario's wordt gesproken. Ook is verwarrend dat over twee varianten van een geologisch model wordt gesproken (G1 en G2 genoemd in sectie 2.4), maar dat alleen scenario's met model G1 worden gepresenteerd en besproken in de rapportage. Dit is des te opvallender, gegeven het feit dat sectie 2.4 suggereert dat met model G2 een betere fit met de bodemdalingsgegevens wordt verkregen.

Het is de TBO niet duidelijk of NAM onderzocht heeft welk productiescenario het grootste effect heeft op de seismische hazard.

Overigens is het rapport niet overal intern consistent v.w.b. de naamgeving van de scenario's.

In Hoofdstuk 2 laat NAM verschillen zien in de ontwikkeling van de drukverdeling in het reservoir tussen scenario's van productie volgens de huidige productiefilosofie en scenario's

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

volgens de alternatieve productiefilosofie (die preferent productie in het zuiden inhoudt, maar ook productie in het noorden toelaat). De TBO is van oordeel dat het serieus in overweging nemen van de alternatieve productiefilosofie de moeite waard is. Daarbij zou ook gekeken moeten worden naar de mogelijkheid de productie gedurende de komende jaren in het noorden geheel te stoppen.

De TBO heeft alleen gekeken naar de effecten van de productiescenario's in de komende 3-5 jaar, aangezien de onzekerheden daarna teveel toenemen om nog conclusies te kunnen trekken.

## b. Compactie

Hoofdstuk 3 laat in grafieken de cumulatieve compactie zien voor 11 verschillende scenario's. Op twee na zijn deze scenario's alle gebaseerd op NAM's voorkeursmodel, een *time-decay* compactiemodel. Met betrekking tot de parameterkeuze merkt de TBO op dat onduidelijk is welke relaxatietijd is gebruikt. NAM noemt vijf jaar (met een onzekerheid van plus of min vijf jaar) als beste fit met de geobserveerde bodemdaling. Als er bijvoorbeeld een tijdsconstante van vijf jaar wordt gehanteerd, worden de gevolgen van veranderingen (in druk) niet zichtbaar vóór er vijf jaar zijn verstreken. Sterker nog: de volledige effecten van productieverlaging of productieverhoging worden over een nog langere periode uitgesmeerd. De TBO merkt op dat door de gekozen tijdsconstante en de kleine drukverschillen in het veld de verschillende productiescenario's vergelijkbare cumulatieve compactievolumes opleveren (binnen 10 miljoen m<sup>3</sup>). Na 2023 worden de verschillen nog kleiner omdat de scenario's dan volledige drukdaling toestaan in het gehele veld. De enige twee scenario's die significant andere cumulatieve compactievolumes geven, zijn het stop scenario (dat overigens niet in de figuren is weergegeven) en het stikstof injectie scenario.

Het basis compactiemodel (*time-decay*) wordt vergeleken met het bilineaire compactiemodel en het isotach compactiemodel. De verschillen in cumulatieve compactievolumes tussen deze modellen zijn aanzienlijk (20 miljoen m<sup>3</sup> in 2023 en oplopend tot 175 miljoen m<sup>3</sup> in 2080). Hierbij wordt de aantekening gemaakt dat het isotach model gekalibreerd is aan laboratorium gegevens, in tegenstelling tot de andere compactiemodellen, waardoor een goede vergelijking tussen de verschillende compactiemodellen en het effect hiervan op de seismische hazard niet goed mogelijk is. Als de lab data voor het isotach model op dezelfde manier zouden worden opgeschaald als in het *time-decay* model, zal de compactie volgens de TBO significant lager uitvallen. Meer algemeen zou de TBO graag zien dat de in de modellen gehanteerde parameters, zoals compressibiliteit, Poisson ratio en *rigid basement*, worden geëxpliciteerd. De TBO is van mening dat nader bezien moet worden of - bij gelijke parameters in de modellen - de conclusie van NAM, dat het effect van de verschillende productiescenario's op de compactievolumes klein is vergeleken bij het effect van de verschillende compactiemodellen, blijft staan. De conclusie van NAM dat het isotach model (met de gekozen parameters) niet betrouwbaar zou zijn vanwege de slechte overeenkomst met observaties in het stop scenario en de op lab schaal gebaseerde parameters, is naar de mening van de TBO niet onderbouwd.

De TBO merkt ten slotte op dat NAM in de grafieken de gemiddelde te verwachten waarde (de *expectation*) laat zien, maar de onzekerheden niet aangeeft. Voor eventuele conclusies is het

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

relevant te weten hoe de verschillen tussen de compactiemodellen zich verhouden tot die marge.

## c. Seismische hazard

In onderzoek 5 is een lineair elastisch compactiemodel aangenomen. In het rapport over onderzoek 6 is een *time-decay* compactiemodel gebruikt. In dit model zit een karakteristieke tijdschaal van vijf jaar met een onzekerheid van vijf jaar. Resultaten laten een met ca. 20% verhoogde waarde zien (ten opzichte van de rapportage over onderzoek 5) voor de maximum PGA voor de komende 10 jaar. De in Hoofdstuk 4 gepresenteerde figuren maken alleen voor het *time-decay* compactiemodel een goede vergelijking mogelijk van de seismische hazard voor perioden van 3, 5 en 10 jaar.

Resultaten voor een overschrijdingskans van 2% in 10 jaar kunnen vergeleken worden met een overschrijdingskans van 1% in vijf jaar. Er wordt echter geen corresponderende waarde voor de periode van drie jaar gegeven.

De invloed van epistemische onzekerheid is onderzocht door een aantal scenario's te berekenen met variaties in de meest invloedrijke parameters in een zogenaamde '*logic-tree*'. Dit betekent een wezenlijk andere aanpak en een goede aanvulling op onderzoek 5, waar alleen de aleatorische (statistische) onzekerheid is meegenomen. De *logic tree* kan alleen worden gebruikt om relatieve gevoeligheden af te schatten. Resultaten geven duidelijk aan dat een gebrek aan kennis vooral van belang is bij de partiticoëfficiënt, gevolgd door de GMPE en het compactiemodel. Dit is geen verrassende uitkomst, maar laat wel goed zien waar de focus moet liggen bij verdere verbetering van de modellering.

In de *logic-tree* benadering worden naast een lineair-elastisch en een *time-decay* compactiemodel nog twee andere compactiemodellen meegenomen: een bilinear model en een isotach model. Zeer illustratief voor de overheersende bijdrage van de partiticoëfficiënt aan de epistemische onzekerheid zijn de figuren 4.6-4.9 waar de effecten van de verschillende compactiemodellen in de hazard berekening zichtbaar gemaakt worden.

De TBO merkt op dat figuur 4.13 tot verwarring zou kunnen leiden vanwege de keuze van de schaal van de horizontale as in termen van PGA. De in de figuur getoonde PGA-waarden representeren niet de seismische hazard in absolute zin, maar tonen slechts relatieve verschillen. De (absolute) seismische hazard wordt getoond in figuur 4.4.

De seismische hazard die wordt berekend met gebruik van het basis (*time-decay*) compactiemodel is voor de verschillende productiescenario's vrijwel gelijk (PGAs binnen een bandbreedte van 0.10g). Uitzondering hierop zijn het productiestop scenario, het stikstof-injectiescenario en het scenario dat kiest voor de alternatieve productiefilosofie (preferent winnen in het zuiden) gecombineerd met een beperking van de jaarlijkse productie tot 30 bcm.

De huidige hazard analyse (met de rol van de partiticoëfficiënt daarin) leidt tot soms verrassende resultaten. Zo wordt bijvoorbeeld in de alternatieve productiefilosofie gas bij voorrang vanuit het zuidelijk deel van het veld gewonnen. Aangezien hier tot nu toe relatief weinig cumulatieve compactie is opgetreden, is de partiticoëfficiënt daar nog klein, waardoor daar geen verhoging in de seismische hazard te zien is als gevolg van de verhoogde depletie.

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

De cumulatieve compactie in het Loppersum gebied is al vrij hoog (en dus is daar een grotere partiticoëfficiënt), waardoor een minder grote drukdaling in dit deel een grote invloed heeft op het de seismische hazard (verlaging van de PGA met 0,1g). De alternatieve productie filosofie en andere productiescenario's lijken hierdoor weinig effect te hebben op de seismische hazard. De onzekerheid in de partiticoëfficiënt door een gebrek aan kennis speelt bij dit gebrek aan onderscheidend vermogen in termen van seismische hazard een belangrijke rol. Een onderbouwde keuze voor het optimale productiescenario in termen van een beperkt seismische hazard kan in de ogen van de TBO op dit moment niet gemaakt worden. De TBO onderschrijft dan ook de noodzaak om op basis van nader onderzoek en meer gegevens de fysische mechanismen achter de partiticoëfficiënt beter te begrijpen en te werken aan betere compactiemodellen. Met behulp daarvan kan vervolgens meer worden gezegd over de verschillen in seismische hazard tussen verschillende productiescenario's.

## d. Geomechanische modellering

NAM heeft tweedimensionale (2D) en driedimensionale (3D) *finite element* geomechanische modellen ontwikkeld, waarmee de hoeveelheid slip tijdens de depletie wordt bekeken. Met behulp van dergelijke modellen kan geprobeerd worden de fysica in de statistische hazard analyse te verbeteren. De ontwikkeling van deze modellen is een belangrijke stap voorwaarts, maar zoals NAM terecht constateert zijn ze kwalitatief nog onvoldoende om er op dit moment al conclusies aan te kunnen verbinden.

De TBO merkt in dat verband op dat in deze modellen wordt aangenomen dat alle *slip* seismisch plaatsvindt. In het algemeen wordt verondersteld dat ook aseismische *slip* een belangrijke rol speelt. Daar staat tegenover dat de modellen statisch zijn, waardoor dynamische gedrag niet wordt gemodelleerd en ook geen *stress drop* is aangebracht. Het is daarom niet te zeggen of de resulterende *slip* over- of onderschat wordt.

De 2D geomechanische studie geeft generieke inzichten in breukgeometrieën en *slip*. De resultaten zijn echter, zoals ook wordt gesteld, niet één op één te vertalen naar Groningen. Het Zechstein zoutpakket zit bijvoorbeeld niet in het model, terwijl dit een potentieel grote impact heeft op de resultaten.

Het 3D geomechanische werk dat wordt gepresenteerd betreft een eerste model, dat zoals NAM ook stelt nog gekalibreerd en verbeterd zal moeten worden. Alle voorlopige conclusies die uit dit werk naar voren komen m.b.t. de verschillende productiescenario's alsook de voorspellingen van toekomstige seismiciteit (in de vorm van seismische energie die vrijkomt) moeten in dit licht worden gezien. De *fit* tussen de gedissipeerde energie op de breuken en seismische energie in het 3D model wordt bereikt met behulp van aanpassing van drie instelbare parameters. De TBO merkt op dat er andere mogelijke combinaties van parameters zijn (met een even goede *fit*), die een andere voorspelling van de toekomst zouden geven. Daarnaast is het bereikte resultaat afhankelijk van de hoeveelheid breuken die in het model zitten. In de sub-modellen worden 40 respectievelijk 37 breuken (de meest kritische) meegenomen. Er is echter een veelvoud van breuken die in het model niet zijn meegenomen. De berekende *slip* zal toenemen met het aantal breuken wat meegenomen wordt in de modelering. Daarnaast is bekend dat er ook subseismische breuken (d.w.z. niet zichtbaar op reflectie-seismische afbeeldingen van de ondergrond) bestaan, waardoor nooit alle breuken

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

(en dus ook nooit alle opgetreden slip) gemodelleerd kan worden.

## e. Plan voor nader onderzoek en gegevensverzameling

In hoofdstuk 6 van de rapportage beschrijft NAM het onderzoeksprogramma voor 2014. Het reduceren van de onzekerheid die samenhangt met de partitiecöefficient is het speerpunt van dat programma, in lijn met de bevindingen van onderzoek 6 en de aanbevelingen van de TBO naar aanleiding van onderzoek 5. Ten behoeve van de gedetailleerde geomechanische modellering die daarvoor nodig is, zijn betere en meer gegevens nodig over de precieze locatie van de aardbevingen en het karakter van de bevingen. Met het oog daarop wordt het gefoon-netwerk uitgebreid, o.a. met gefoons op reservoirdiepte in het gebied rond Loppersum. De TBO onderschrijft het belang hiervan, met het oog op het aanzienlijk reduceren van de onzekerheid over de ontwikkeling van de seismiciteit op langere termijn. De TBO heeft ook met instemming kennis genomen van de andere elementen van het onderzoeksprogramma, in het bijzonder:

- het verbeteren en valideren van de compactiemodellen met (verbeterde) metingen;
- update van het porositeitsmodel, in het licht van nieuwe gegevens over de bodemdaling;
- golfvorm-modelering en inversie om fysica en geologische kennis in de GMPEs te brengen;
- onderzoek naar stress management van het veld, bijvoorbeeld door verdere studies naar de stabiliteit van breuken.

De TBO mist in het onderzoeksprogramma nog altijd een studie naar de relatie tussen de productiesnelheid en seismiciteit en specifiek naar de mogelijke effecten van tijdsafhankelijke spanningsrelaxatie daarop.

De TBO heeft kennis kunnen nemen van de review op deel 1 van de rapportage door professor Ian Main (University of Edinburgh) van 14 november 2013. Zij ziet in deze review op belangrijke punten een bevestiging van de hiervoor gepresenteerde beoordeling. In het bijzonder waar prof. Main

- constateert dat het niet mogelijk is om alle details die tot specifieke conclusies leiden te controleren, omdat de rapportage “*high level*” is en heel compact;
- opmerkt dat de geomechanische modellen weliswaar een goede match laten zien met de historische data, maar dat daarbij een groot aantal parameters een rol speelt waarmee tot gespeeld kan worden. Maar er zijn falsifieerbare voorspellingen van het gedrag van het reservoir gemaakt, die in de toekomst zullen helpen bij het kiezen van de juiste modellen en parameter waarden, naarmate nieuwe gegevens beschikbaar komen;
- opmerkt dat het nuttig was geweest als er meer aandacht in de rapportage was besteed aan de ratio voor de productiescenario's die in beschouwing zijn genomen.

### 3.2.2 *Deel 2: Stikstofinjectie*

Het op peil houden van de reservoirdruk in het Groningen veld zal, met enige vertraging, de compactie en bodemdaling tot staan brengen. Dit heeft ook in de ogen van de TBO de potentie om de seismiciteit in het veld op zijn minst sterk te reduceren.

In het rapport wordt een keuze gemaakt voor stikstofinjectie. Hierbij wordt injectie met andere gassen (zoals CO<sub>2</sub>) of water als te duur of anderszins moeilijk of onmogelijk terzijde geschoven. Als gekeken wordt naar het projectvoorstel voor stikstofinjectie, zoals dat op



# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

hoofdpijnen in de rapportage wordt beschreven, wordt duidelijk dat ook die optie duur en technisch niet eenvoudig is. De benodigde installaties voor de productie van stikstof, op een schaal die nog nergens ter wereld gerealiseerd is, brengen enorme investeringen met zich mee (NAM verwacht kosten van in totaal € 6 à 10 mrd) en zijn niet voor 2018 te realiseren.

Bovendien zou een dergelijk project vanwege die schaal een grote impact op de omgeving hebben en veel elektriciteit verbruiken, waarvoor ca. één vijfde van de resterende gasreserves in het Groningenveld gebruikt zouden moeten worden.

In de ogen van de TBO kan de optie van stikstof injectie alleen in beeld komen als alternatief voor het stopzetten van de productie. Dat zijn immers de scenario's die, zij het met vertraging, de compactie in het reservoir tot staan brengen en daarmee ook de seismische hazard vrijwel geheel kunnen wegnemen. Het zijn ook de twee scenario's die enorme financiële en economische gevolgen met zich meebrengen, inclusief de externe effecten op omgeving en milieu.

Het is de TBO niet duidelijk of een variant met gedeeltelijke injectie van stikstof, waardoor de drukverlaging in het veld vertraagd wordt, een bijdrage zou kunnen leveren aan het reduceren van de seismische hazard. NAM heeft deze variant niet meegenomen in het onderzoek.

## 4 Conclusies

### 4.1 Algemeen

De rapportage van NAM over onderzoek 6 bevat tevens aanvullingen op of veranderingen van de rapportage over onderzoek 5. Ook heeft NAM daarin een aantal van de aanbevelingen die de TBO deed in de review van de rapportage over onderzoek 5 opgevolgd. Voor de conclusies van de TBO over onderzoek 5 wordt verwezen naar het document 'Review TBO rapportage onderzoek 5' van 24 november 2013. Daar waar NAM's rapportage 'Report to the Technical Guidance Committee (TBO) on Production Measures' tot bijstellingen of nieuwe conclusies van de TBO leiden, zijn deze verwoord in het onderstaande eindoordeel.

### 4.2 Conclusies over onderzoek 6

1. NAM heeft vier denkbare maatregelen onderzocht, die mogelijk de geïnduceerde seismiciteit zouden kunnen terugbrengen. Slechts één daarvan is gericht op het streven naar het minimaliseren van drukverschillen, wat tot nu toe de productiefilosofie van NAM was. De andere drie zijn gericht op het beperken van compactie in het gehele veld of in voornamelijk het noordelijk deel van het veld. Hieruit blijkt dat NAM weliswaar compactie van het reservoir als meest bepalende factor voor de seismiciteit ziet, maar dat dit niet betekent dat drukverschillen aan de randen van het veld of over interne breuken binnen het veld niet ook van belang kunnen zijn.
2. De 19 productiescenario's waarvoor NAM de seismische hazard heeft berekend, laten in vrijwel alle gevallen slechts beperkte verschillen in hazard zien. Dat is mede het gevolg van het feit dat in het *time-decay* compactiemodel de verschillen pas met een vertraging van tenminste vijf jaar zichtbaar worden. Er zijn drie scenario's die - ten opzichte van de *base case* - tot een wat grotere reductie van de seismiciteit leiden. Behalve voor het

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

- scenario van het stopzetten van de productie en voor het scenario van stikstofinjectie geldt dit voor het adopteren van de alternatieve productiefilosofie (preferent winnen in het zuiden) in combinatie met het verminderen van de productie.
3. Een onderbouwde keuze voor het optimale productiescenario in termen van een beperkt seismische hazard kan in de ogen van de TBO op dit moment niet gemaakt worden.
  4. De TBO is van oordeel dat het serieus in overweging nemen van de alternatieve productiefilosofie, die inhoudt dat gedurende enkele jaren met voorrang uit het zuiden van het veld gewonnen gaat worden, de moeite waard is. Dit zou kunnen passen in een benadering waarin maatregelen voor de korte termijn gepaard gaan met nader onderzoek dat een verantwoord besluit voor de langere termijn mogelijk moet maken. Daarbij zou ook gekeken moeten worden naar de mogelijkheid de productie gedurende die jaren in het noorden geheel te stoppen, een scenario waar NAM nog niet naar heeft gekeken.
  5. De grootte van de partiticoëfficiënt en de ontwikkeling ervan in de tijd zijn in belangrijke mate bepalend voor de ontwikkeling van de seismiciteit. De TBO deelt de conclusie van NAM dat de huidige statistische analyse laat zien dat het waarschijnlijk is dat deze coëfficiënt toeneemt. De mate waarin dit het geval zal zijn is echter zeer onzeker, omdat een goed fysisch begrip van de empirisch bepaalde partiticoëfficiënt ontbreekt. De logic tree benadering laat zien dat de partiticoëfficiënt de grootste bijdrage levert aan de onzekerheid in de hazard analyse. 3D geomechanische modellering kan helpen een bovengrens voor deze coëfficiënt te bepalen.
  6. Er bestaat nog geen consensus over het fysisch model dat de afhankelijkheid van de compactie van de drukdaling in de tijd het beste beschrijft (het compactiemodel). Hiervoor bestaan verschillende hypothesen die op basis van de huidige bodemdalingsmetingen alle valide kunnen zijn. De TBO vindt het belangrijk om in de verschillende compactiemodellen met dezelfde parameters te werken, waardoor de verschillen naar verwachting kleiner zullen worden. Vervolgens is het belangrijk om naar een scala van compactiemodellen te kijken die de bodemdaling, binnen de fouten, even goed representeren.
  7. Het nu ontwikkelde 3D geomechanisch model ziet de TBO als een eerste stap voor het verkrijgen van meer geomechanisch inzicht. De in de rapportage gepresenteerde voorlopige resultaten roepen echter nog teveel vragen op om er al conclusies aan te verbinden.
  8. De enorme kosten, het verlies van een groot volume aan aardgas en de schaal van de industriële activiteiten en daarmee de impact op het landschap, maken het op dit moment moeilijk voorstelbaar dat stikstofinjectie een acceptabel alternatief productiescenario gaat vormen.

## 4.3 Eindoordeel over onderzoeken 5 en 6

Gedurende het jaar 2013 zijn grote stappen gezet in het verkrijgen van meer begrip van de seismiciteit in het Groningen veld. Toch is gebleken dat nog veel onbekend is en meer onderzoek nodig is. Een handicap is dat er relatief weinig bekend is - uit relevant onderzoek elders ter wereld - over gasvelden vergelijkbaar met het Groningenveld. Dat heeft ten eerste te maken met unieke aspecten van het Groningenveld (één van de grootste gasvolumina ter

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

wereld, een huidige drukdepletie van ca. 200 bar en een dicht meetnetwerk dat het mogelijk maakt alle bevingen sterker dan 1,5 te registreren). Ten tweede zijn er belangrijke lacunes in kennis die samenhangen met het feit dat internationaal onderzoek over aardbevingen zich veelal richt op sterkere (tektonische) aardbevingen en dat daardoor bijvoorbeeld empirische verbanden niet per se geldig zijn voor de lichtere (geïnduceerde) aardbevingen typisch voor Groningen. Dit alles leidt tot grote onzekerheidsmarges in vrijwel alle uitkomsten van de onderzoeken.

De TBO is van oordeel dat de onderzoeken met voldoende onafhankelijkheid zijn opgezet en uitgevoerd en de toets der wetenschappelijke kritiek in het algemeen kunnen doorstaan. Wel wordt aangetekend dat vooral voor het goed beschouwen, doorrekenen en vergelijken van de verschillende denkbare scenario's de tijd ontbrak. Dat gold ook voor grondige besprekingen, o.a. over de keuze van achterliggende parameters, met de TBO.

De TBO acht het van groot belang dat de komende jaren meer onderzoek wordt uitgevoerd, dat onder meer gebruik maakt van de nieuw te vergaren gegevens. Verder is het van belang dat NAM in overleg met derden een uitgebreid en hoog kwalitatief meetprogramma uitvoert en de resultaten daarvan deelt met onafhankelijke partijen. Op deze wijze wordt niet alleen al het mogelijke gedaan om op basis van meer kennis en inzichten eventuele maatregelen in de toekomst te onderbouwen, maar kan bovendien de bovengeschetste unieke situatie rondom het Groningen veld worden benut om tot een wereldwijd gezien unieke kennispositie op het gebied van geïnduceerde seismiciteit te komen.

Het onderzoek gedaan door NAM in het afgelopen jaar berustte in hoge mate op het uitwerken van het idee dat de hoeveelheid compactie van het reservoir (en daarmee de volumeverandering) de sleutel kan vormen tot het doen van voorspellingen van de ontwikkeling van seismiciteit. Immers, door de beschikbaarheid van een zeer gedetailleerd geologisch 3D model van de ondergrond van Groningen en een grote hoeveelheid productiecijfers en drukgegevens vergaard in meer dan 50 jaar, kan in principe door middel van een reservoirsimulator de compactie bij een gegeven productiescenario goed worden voorspeld. Niettegenstaande de waardering van de TBO voor deze aanpak en voor de kwaliteit van de analyses, plaatst de TBO hierbij enkele kanttekeningen.

- Die voorspelbaarheid van de compactie is afhankelijk van de kwaliteit van het gebruikte compactiemodel. Hierover is het laatste jaar veel discussie gevoerd. Het lijkt erop dat deze discussie nu wel tot convergentie gaat leiden, maar consensus is er nog niet. Er resteert nog een belangrijke mate van onzekerheid; verschillende modellen verklaren alle de metingen tot nu toe en bij alle modellen kan gekozen worden voor verschillende waarden van de parameters. Verwacht wordt dat onderzoek en de extra gegevens die vanaf 2014 beschikbaar komen in de komende jaren tot aanzienlijke reductie van deze onzekerheid zullen leiden.
- De gekozen benadering impliceert dat de reservoircompactie vertaald kan worden naar seismiciteit. Het onderzoek gebruikt voor deze vertaling de zogenaamde partiticoëfficiënt. Er is veel discussie gevoerd over deze factor. Een goed fysisch begrip van de factor ontbreekt, bovendien laten de statistische analyses zien dat de factor niet

# Technische Begeleidingscommissie Ondergrond

constant is in de tijd. Hierdoor rijst de vraag waar die verandering van de partitievoëfficiënt in de tijd precies van afhangt.

- Het is gewenst om verder onderzoek te doen naar de afhankelijkheid van de partitievoëfficiënt van andere factoren dan de compactie, zoals de breukdichtheid en de compactiesnelheid.
- Het is verstandig om open te blijven staan voor andere ideeën dan het trachten te voorspellen van de seismiciteit via de route van compactie alleen. Differentiële compactie en breuken zijn waarschijnlijk van grote invloed op de seismiciteit. Op dit moment is nog niet duidelijk of full field 3D geomechanische modeleringen ooit tot betrouwbaarder resultaten zullen kunnen leiden.

De TBO is van mening dat er, gezien de grote onzekerheden voor de verdere toekomst, op dit moment alleen voldoende zekerheid bestaat over de seismische hazard in de komende drie tot vijf jaar. Nader onderzoek en verdere verzameling van gegevens zijn nodig om ook voor de langere termijn voldoende zekerheid voor besluitvorming te verkrijgen.

De onderzoeken hebben geen hard antwoord kunnen geven op de oorspronkelijke vraag van de minister m.b.t. de maximale magnitude. Een statistische analyse van NAM laat zien dat de kans op het optreden van een beving met  $M > 4,9$  in de komende tien jaar 10% zou zijn. Daarbij is de aanname dat de tot dusver waargenomen trend zich voortzet, hetgeen niet geheel zeker is. Bovendien maakt die statistische analyse geen gebruik van kennis over breuken. Er zijn wel pogingen ondernomen om de maximale magnitude te berekenen uit informatie over breuken, maar de uitkomsten van die berekeningen zijn sterk afhankelijk van de aannames die gemaakt moeten worden. De onderbouwing van de aannames is volgens de TBO zwak. Al met al is de inschatting van de TBO op basis van wat nu bekend is, dat de kans dat de maximaal waarschijnlijke magnitude boven de 5 zal liggen klein is. Op basis van de nu beschikbare data en kennis kunnen bevingen met een magnitude hoger dan 5 echter niet volledig worden uitgesloten. Ook op dit punt zal het beschikbaar komen van meer gegevens in de komende jaren de onzekerheid kunnen reduceren.