

Energie
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

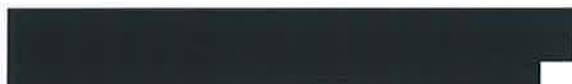
TNO-rapport

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 vermenigvuldigd 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): 

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 tijdvertragingmodel (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 m³ in 2023, terwijl deze verschillen volgens het Time-Decay model in 2023 slechts 17 miljoen m³ 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 m³ 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 ont koppeling 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

	Managementuittreksel	2
	Samenvatting	4
1	Inleiding	19
2	Statisch model	21
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
3	Dynamisch model van de NAM	49
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
4	Bodemdalingsmetingen	66
4.1	Differentiestaat NAM.....	66
4.2	Analyse voor stabiele peilmerken.....	66
4.3	Conclusies en aanbevelingen.....	70
5	Compactie modellering	71
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
6	Geomechanische modellering	108
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
7	Seismische hazard analyse	132
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

8	Discussie en Conclusies seismische hazard	154
8.1	Modellen	154
8.2	Gevolgen voor bodembeweging (winningsplan)	158
9	Referenties	159
10	Ondertekening	163
11	Appendices	164
	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 strategiën (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 strategiën (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 strategiën (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 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).	85
Figuur 5.7	Porositeitsverdeling in het Groningen MORES model van NAM.	86
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.	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
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.	90
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.	90
Figuur 5.12 Verdeling van de fout in de bodemdaling voor de drie compactiemodellen.	91
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.	92
Figuur 5.14 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
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.	94
Figuur 5.16 Verschil in druk (in bar) tussen het sterke en zwakke aquifer scenario in 2013. De druk in het zwakke aquifer scenario is lager.	95
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.	96
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).	97
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.	98
Figuur 5.20 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
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.	100

Figuur 5.22	Cumulatieve compactie in miljoen m^3 voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het lineair isotach model.	101
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.	102
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.	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_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.	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 ($E_{\text{young}} = 7,5 \text{ GPa}$) 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 $2GdV_{\text{res}}$, 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 $dV_{\text{gas}}/V_{\text{gasinit}}$). 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 $b=1$, $M_{\text{min}}=1,5$ en $M_{\text{max}}=4,5$ (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 ³).	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 magnitude in kolom 3.	133
Tabel 7.2.	Overschrijdingskansen voor PGA in 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).	138
Tabel 7.3.	Overschrijdingskansen voor PGA in 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).	138
Tabel 7.4.	Overschrijdingskansen voor PGA in 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).	138
Tabel 7.5.	Overschrijdingskansen voor PGA in 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).	141

1 Inleiding

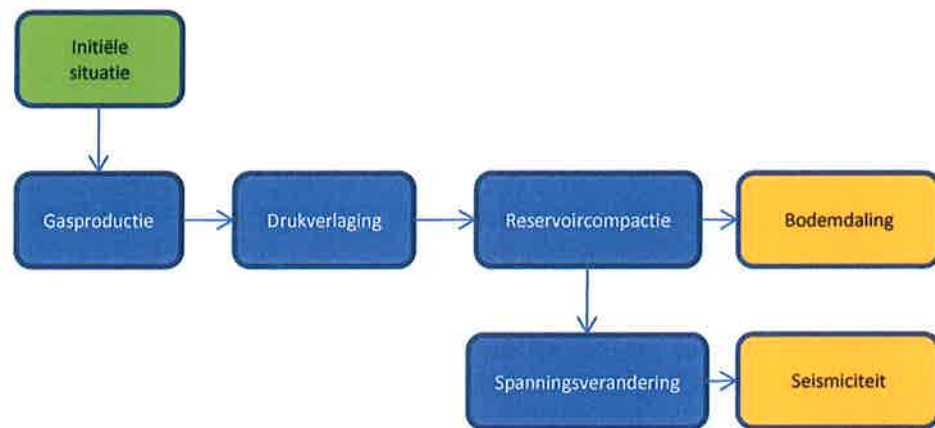
Het Groningen gasveld is sinds 1964 in productie. Als gevolg van deze productie vond in 1991 in Middelstum de eerste, aan gasdepletie gerelateerde beving plaats. Deze beving had een kracht van 2,4 op de schaal van Richter. Sindsdien hebben zich honderden, meestal kleine ($M < 1.5$) bevingen voorgedaan 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 bodemdalingsmetingen. 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).

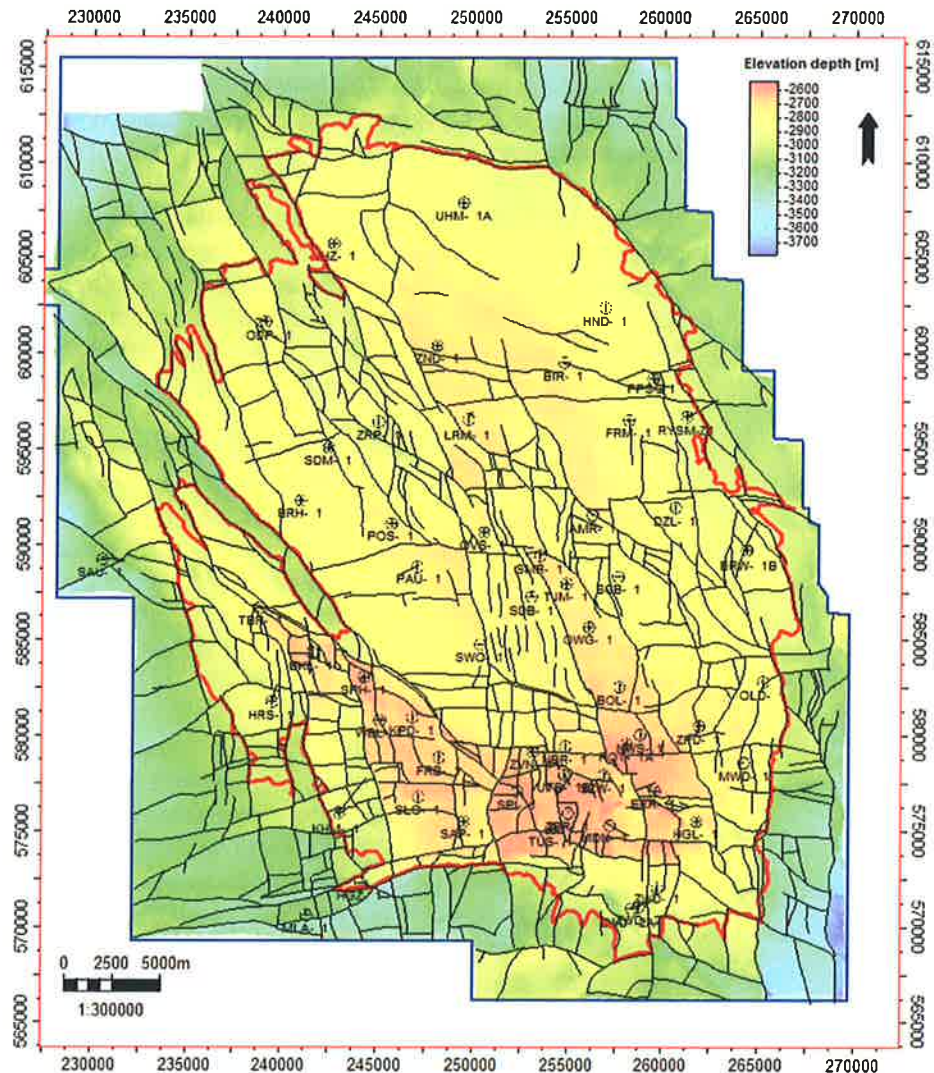
Het [REDACTED] statische model (NAM, 2012a) is het resultaat van een revisie van het Groningen veld door NAM geïnitieerd in 2009. Het vorige model stamt uit 2003 (NAM, 2003) en bestond uit een grover grid. Het bijbehorende dynamische model onderschatte de gemeten reservoirdrukken. Andere redenen om het 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 Diepte kaart 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 Rotliggend 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.

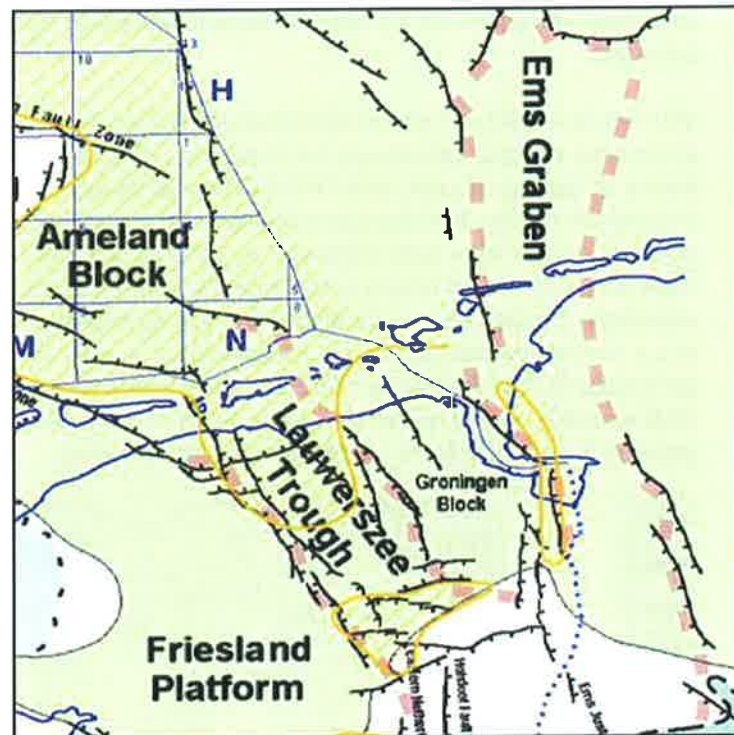
In tegenstelling tot de GFR2003 studie waarin slechts één seismische survey werd gebruikt (PreSDM R826_2), worden in de [REDACTED] drie seismische surveys gebruikt door NAM:

- 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 Rotliegend 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

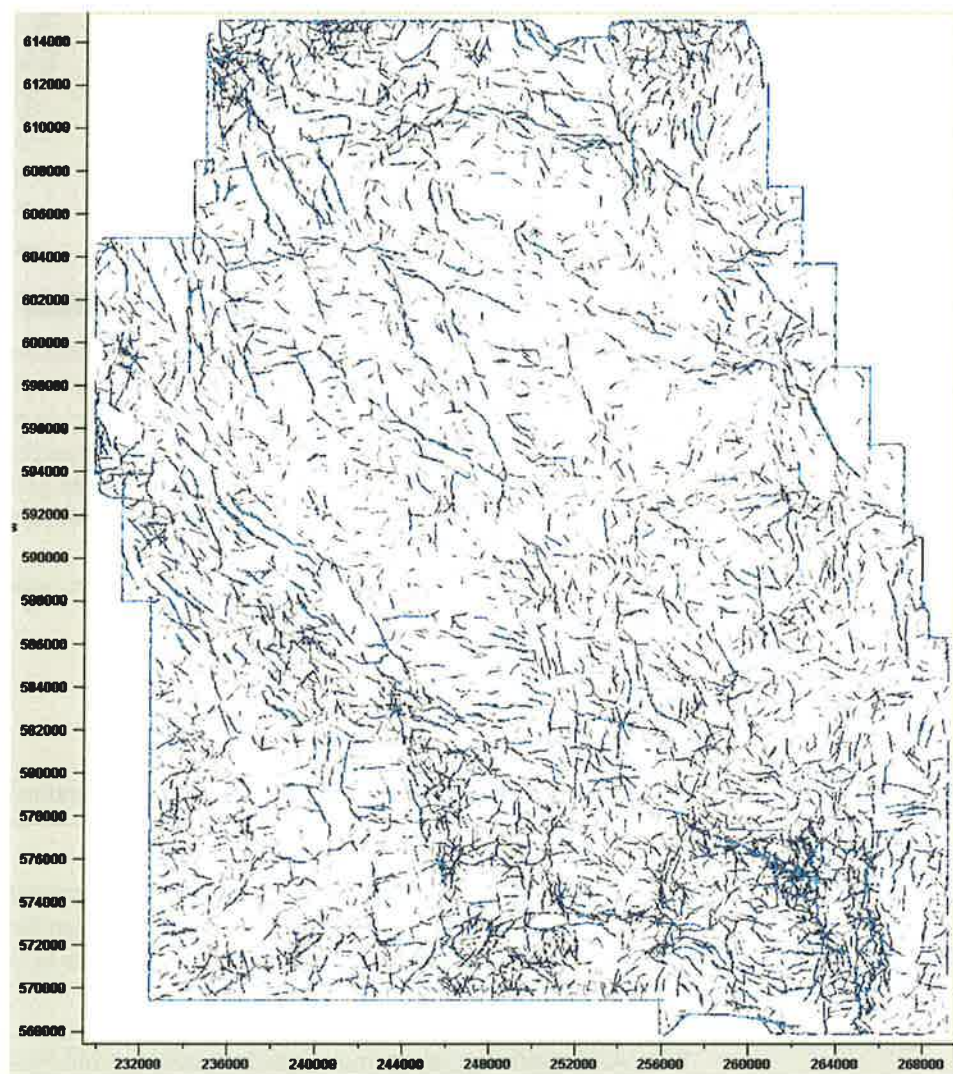
Elk van de vier gebieden bevat een set met '*major-boundary faults*' en een aantal sets met '*minor faults*'.

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.

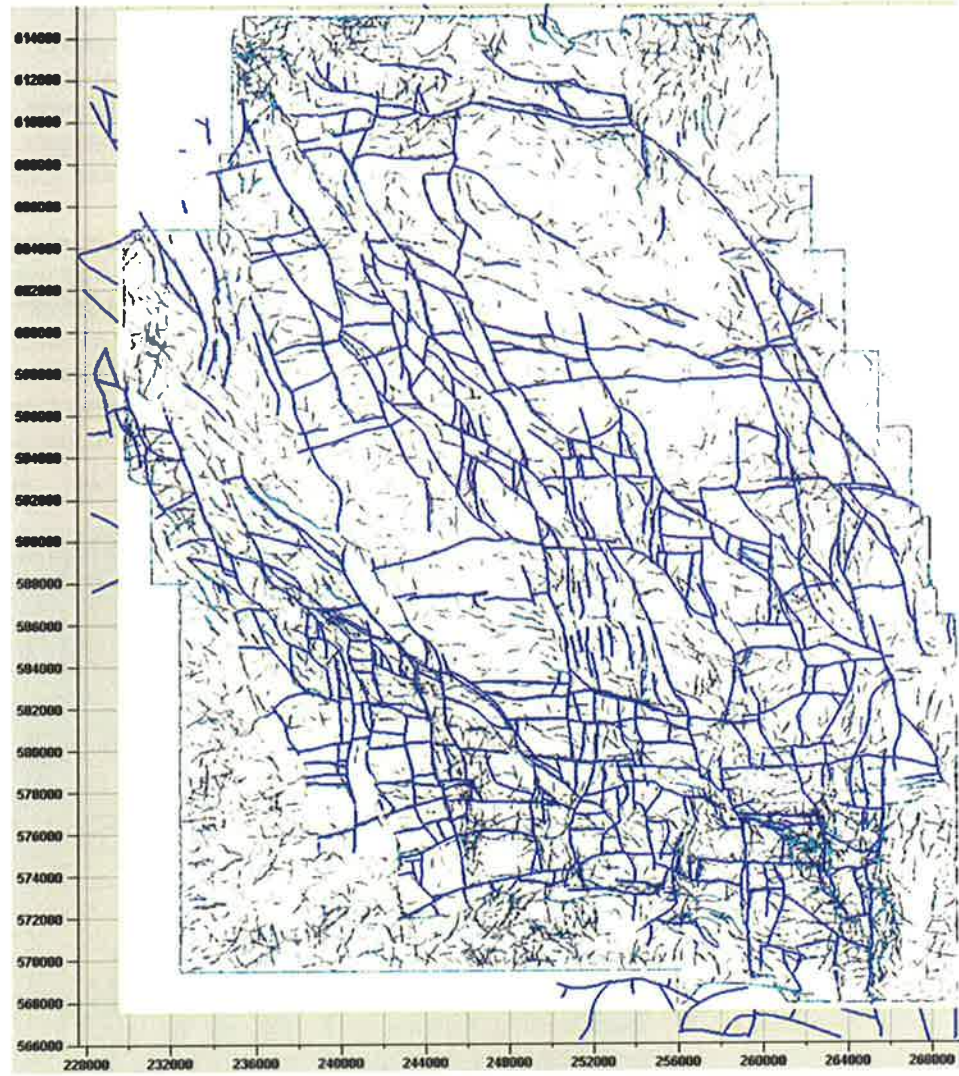
TNO-AGE heeft voor alle gemodelleerde breuken in het model lengte, oppervlak, hellingshoek en inclinatie bepaald. Tevens is voor elke gemodelleerde breuk de juxtapositie langs de breuk berekend. De individuele breuk data is naar Matlab geëxporteerd voor de geomechanische analyse (Hoofdstuk 6). Hiervoor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



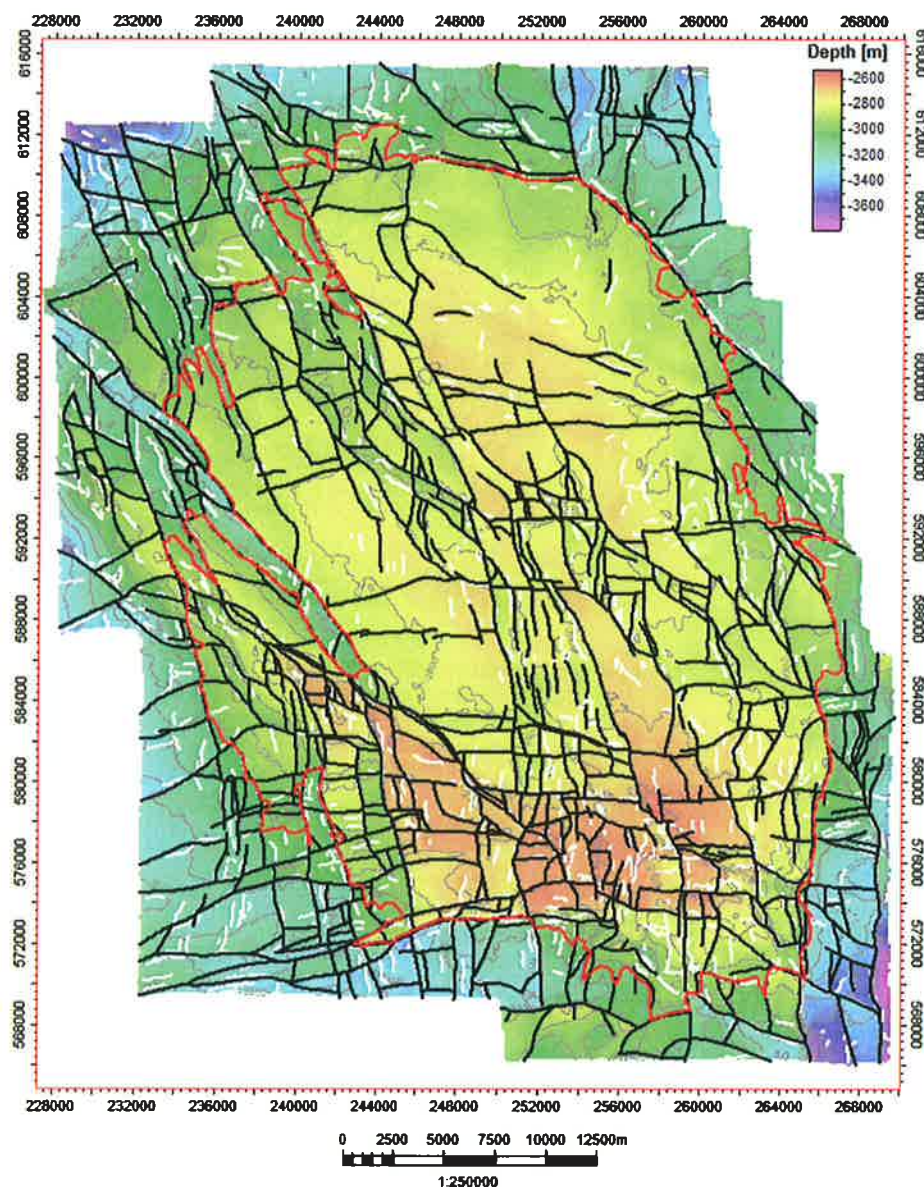
Figuur 2.3 Doorsnede op 3020 m diepte van het Ant Tracking volume (R2296_07Ant_Tracking) van NAM.



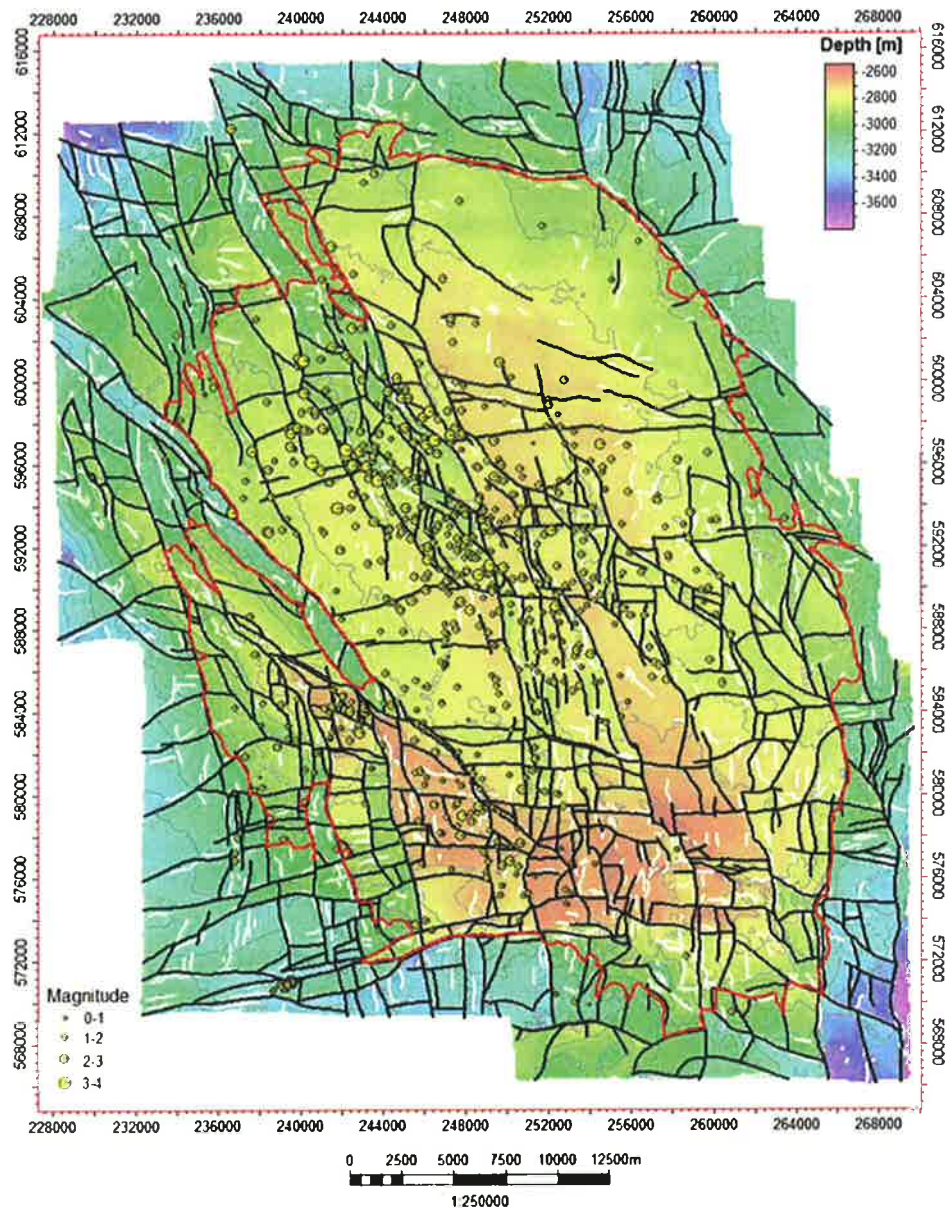
Figuur 2.4 Doorsnede op 3020 m diepte van het Ant Tracking volume van NAM (R2296_07Ant_Tracking), met weergave van de door NAM gemodelleerde breuken.

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. Doorsnedes 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).

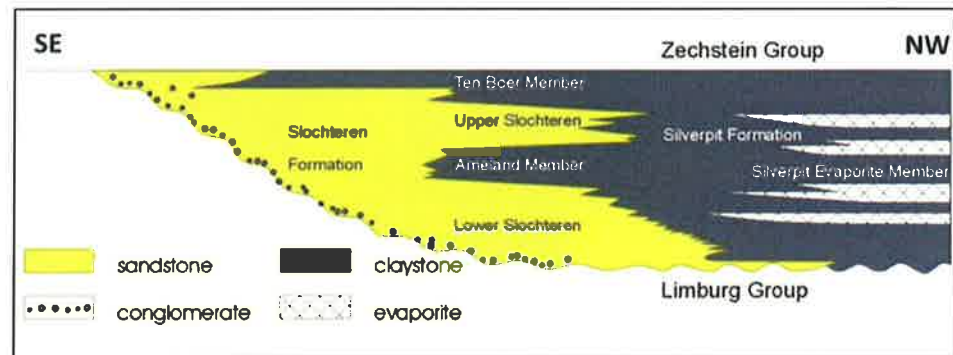


Figuur 2.6 Top Rotliedend dieptekaart met de gemodelleerde breuken (zwart) en de additionele breuken (wit), waarop de seismiciteit, geregistreerd door het KNMI, is weergegeven.

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), 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).

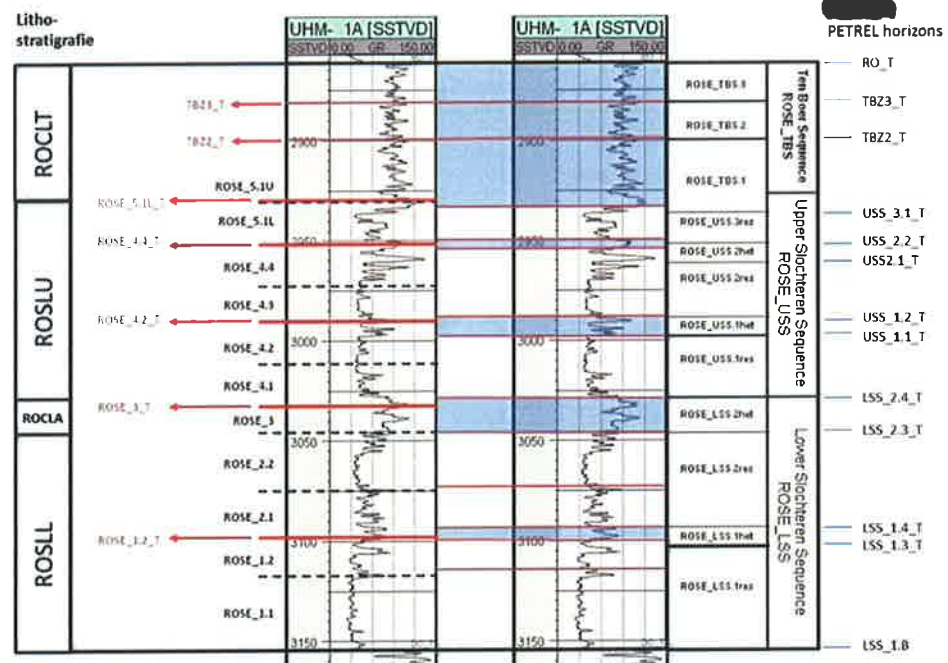


Figuur 2.7 Doorsnede NW-ZO toont het stratigrafische model van het Rotliegend over de Groningen regio ([REDACTED]).

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 verbreding 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

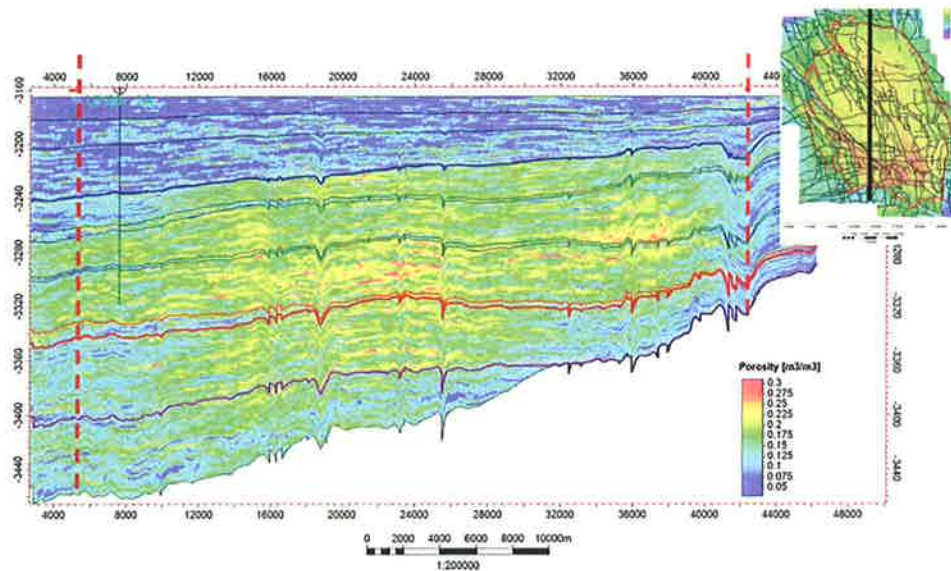
Use minimum cell thickness: 1 Include proportional/fractions, start from: Top

Zone specific settings

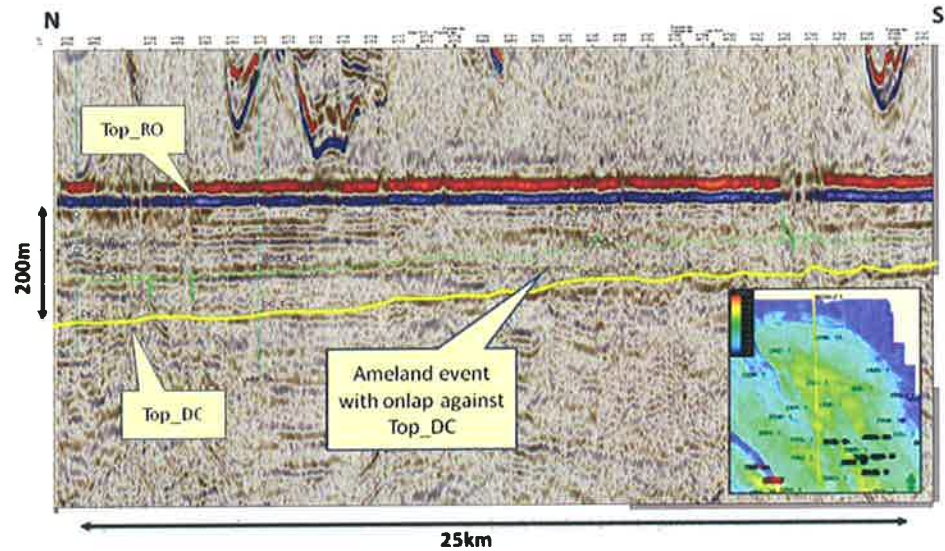
Zone division: Reference surface: Restore eroded: Restore base:

Name	Color	Calculate	Zone division	Reference surface	Restore eroded	Restore base	Status
TBS.3	[Blue]	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
TBS.2	[Blue]	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Proportional Number of layers: 10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Yes	<input type="checkbox"/> Yes	✓ Done
TBS.1	[Blue]	<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	[Green]	<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	[Green]	<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	[Orange]	<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	[Purple]	<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	[Purple]	<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	[Light Blue]	<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	[Light Green]	<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	[Yellow]	<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	[Red]	<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').

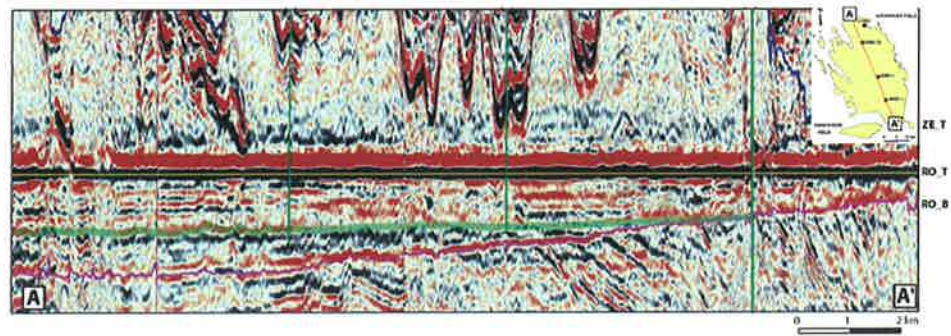


Figuur 2.10 Noord-Zuid doorsnede door het porositeitsgrid en stratigrafie in het [redacted] model (geplat op RO_T). LSS_1.3_T (paars) toont de onlap configuratie op het Carboon. De overige horizons zijn volgens het 'wedge'-model gemodelleerd. De rode stippellijn geeft de Groningen veldgrens weer.

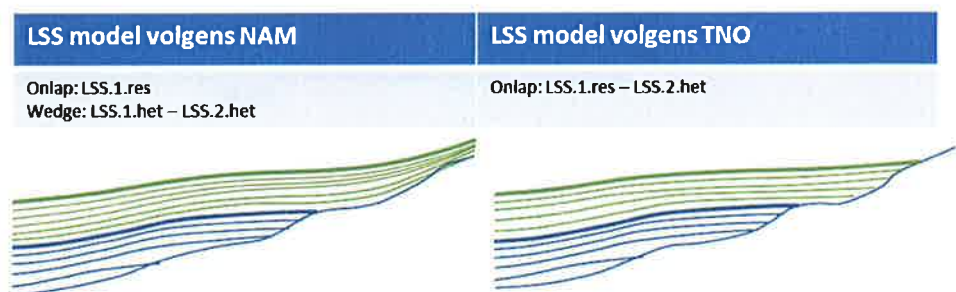


Figuur 2.11 Seismische doorsnede die de onlap toont van de Ameland lithostratigrafische zone op het Carboon (). Er lijkt een verschil tussen het putniveau "ROCLA_HST" en de seismische interpretatie "Ameland event with onlap against Top_DC".

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 XXXXXXXXXX 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:

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

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:

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

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 porositeits-model, maar heeft een aantal kritische kanttekeningen bij de individuele stappen en aannames binnen deze methodiek. Deze kanttekeningen worden in de volgende paragrafen toegelicht.

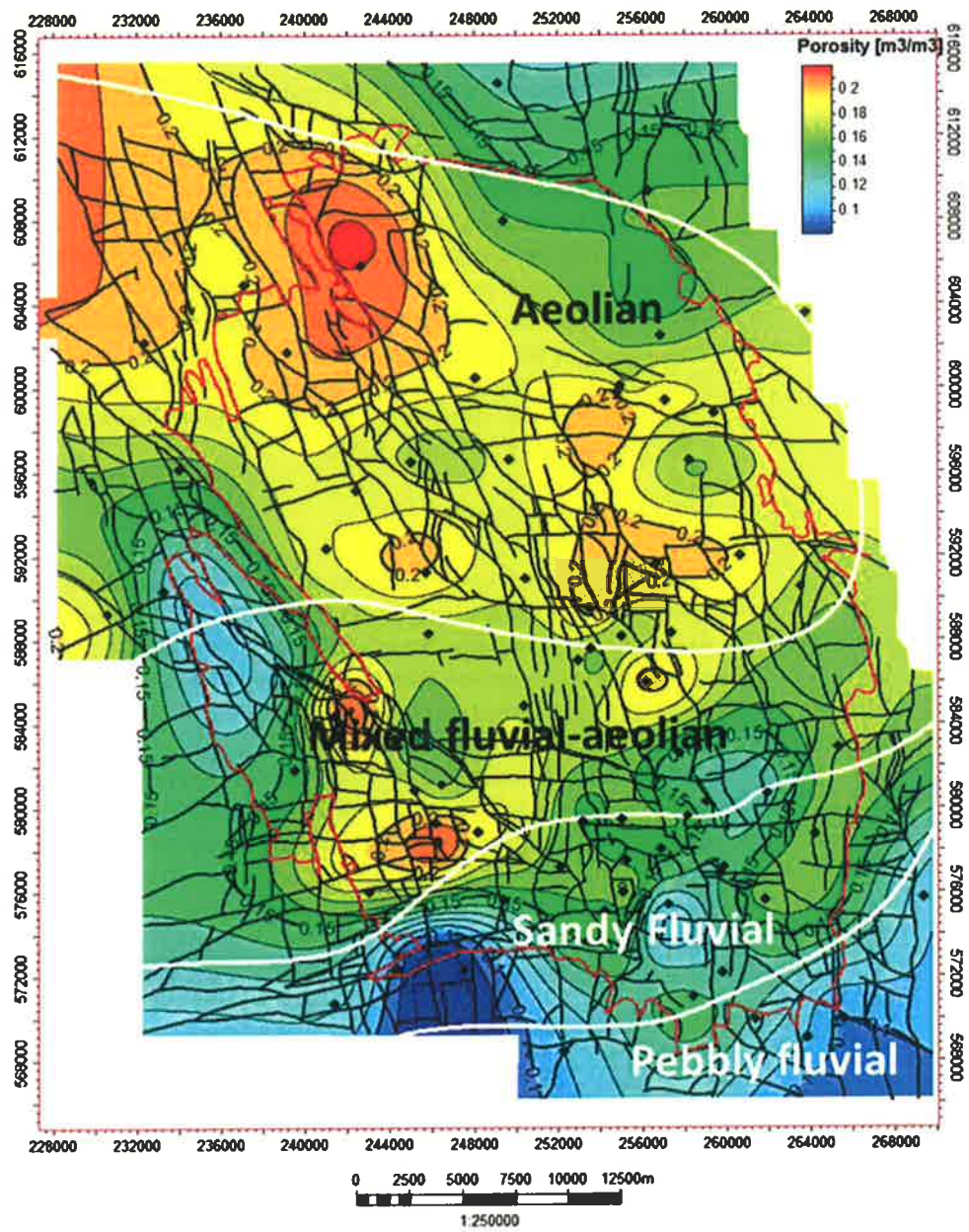
2.5.2.1 *Geologische sturing*

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]).

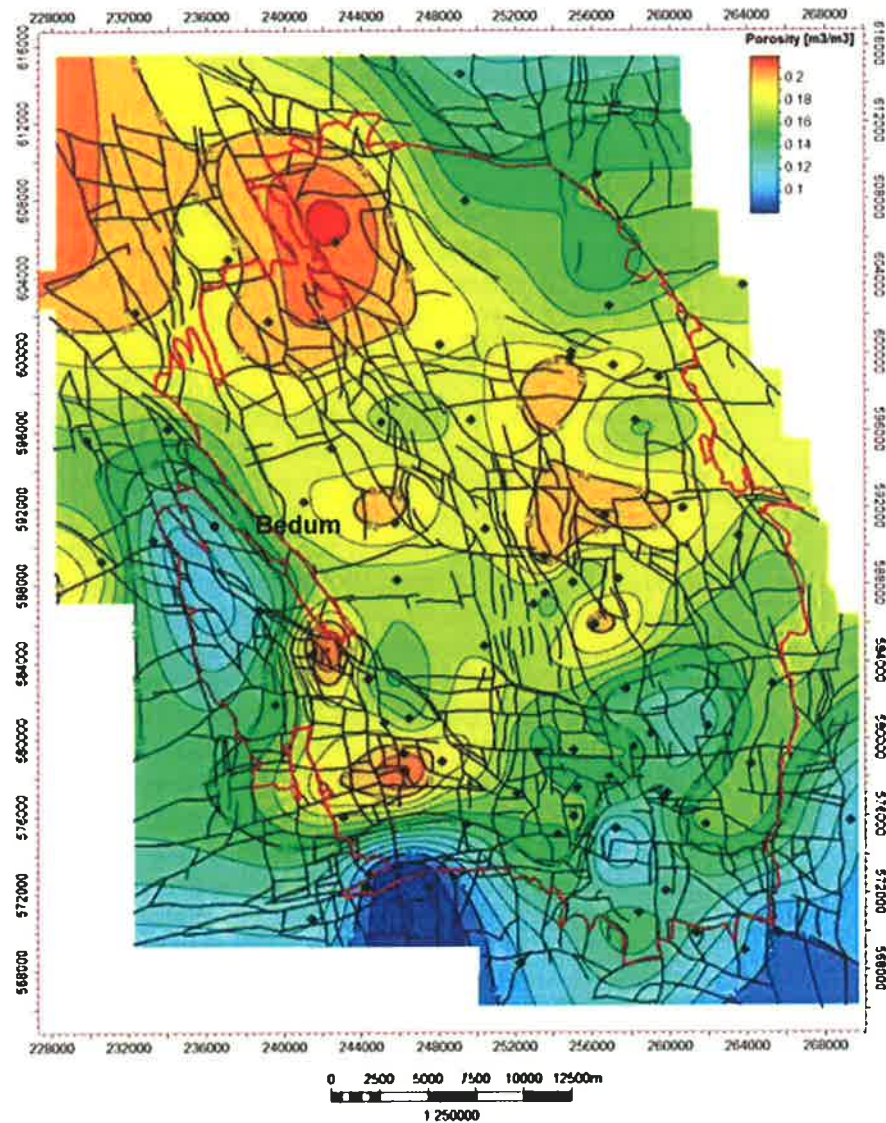
2.5.2.2 *Gebruik Netto-Bruto als co-variabele*

Uit de informatie die NAM heeft aangeleverd ([REDACTED] 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 colocated 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.

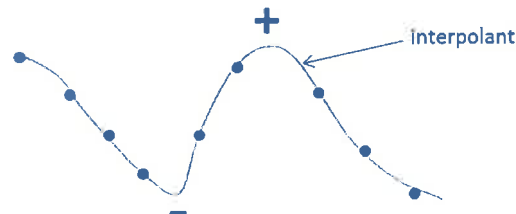
2.5.2.3 *Interpolatie van trendkaarten*

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 ([REDACTED]).



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.



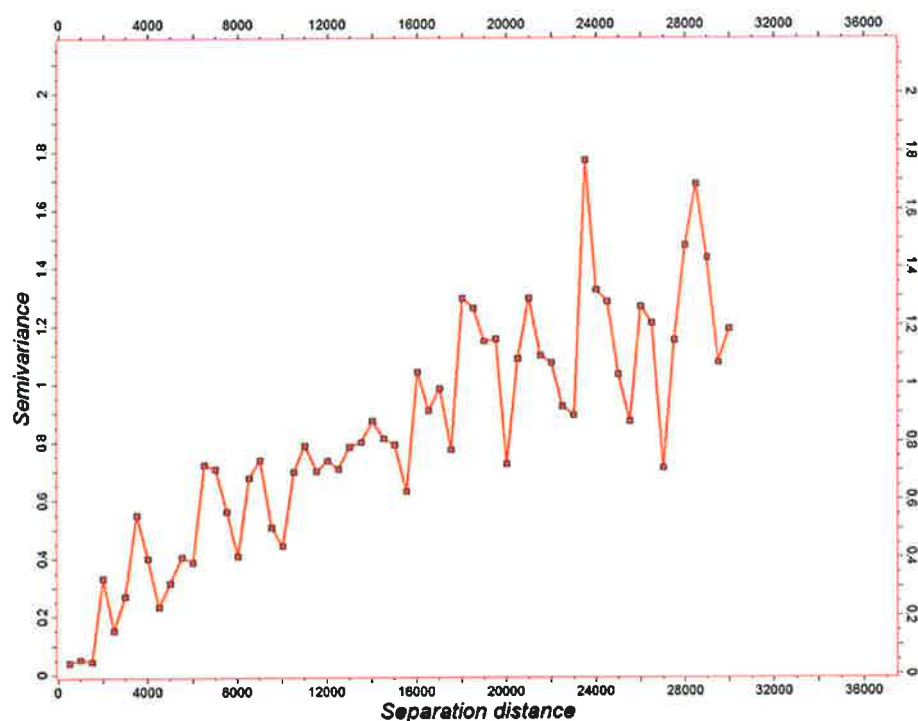
Figuur 2.16 Visualisatie van mogelijke over- en onderschatting die kan optreden bij interpolatie.

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.

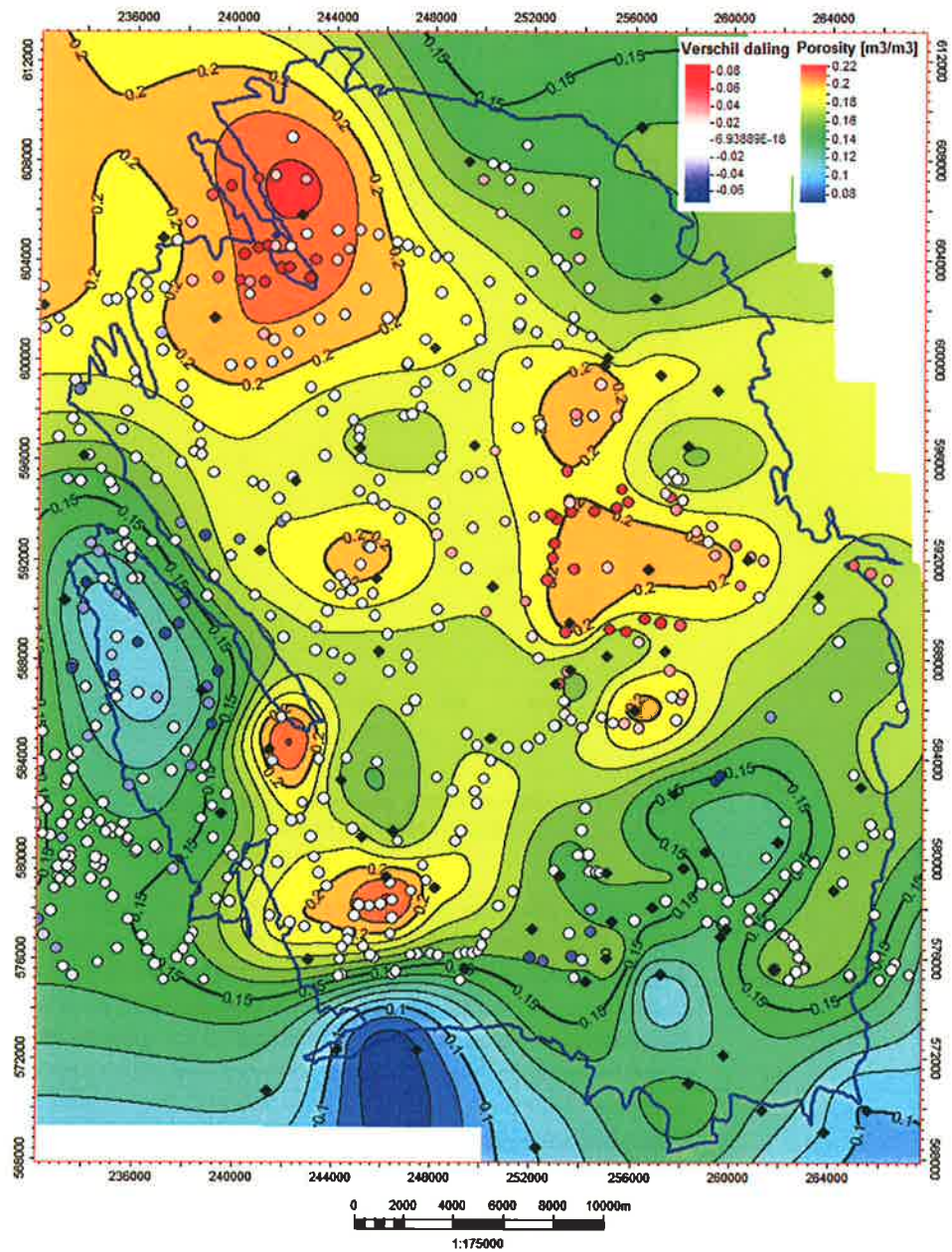
Aangezien de trendkaarten van gemiddelde porositeit veel invloed hebben op het uiteindelijke gemiddelde porositeitsmodel, heeft TNO-AGE er voor gekozen om een indicatie van de onzekerheidsbandbreedte af te leiden uit een vereenvoudigde analyse van de trenddata. Figuur 2.18 laat bijvoorbeeld zien dat 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.



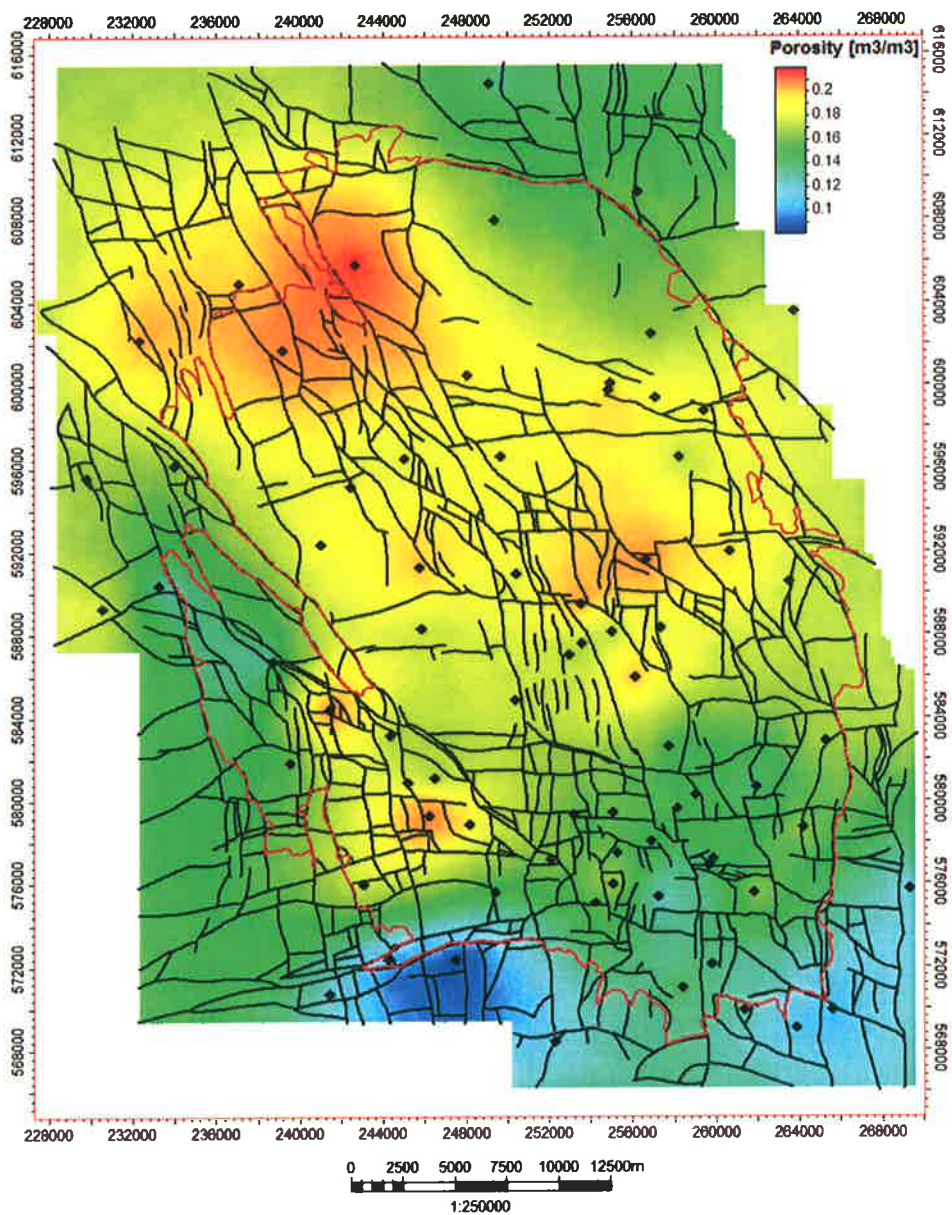
Figuur 2.17 Semivariogram voor putdata gebruikt voor de trendmap voor de middelste Upper Slochteren reservoir zone (USS2.res).

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.

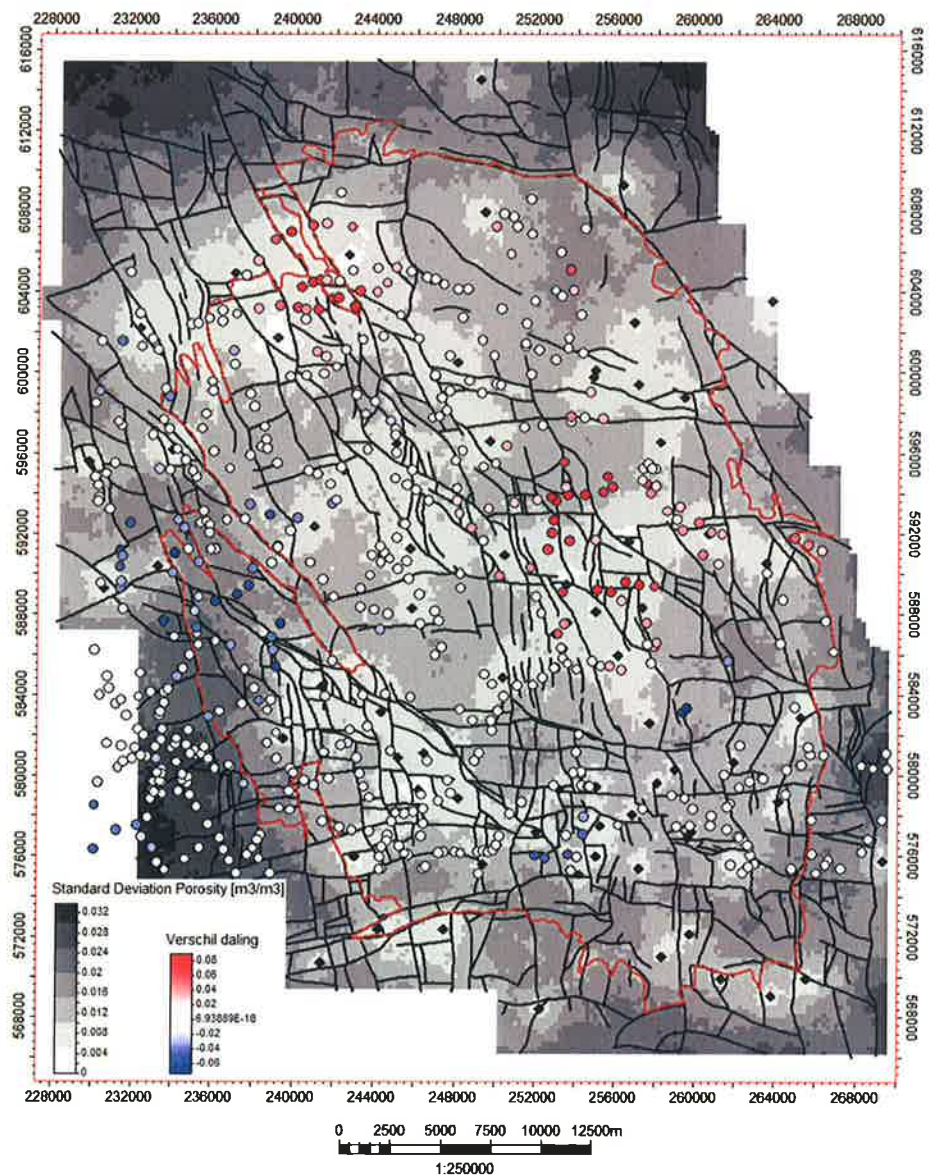
Voor een uitgebreidere analyse en beter onderbouwde kwantificering van de onzekerheidsbandbreedte adviseert TNO-AGE om deze af te leiden uit de 3D gemodelleerde porositeit voor alle reservoirzones.



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.



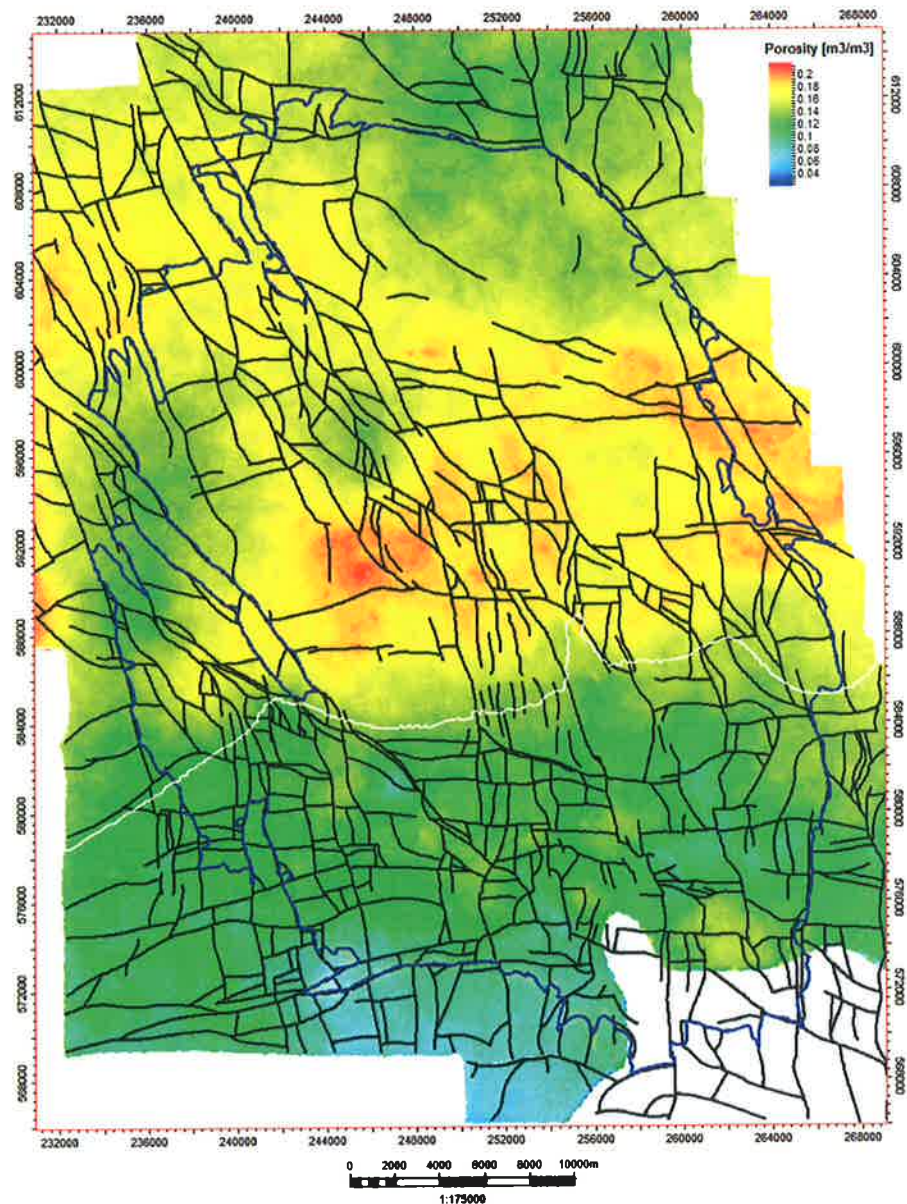
Figuur 2.20 Standaarddeviatie van de door TNO gemaakte trendmap van de USS.2.res zone. De cirkels geven het verschil in berekende en geobserveerde bodemdaling weer (blauw= meer bodemdaling geobserveerd dan berekend).

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.

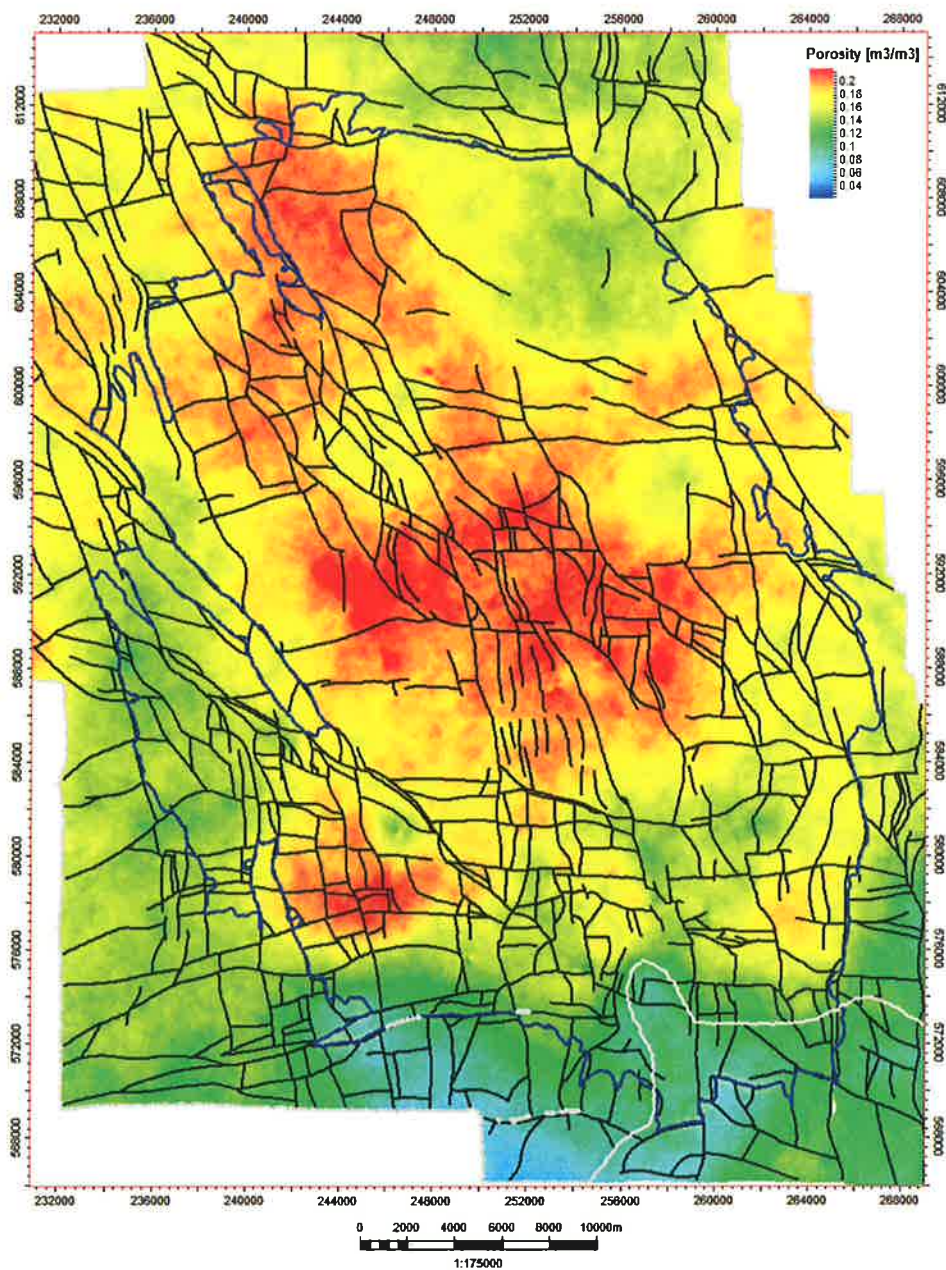
2.5.4 Porositeitsmodel vs. stratigrafisch model

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 Carboon.

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 modellerenproces 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).

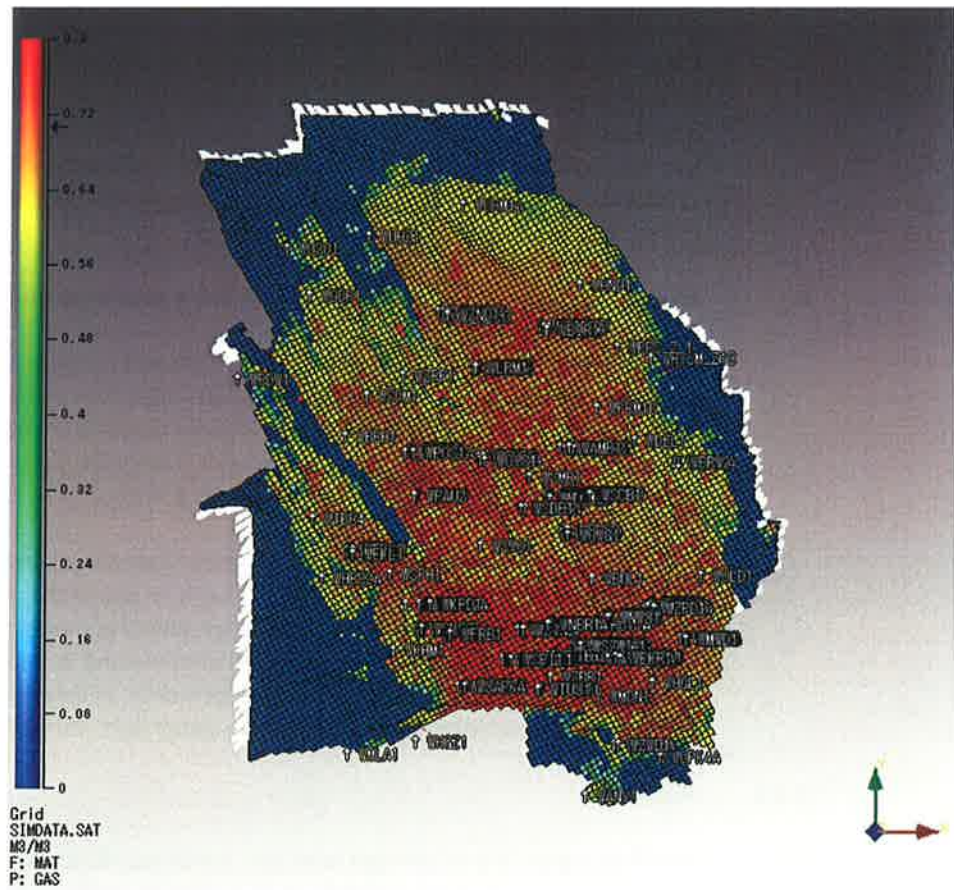
3.1.1 Aquifers

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.

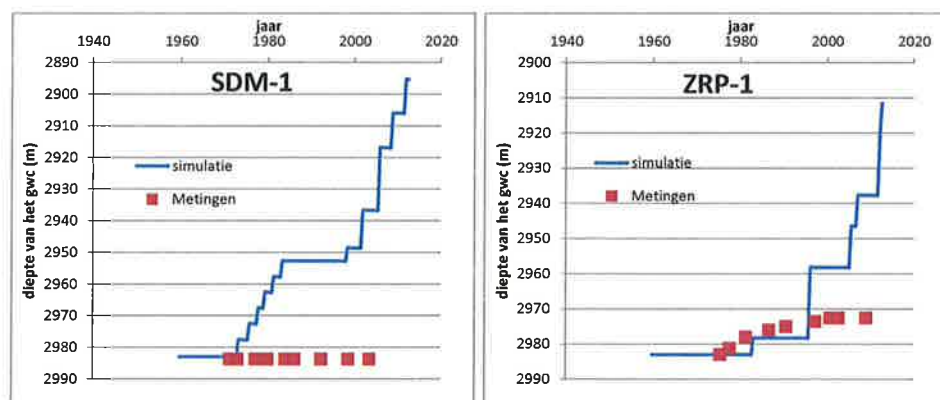
Ook de gasvelden Annerveen, Bedum, Kielwindeweer, Warffum en Oude Pekela worden inactief verondersteld in het model, omdat ze niet of nauwelijks (bijvoorbeeld via watervoerende lagen) in contact staan met het Groningen veld. Het is buiten de scope van dit project om te controleren of deze aannamen correct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

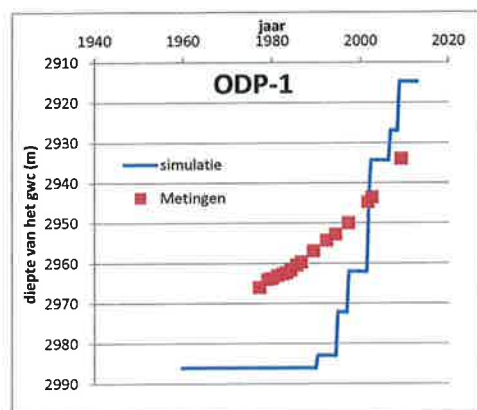
putten zie Appendix B. Aangezien dit observatieputten betreft, geven de metingen een indruk van de algemene stijging van het contact en is het niet het lokale effect van coning. Het effect van de sterke aquifer is een hogere druk – en daarmee een lagere compactie – in de noordwest hoek van het model.



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).

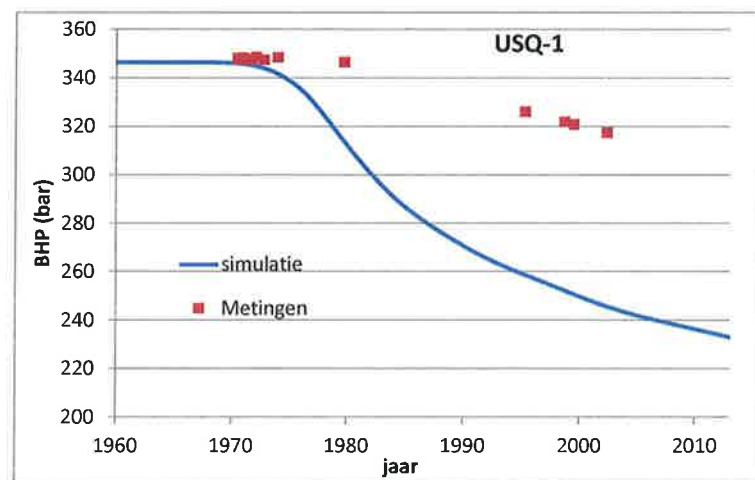
Een overzicht van de 20 slechtst gefitte druk-meetpunten (10 meest overschatte en 10 meest onderschatte) staat in Tabel 3.1 (zie Appendix B voor de locaties). In het begin van de ontwikkeling van het veld (jaren '70) werden de drukken minder goed gefit (fouten tot ~10 bar), met name in het cluster ZVN. 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 slechts 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).

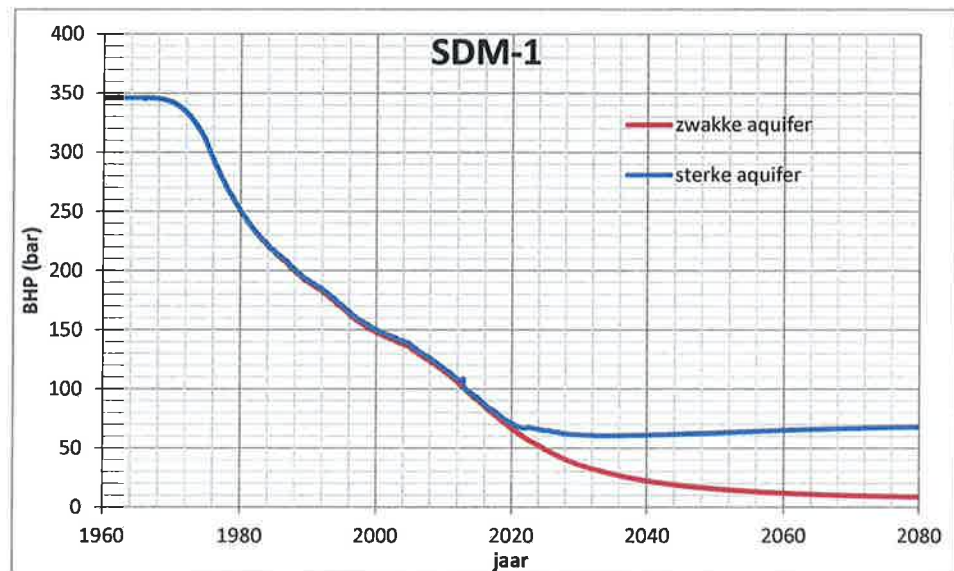
3.2 Onzekerheidsanalyse dynamisch model m.b.t. modelleren van compactie

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.

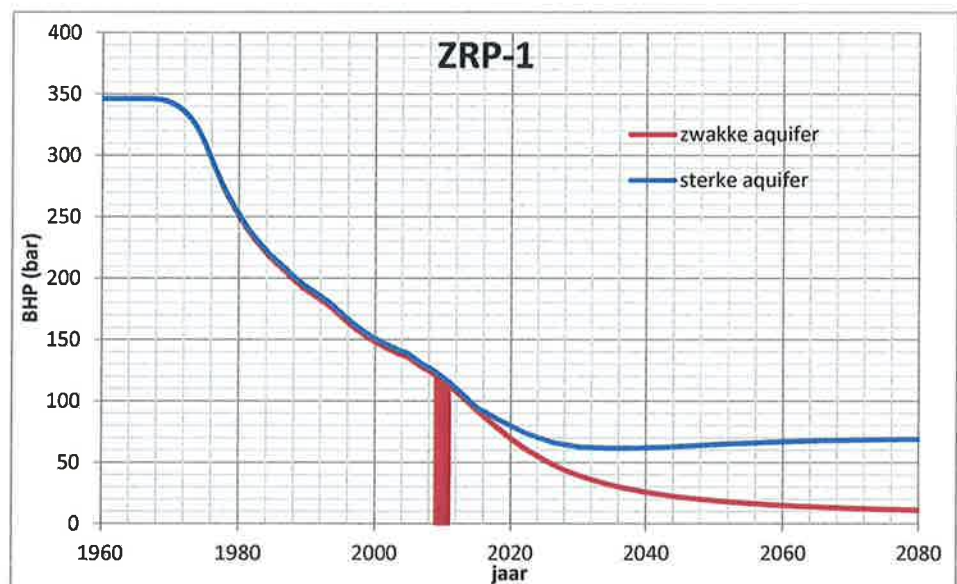
Een additionele onzekerheid is het gebruik van analytische aquifers in het model. De drukkaling in deze gebieden wordt namelijk niet bij de compactie berekeningen meegenomen hetgeen aan de randen in een consequente onderschatting van de compactie resulteert. De gesimuleerde instroom van de analytische aquifers in het model is $4,8 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ 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.



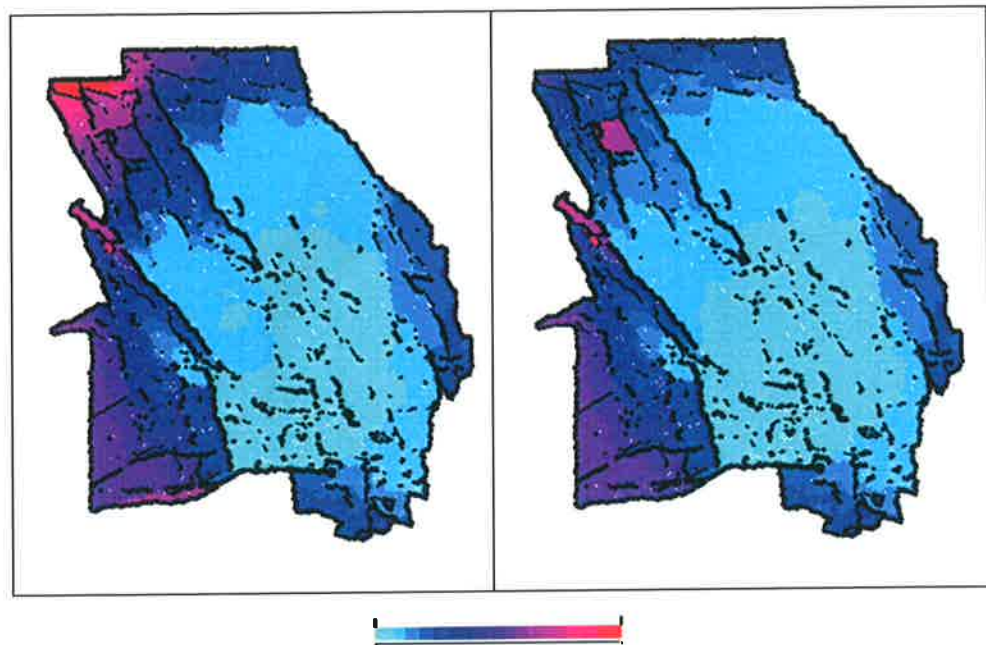
Figuur 3.6 Ontwikkeling van de druk in ZRP-1 tot 2080 voor een zwakke en een sterke aquifer.

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.

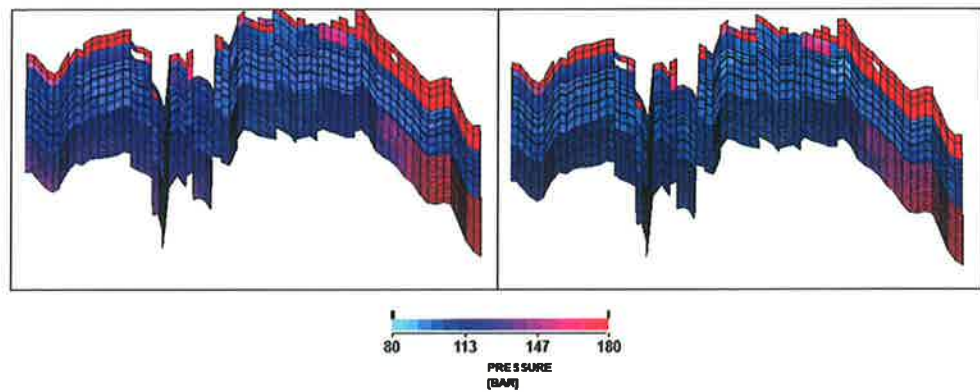
Een andere onzekerheid is het Carboon. Hoewel dit weinig effect heeft op de productie, zou het effect op de compactie mogelijk wat groter kunnen zijn. Ook de ruimtelijke variatie in bodemdaling zou door het Carboon beïnvloed kunnen worden, aangezien Carboon zanden vooral in het zuidelijk deel van het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

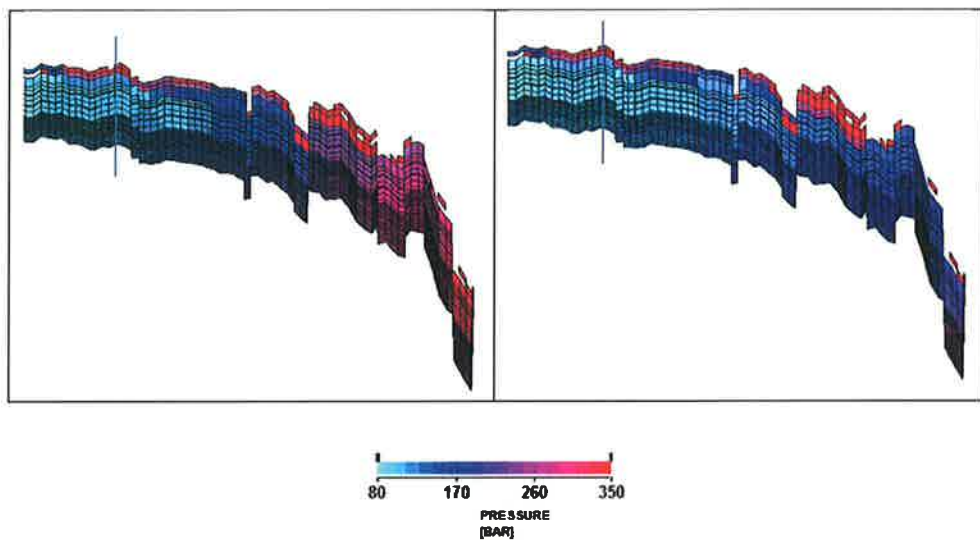
De onzekerheid in de doorlatendheid van breuken heeft waarschijnlijk vooral een lokaal effect aan de randen van het model. In het centrale deel van het veld zijn de breuken, met zeer grote waarschijnlijkheid, allemaal goed doorlatend. Een voorbeeld waar de onzekerheid in de doorlatendheid van breuken 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 Nm³).

Scenario naam	Beschrijving
Marktvraag	Productie volgt de marktvraag (versimpeld); ongewijzigd scenario zoals door NAM aangeleverd
40 bcm	Constate vraag van 40 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
30 bcm	Constate vraag van 30 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
20 bcm	Constate vraag van 20 bcm per jaar vanaf 1-1-2014
10 bcm	Constate 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

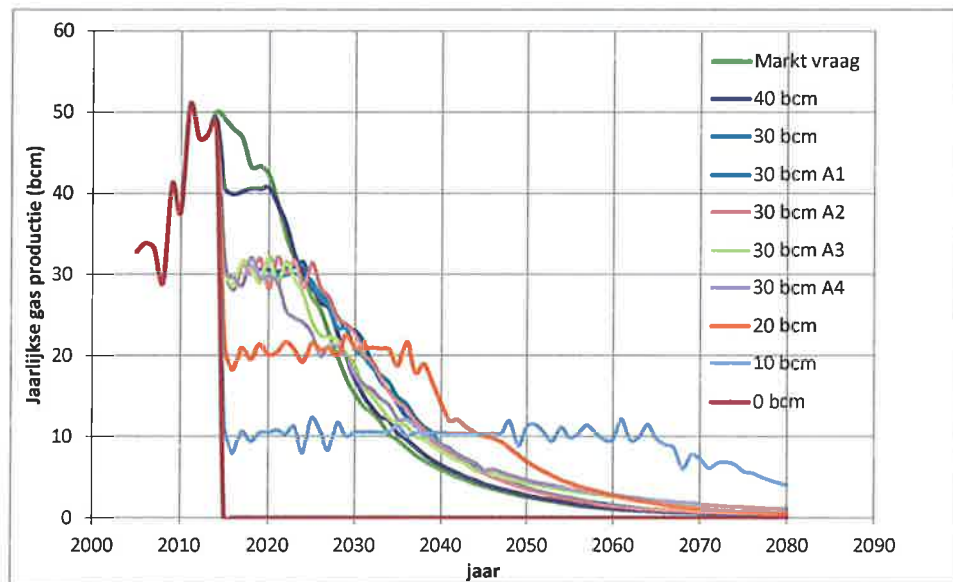
Opmerkingen:

- 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.

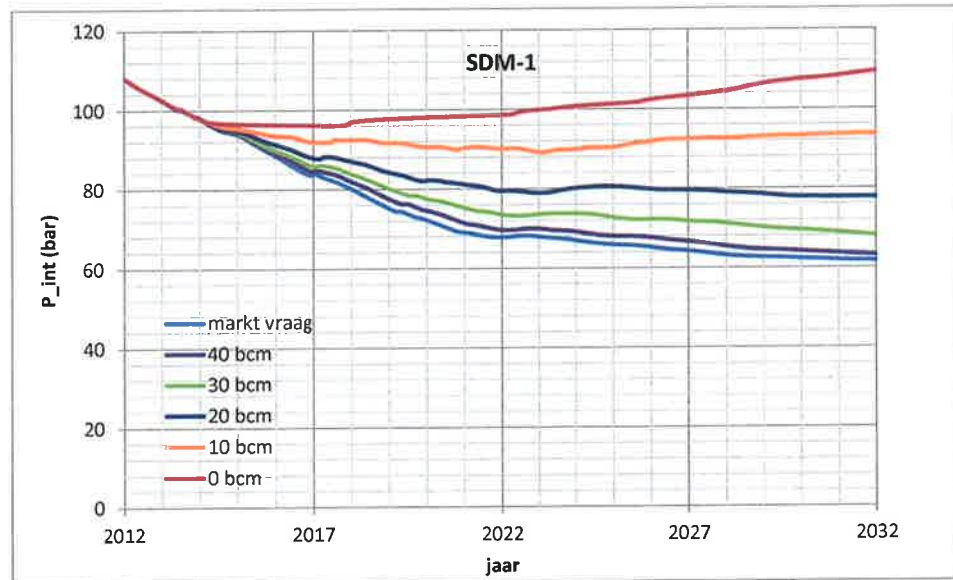
Tabel 3.3 Overzicht van de afname in gas productie voor de verschillende scenario's voor de periode 1-1-2014 tot 1-1-2080.

Scenario	Cum. gas productie van 1-1-2014 tot 1-1-2080 (mrd Nm ³)	% 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

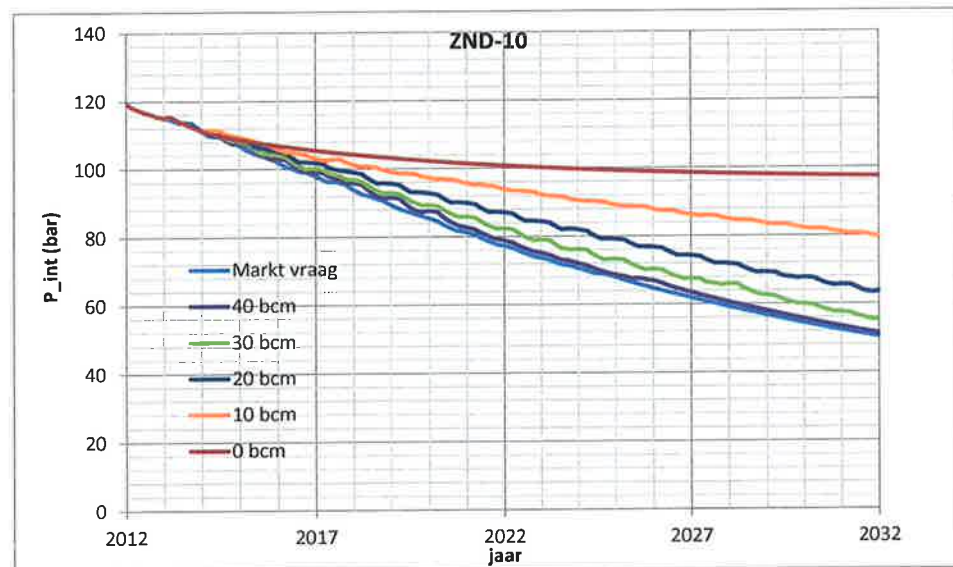


Figuur 3.10 Overzicht van de jaarlijkse productie voor alle gerunde scenario's.

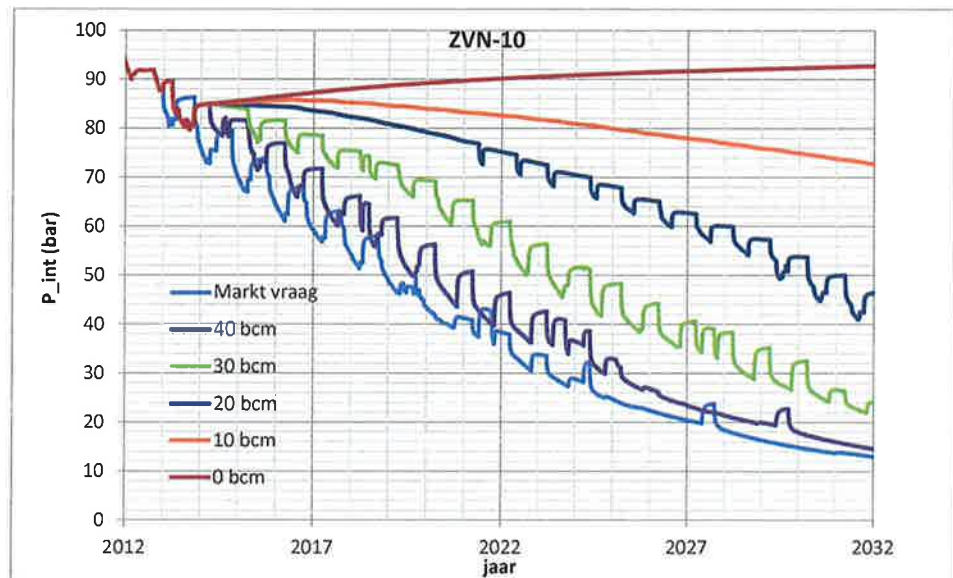
Voor de scenario's met afnemende maximale productie (Figuur 3.11 t/m Figuur 3.13), is een gestage toename in de druk te zien in alle drie de putten. Het 40 bcm scenario geeft zeer vergelijkbare resultaten als het markt vraag scenario. Voor het scenario waar de productie per 1-1-2014 gestopt wordt neemt 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.

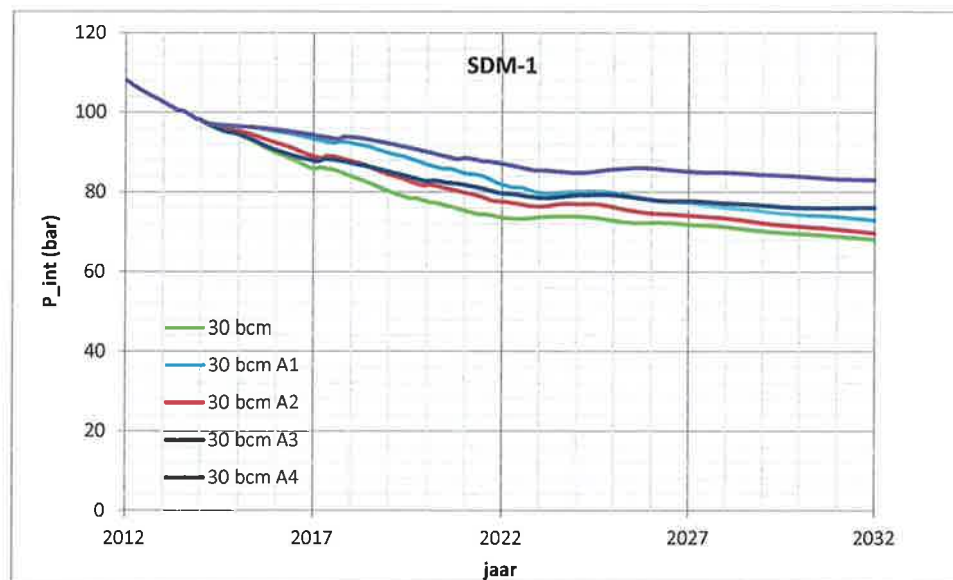


Figuur 3.12 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZND-10 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.

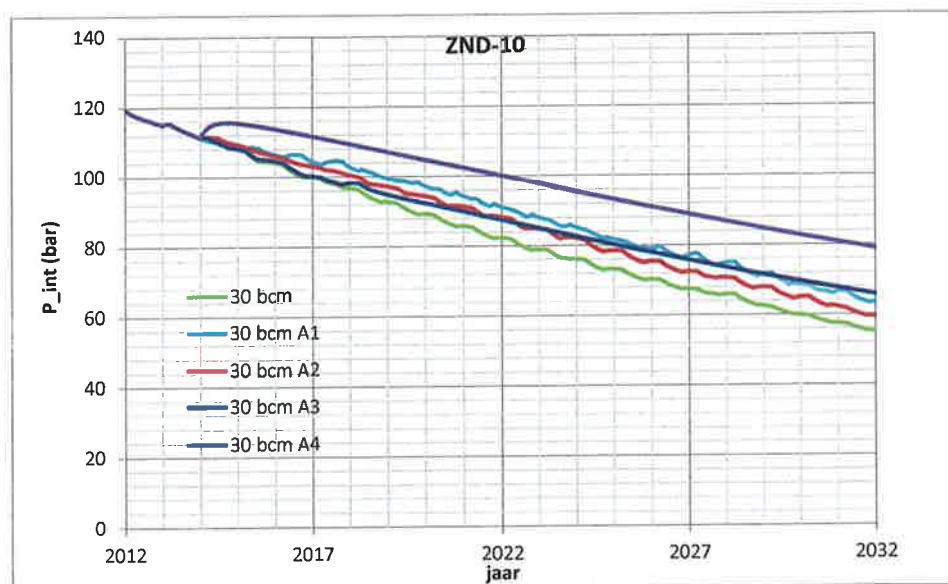


Figuur 3.13 Druk in het grid blok van het eerste interval van put ZVN-10 voor 6 scenario's met afnemende maximum jaarlijkse productie.

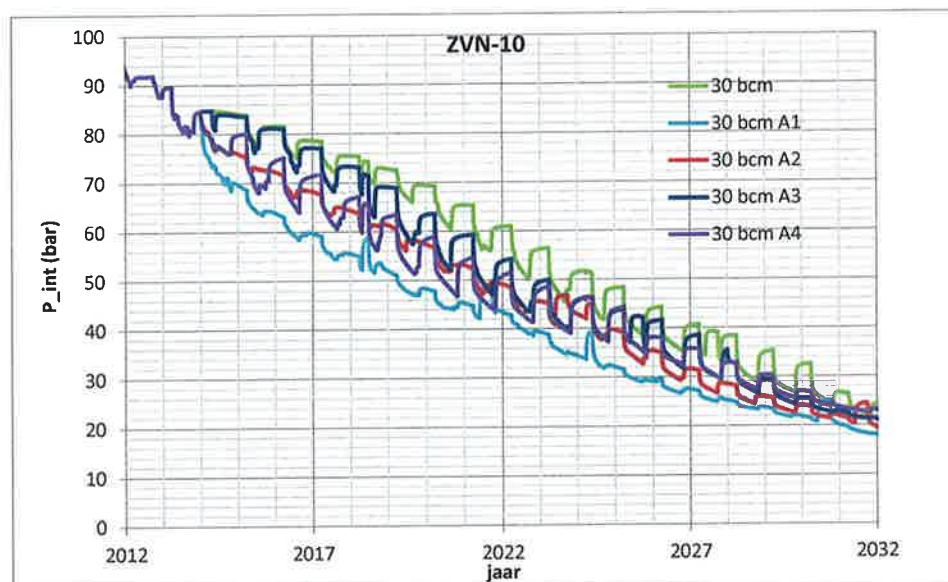
De Figuren 3.14 t/m 3.16 laten het drukverloop zien voor de productie scenario's met een verschillende filosofie over de verdeling van de productie over de verschillende clusters. De scenario's A1 (vertraag productie rond Loppersum zoveel mogelijk) en A4 (geen productie in de clusters rond Loppersum) 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 strategiën (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 strategiën (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 drukkaling 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 drukkaling 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 drukkaling 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 drukkaling over die periode al bijna 6 bar in SDM-1. Alleen voor het 20 bcm scenario blijft de drukkaling 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 drukkaling 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 drukkaling in SDM-1 van 14,1 naar 5,7 bar.

Tabel 3.4 Overzicht van de drukkaling 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	Verschil	Productie van 2014-2018
	bar	bar	bar	Mrd Nm ³
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.

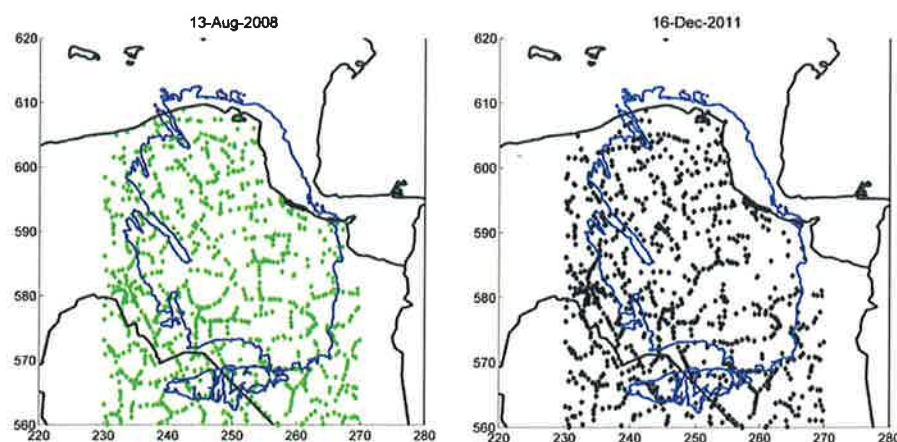
Uit de gerunde scenario's kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- 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 net niet leveren (2,2% minder).

4 Bodemdalingmetingen

4.1 Differentiestaat NAM

De bodemdalingmetingen bestaan uit peilmerkmetingen en PS-InSAR metingen in de vorm van een differentiestaat. Hierin zijn de hoogteverschillen opgenomen per peilmerk voor elke meetcampagne. Deze differentiestaat 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 differentiestaat 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 Bodemdalingmetingen beschikbaar in de differentiestaat. 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 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

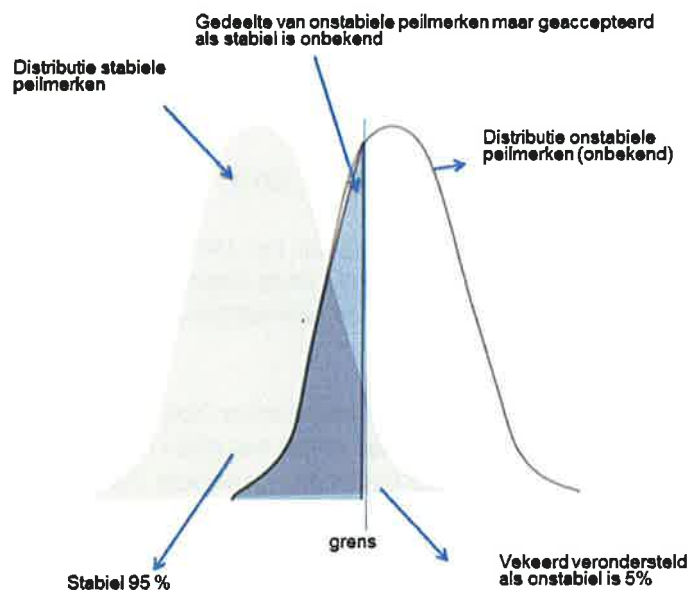
Het derde geval zou optreden als gaswinning in het midden van het bekeken interval zou liggen. Dit zou zorgen voor niet-lineaire effecten.

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}_{lev} 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 σ_{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 bodemdalingssnelheid 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^{ste} orde of 2^{de} 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 marktvaag 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 belasten 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).

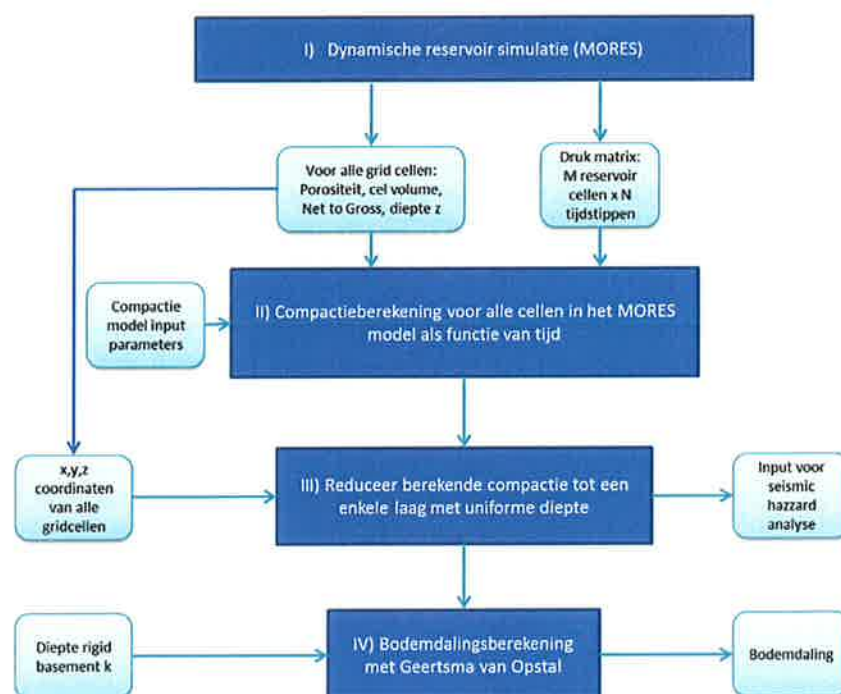
Het is niet *a priori* te stellen dat het op labschaal geijkte RTCM model ook zonder meer op veldschaal geldig is. Er kunnen opschaaleffecten zijn en daarnaast kunnen andere processen bijdragen aan het geobserveerde vertraagd op gang komen van de bodemdaling en doorgaande bodemdaling. De analyse in (Pruiksma 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 geëxtrapoleerd 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 rekestijd 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 Pruiksmas 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 ε_d (ook wel elastische rek genoemd) die een functie is van alleen de verticale effectieve spanning σ' :

$$\varepsilon_d = f(\sigma') \quad (1)$$

De tweede vergelijking is een uitdrukking voor de seculiere reksnelheid, $\dot{\varepsilon}_s$ (ook wel kruiprek genoemd) die een functie is van de effectieve spanning en de totale rek ε :

$$\dot{\varepsilon}_s = g(\sigma', \varepsilon) \quad (2)$$

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 ε_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 ε_s en de totale rek ε . 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 σ', ε bestaan waarvoor de seculiere reksnelheid constant is. Deze combinaties zijn voor de beschouwde modellen rechte lijnen in het σ', ε diagram. Deze lijnen worden isotachen genoemd. Hieronder worden de modellen kort beschreven. Voor meer details wordt verwezen naar Pruiksmas 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 ε de rek, c_m de compactiecoëfficiënt, $\Delta P(t)$ de drukdepletie als functie van tijd en τ een tijdsconstante. In het model zijn c_m en $\Delta P(t)$ en daarmee $\varepsilon(t)$ per reservoir gridcel verschillend. De tijdsconstante τ 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 σ' en ε . 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 σ'_{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 σ', ε 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 σ'_{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 σ', ε 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	σ'_{ref}	-
Rate Type Compactie Model	$\dot{\sigma}'_{ref}, \sigma'_{ref}$	$\dot{\sigma}'_{ref}$

Ieder model heeft een referentiespanning σ'_{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 ΔP de gasdrukdepletie, hoeft σ'_{ref} niet als invoerparameter meegenomen te worden.

Voor het RTCM model moet de referentiespanning σ'_{ref} expliciet gegeven worden omdat de afstand tussen de isotachen afhangt van de absolute waarde van de effectieve spanning. De referentiespanning σ'_{ref} is hier de in situ verticale effectieve spanning voorafgaand aan de gasproductie. Voor het RTCM model is de totale verticale spanning σ 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 σ'_{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, τ
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 Pruijsma 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 α_{cm} die vrij gevarieerd wordt in Red Flag.

Voor het Time-Decay model worden in Red Flag twee parameters gevarieerd: de tijdsconstante τ en de vermenigvuldigingsfactor α_{cm} op de compactiecoëfficiënt-porositeit functie.

Voor het RTCM model worden in totaal drie parameters gevarieerd: de toestandsparameter σ'_{ref} , de vermenigvuldigingsfactor α_{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 instantane 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.

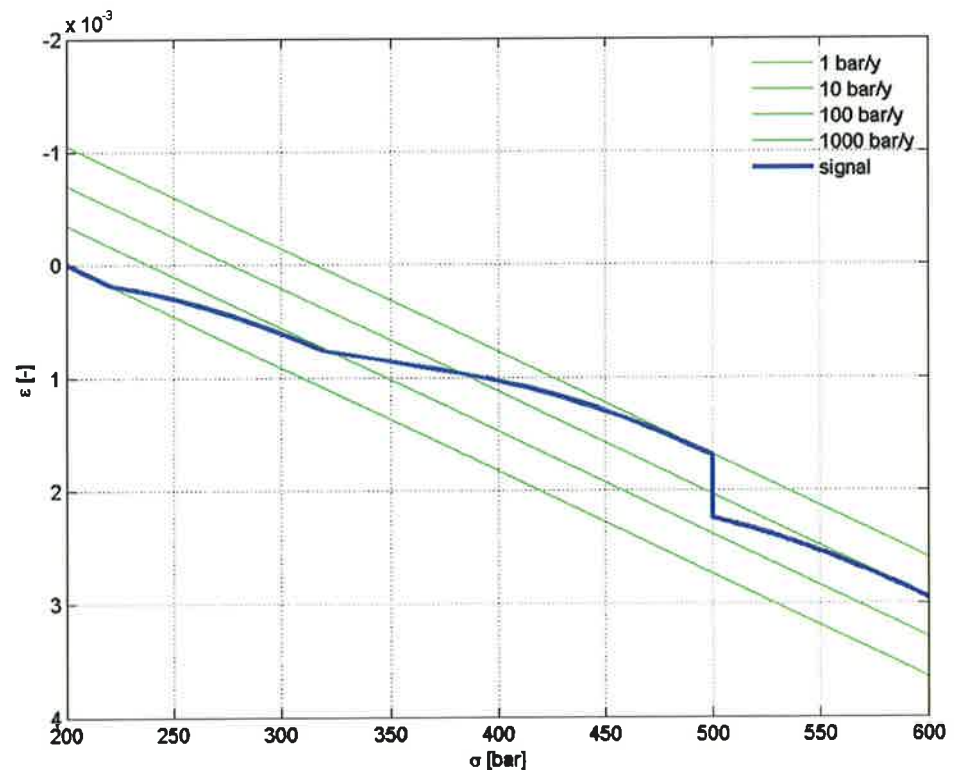
Voor het gelineariseerde isotachenmodel is geen Red Flag analyse uitgevoerd. In Pruikma et al. (2013) is een omrekenformule voor materiaalparameters van het RTCM naar het lineair isotachenmodel gegeven. Deze formule wordt gebruikt om de beste set parameters volgand uit Red Flag voor het RTCM om te rekenen 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

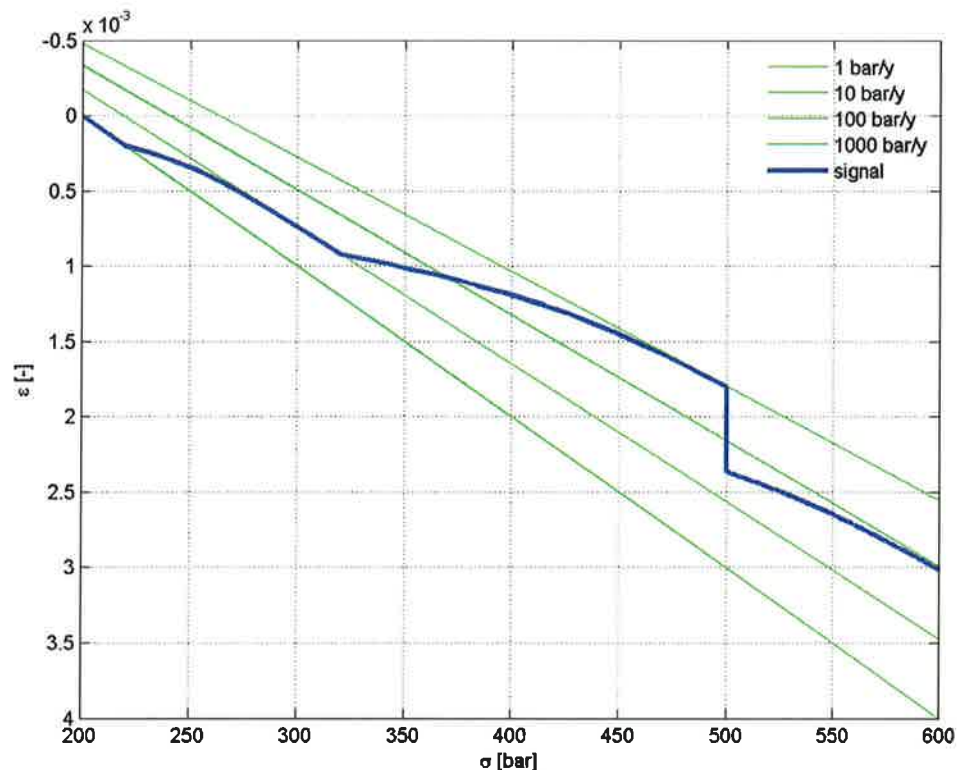
Het gedrag van de compactiemodellen is weergegeven in spanning-rek diagrammen (Figuur 5.2 t/m Figuur 5.4). Figuur 5.2 geeft een voorbeeld van een berekening met het gelineariseerde isotachenmodel. De belasting is tussen 200 en



Figuur 5.2 Voorbeeld van een berekening met het gelineariseerde isotachenmodel. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingssnelheid 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.

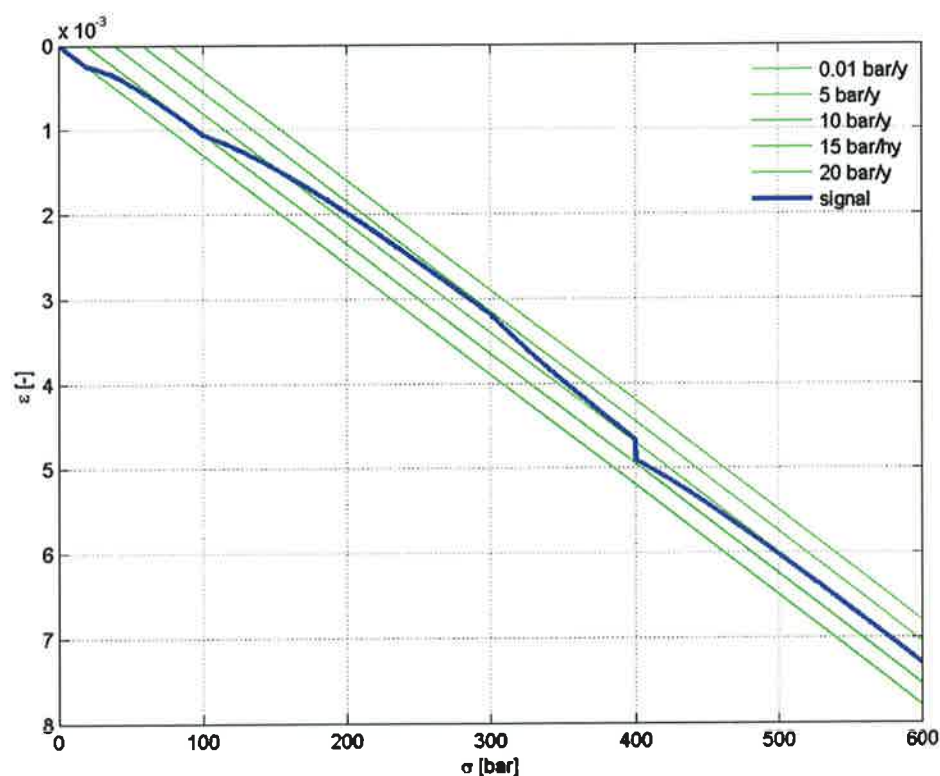


Figuur 5.3 Voorbeeld van een berekening met het RTCM model. In groen weergegeven zijn de isotachen, de bovenste groene lijn heeft belastingsnelheid 1000 bar/jaar en de onderste lijn 1 bar/jaar. De blauwe lijn geeft het resultaat van het model weer voor de opgelegde belasting. Deze belasting is tussen 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 ε_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 Pruikma 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 τ 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:

$$\varepsilon_s - \varepsilon_{s,0} = c_1 \ln(1 + c_2 t) ,$$

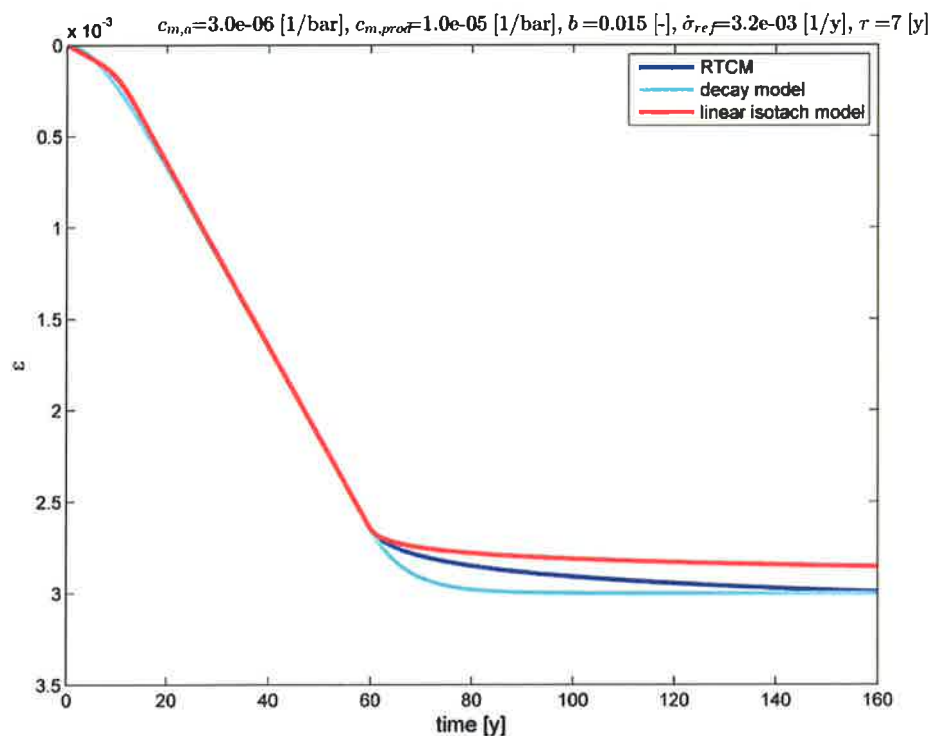
identiek aan die van het lineaire isotachenmodel en de experimenten van Dewers et al. (1995). De constanten zijn $c_1 = b c_m \sigma'_{0}$ en $c_2 = \frac{\dot{\varepsilon}_{s,0}}{b c_m \sigma'_{0}}$ waarbij σ'_{0} de effectieve spanning is tijdens kruip en $\dot{\varepsilon}_{s,0}$ de seculiere reksnelheid 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 Pruikma 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 (σ_{ref}), een aanname voor de meeton nauwkeurigheid van de aangemeten peilmerken (σ_{peil}) en een tijdsafhankelijke term voor de historische instabiliteit van het referentiepeilmerk. Dit resulteert in de volgende formule voor de standaardafwijking van de bodemdalingsmetingen

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{ref}^2 + \sigma_{peil}^2 + ((t - t_0)\Delta_{ref})^2}.$$

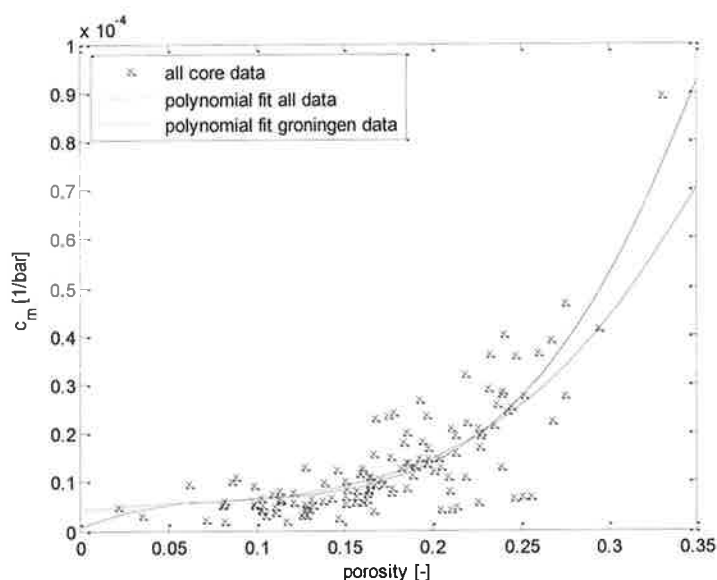
Voor de Ameland studie zijn $\sigma_{ref} = 3 \text{ mm}$, $\sigma_{peil} = 3 \text{ mm}$ en $\Delta_{ref} = 0,25 \text{ mm/jaar}$ gehanteerd. Voor Groningen zijn dezelfde getallen gebruikt. Dit resulteert in een standaardafwijking van de bodemdalingsmetingen aan het begin van de productie $t = t_0 = 1964$ 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 α_{cm} op de compactiecoëfficiënt-porositeit functie $c_m(\varphi)$ gebruikt. Deze $c_m(\varphi)$ functie is bepaald uit compactie-experimenten op Rotliggend 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



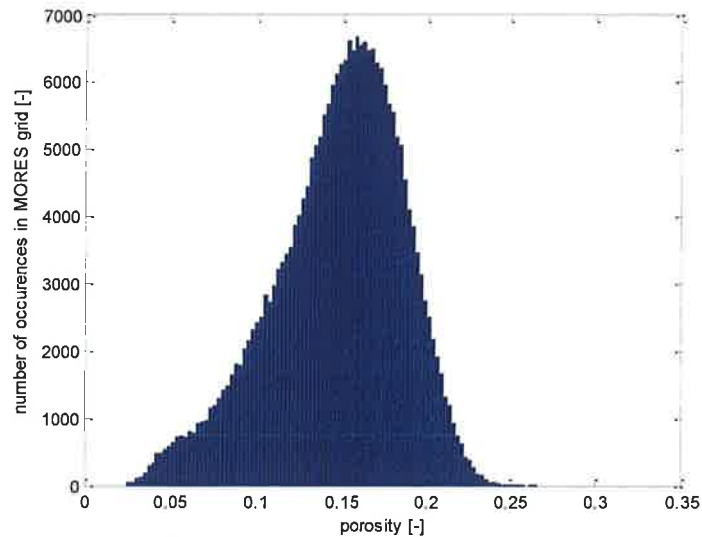
Figuur 5.6 Porositeits afhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt. De blauwe markers zijn alle beschikbare kernmetingen. De groene lijn is de derdegraads polynoom trendlijn door alle kernmetingen (vergelijking 4), en de rode lijn is de beste fit door de kernmetingen in het Groninger Rotliggend (vergelijking 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

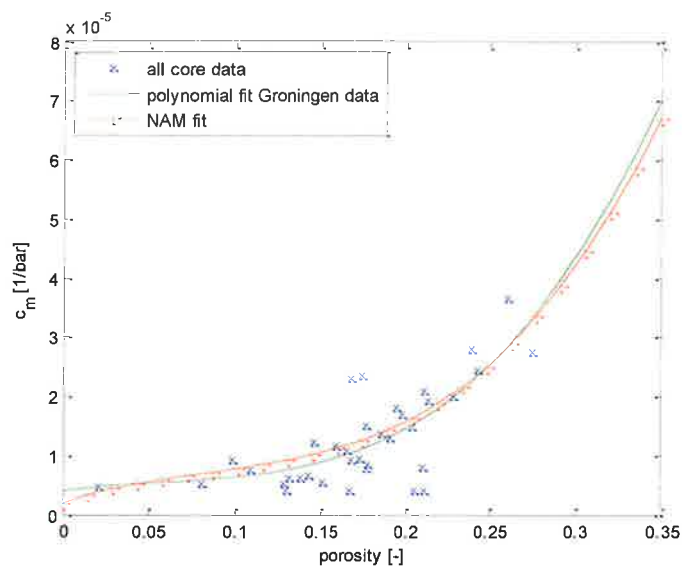
$$c_m(\varphi) = 4,943 \cdot 10^{-3} \varphi^3 - 1,419 \cdot 10^{-3} \varphi^2 + 1,52 \cdot 10^{-4} \varphi + 6,198 \cdot 10^{-7} \text{ bar}^{-1}$$

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 α_{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 χ^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 χ^2 in andere statistische methoden is deze grootte hier dimensieloos door normalisatie op het kwadraat van de standaardafwijking. De χ^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 [%]	χ^2 [-]	$\frac{c_{m,a}}{c_{m,ref}}$ [-]	σ'_{ref} [bar/jaar]	α_{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 [%]	χ^2 [-]	τ [jaar]	α_{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 χ^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 χ^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 Pruiksmá 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.

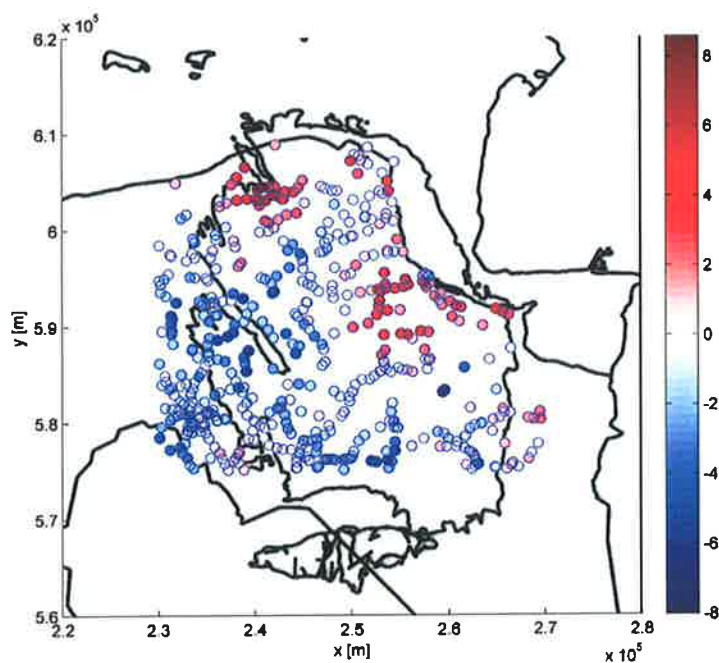
Tabel 5.5 Input parameters voor het gelineariseerde isotachenmodel berekend uit de beste set parameters voor het RTCM model in Tabel 5.3.

Parameter	Waarde
$\frac{c_{m,a}}{c_{m,a} + c_{m,b}}$	0,44 [-]
α_{cm}	0,67 [-]
c	$3,74 \cdot 10^{-5}$ [-]
$\dot{\epsilon}_{s,ref}$	$1,09 \cdot 10^{-9}$ 1/jaar

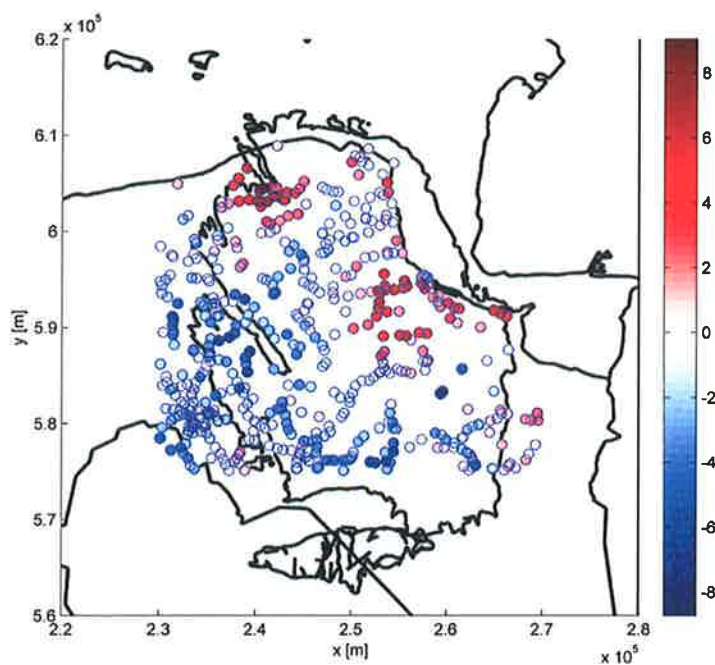
5.4.4 Vergelijking gemeten bodemdaling met de berekende bodemdaling

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

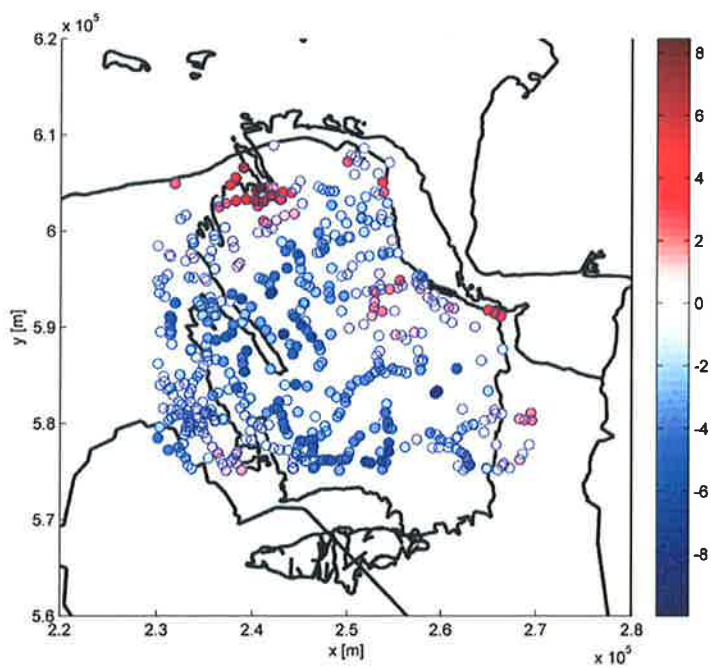
tussen gemeten en berekende daling in het RTCM model terwijl het Time-Decay model daar de daling 3 cm onderschat. In het centrum van de kom wordt de daling met het Time-Decay model ongeveer 5 à 6 cm onderschat en met het RTCM ongeveer 2 à 3 cm. Appendix D.1 toont scatterplots van berekende versus gemeten 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.



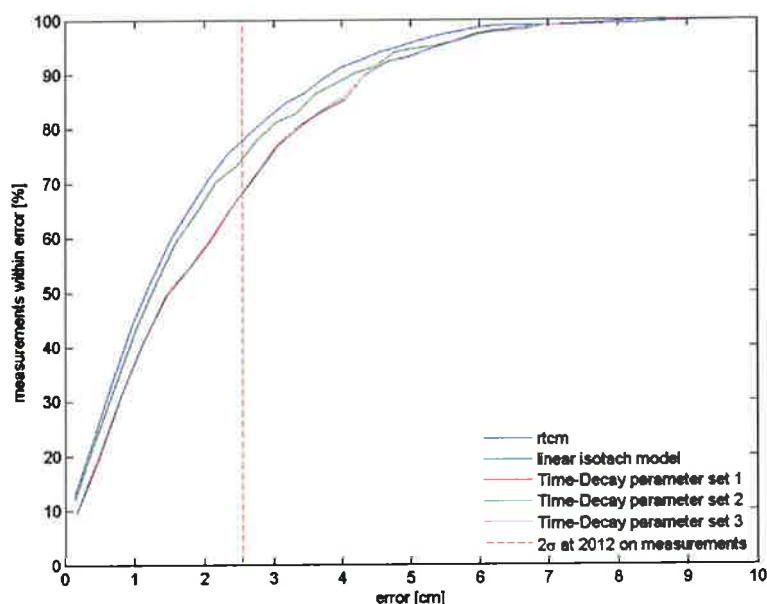
Figuur 5.9 Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011. Rood betekent meer daling berekend dan gemeten, blauw betekent een onderschatting van de bodemdaling door de berekeningen.



Figuur 5.10 Verskil 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 Verskil 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.

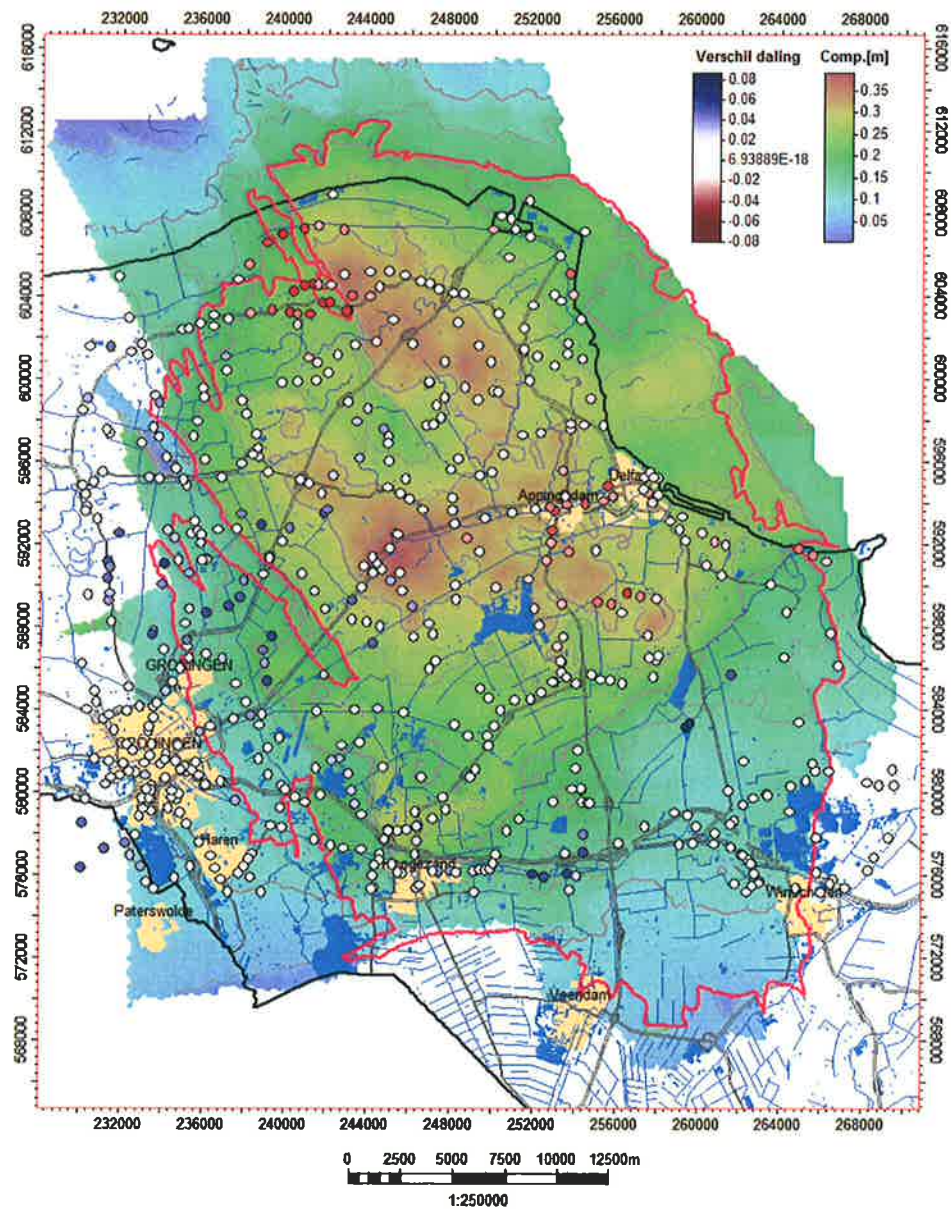


Figuur 5.12 Verdeling van de fout in de bodemdaling voor de drie compactiemodellen.

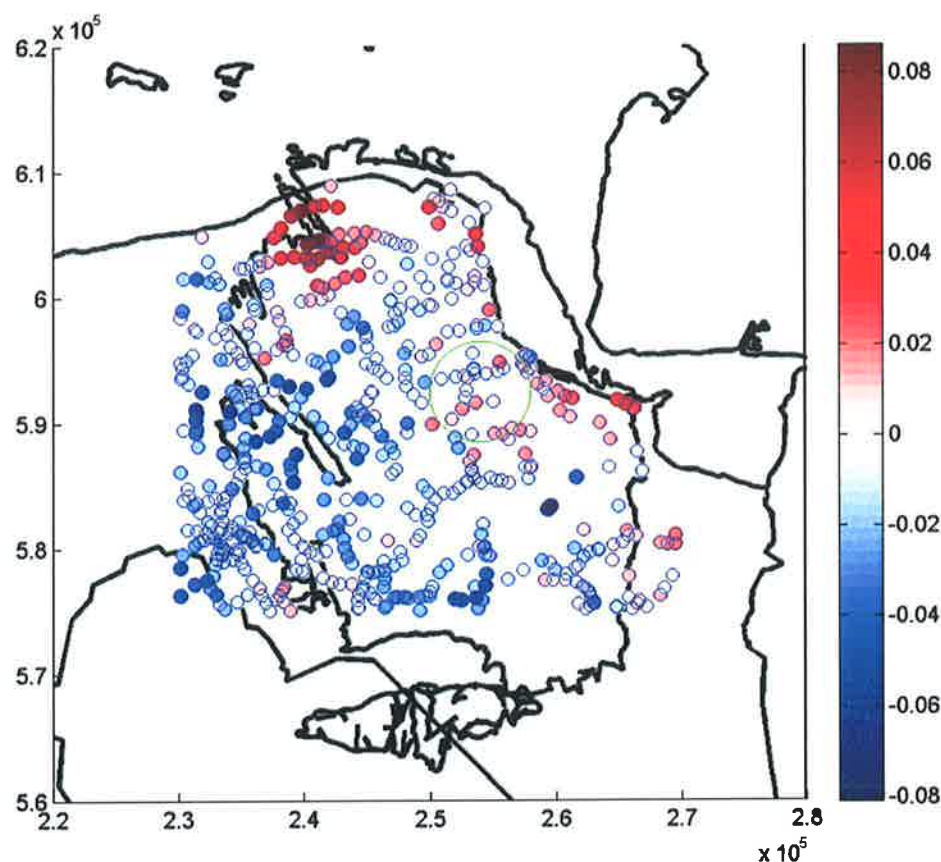
5.4.5 *Verschillen tussen gemeten en berekende bodemdaling nabij Delfzijl en in het noordwesten van het veld*

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.

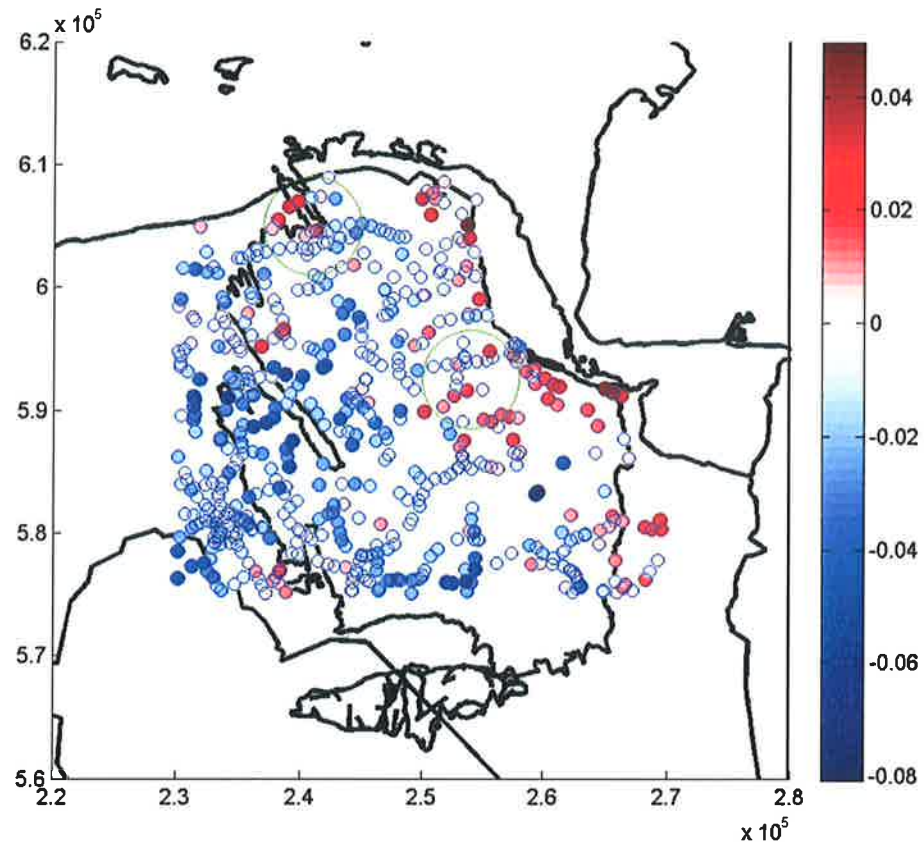


Figuur 5.13 Gemodelleerde compactie voor de Groningen eind 2011 voor het RTCM model. Het verschil tussen berekende en geobserveerde bodemdaling is weergegeven op de peilmerklocaties. Een rode kleur geeft de gebieden aan waarbij de berekende bodemdaling groter is dan de geobserveerde bodemdaling.



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.



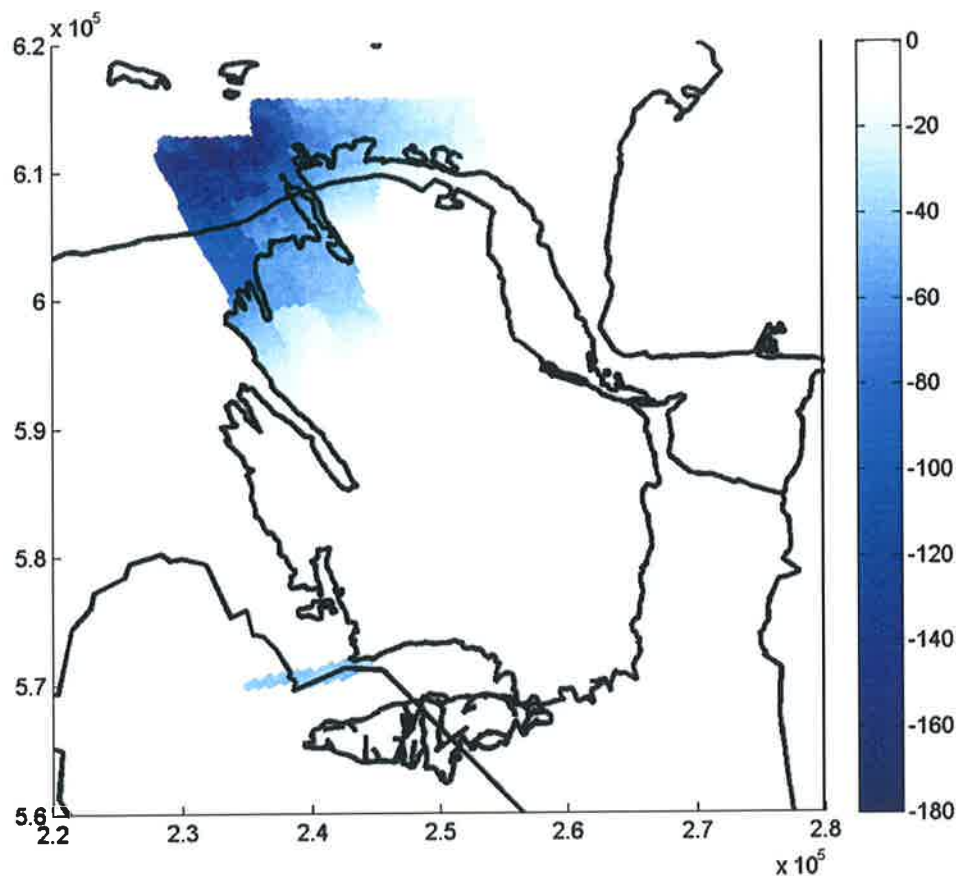
Figuur 5.15 Verschil tussen gemeten en berekende bodemdaling in cm voor het RTCM model eind 2011 na toepassing van een porositeitsreductie met een factor 0,50 in het noordwesten van het veld (groene cirkel) en een reductie met een factor 0,85 in een gebied met straal 4 km nabij Delfzijl (groene cirkel). 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

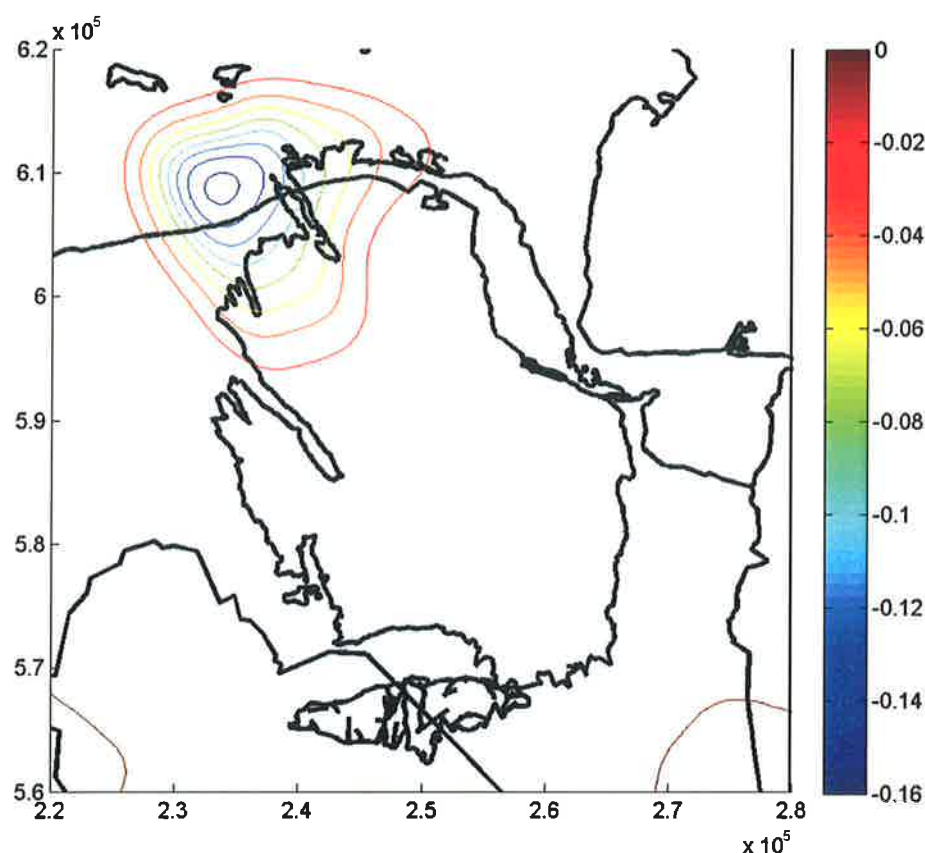
De berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd voor het sterke aquifer scenario (zie Hoofdstuk 3). Voor dit scenario is de drukgeschiedenis in de reservoir cellen beschikbaar gesteld door NAM. Er is een tweede realisatie van het dynamische MORES model gemaakt met een zwak aquifer scenario, waarvoor geen 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 Verschil druk (in bar) tussen het sterke en zwakke aquifer scenario in 2013. De druk in het zwakke aquifer scenario is lager.

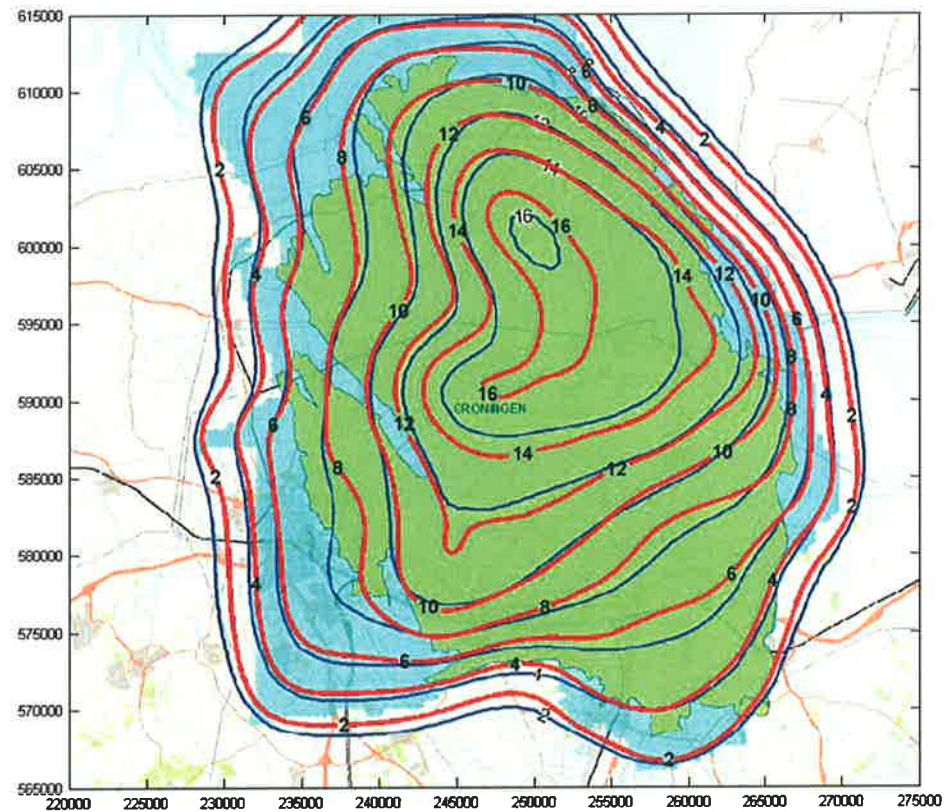


Figuur 5.17 Verschil in berekende bodemdaling (in m) eind 2012 tussen het sterke aquifer scenario en het zwakke aquifer scenario in meters. Er is ongeveer 16 cm meer daling in het noordwesten in het zwakke aquifer scenario.

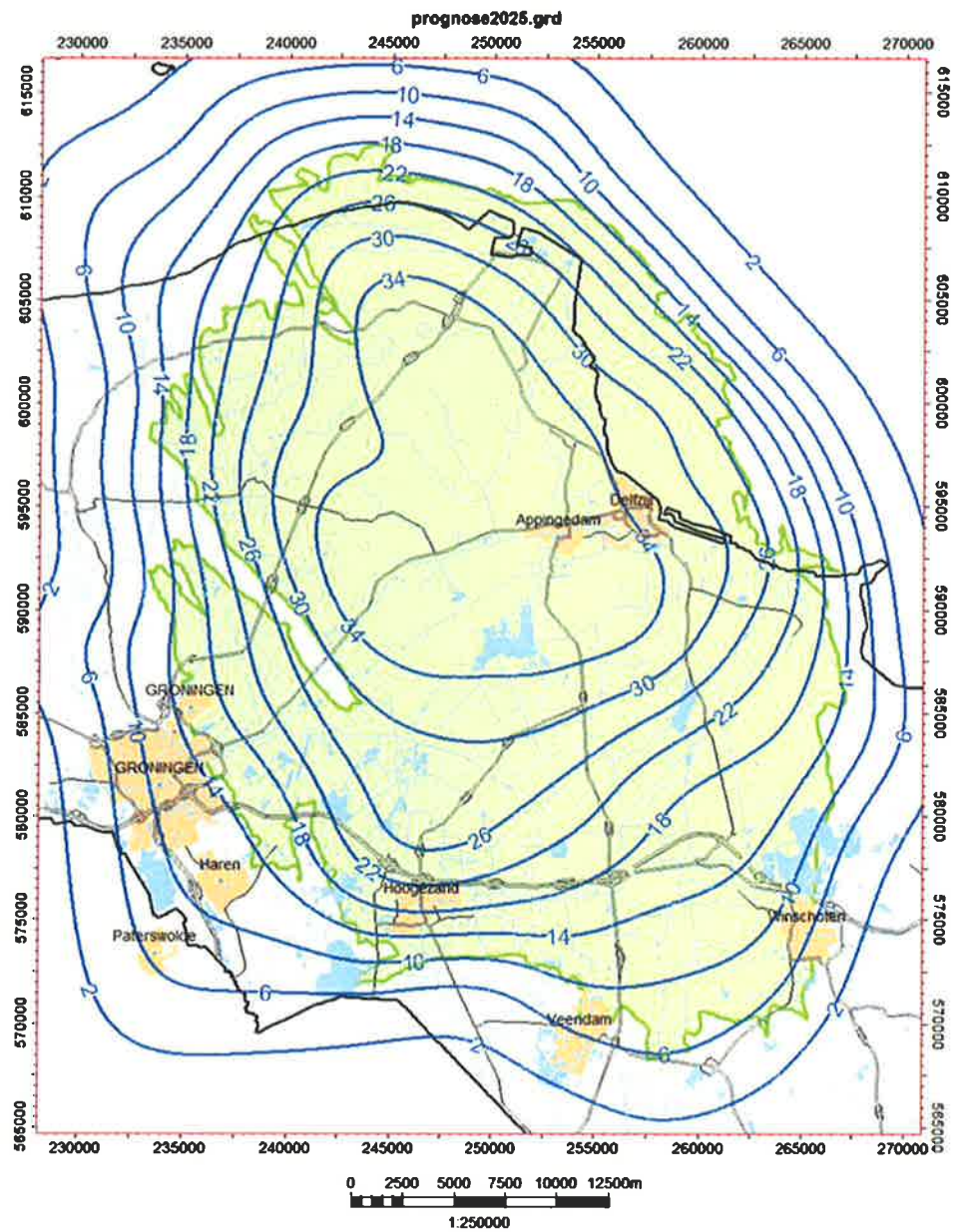
5.5 Bodemdalingsprognoses voor 2025, 2050 en 2080

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

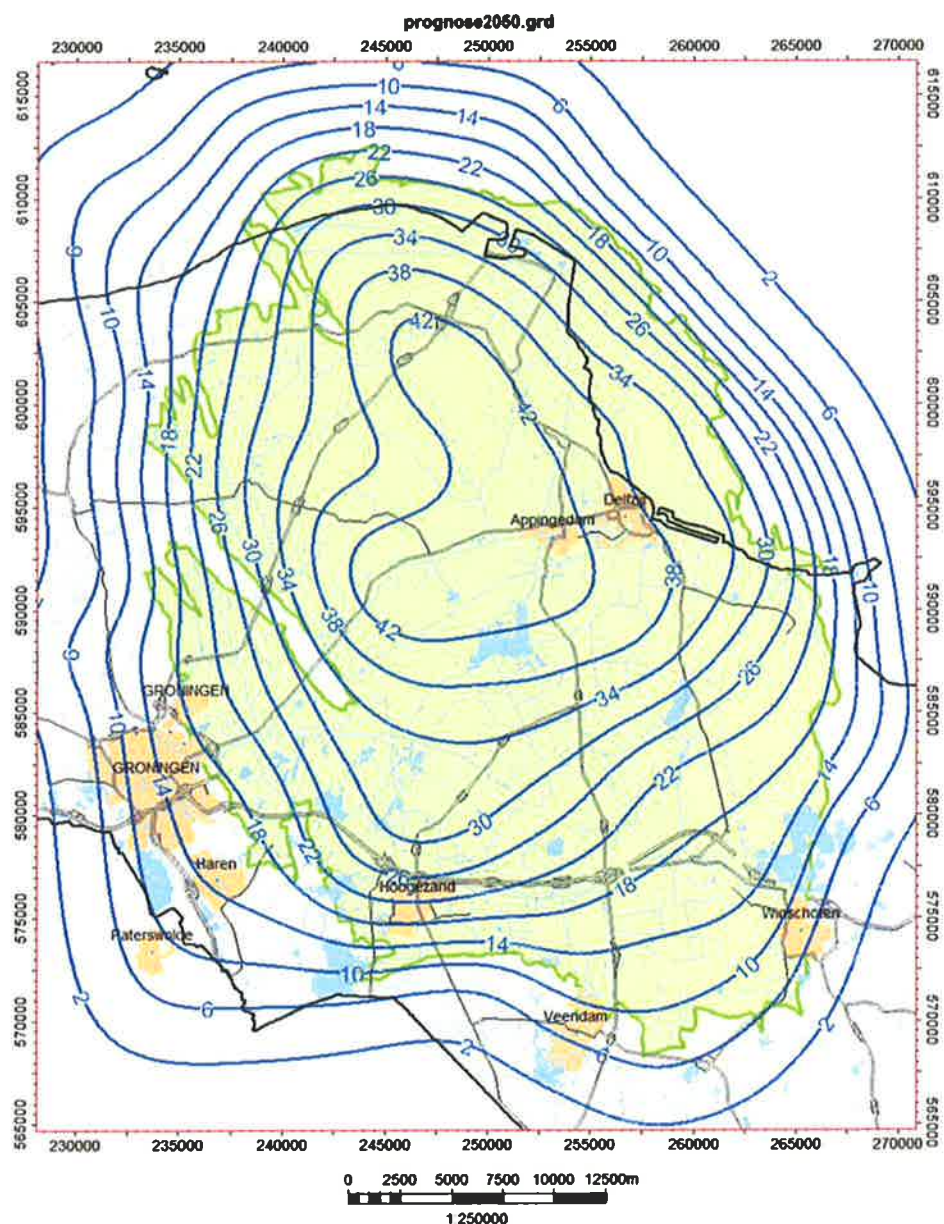
NAM berekende contour is daar bijna 34 cm. Dit verschil wordt verklaard door de verschillen tussen het Time-Decay model en het RTCM model. De maximum bodemdaling voor de beste fit in de Red Flag procedure met het Time-Decay model werd onderschat (Figuur D.2.2. in Appendix D.2) In de fit-procedure van 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.



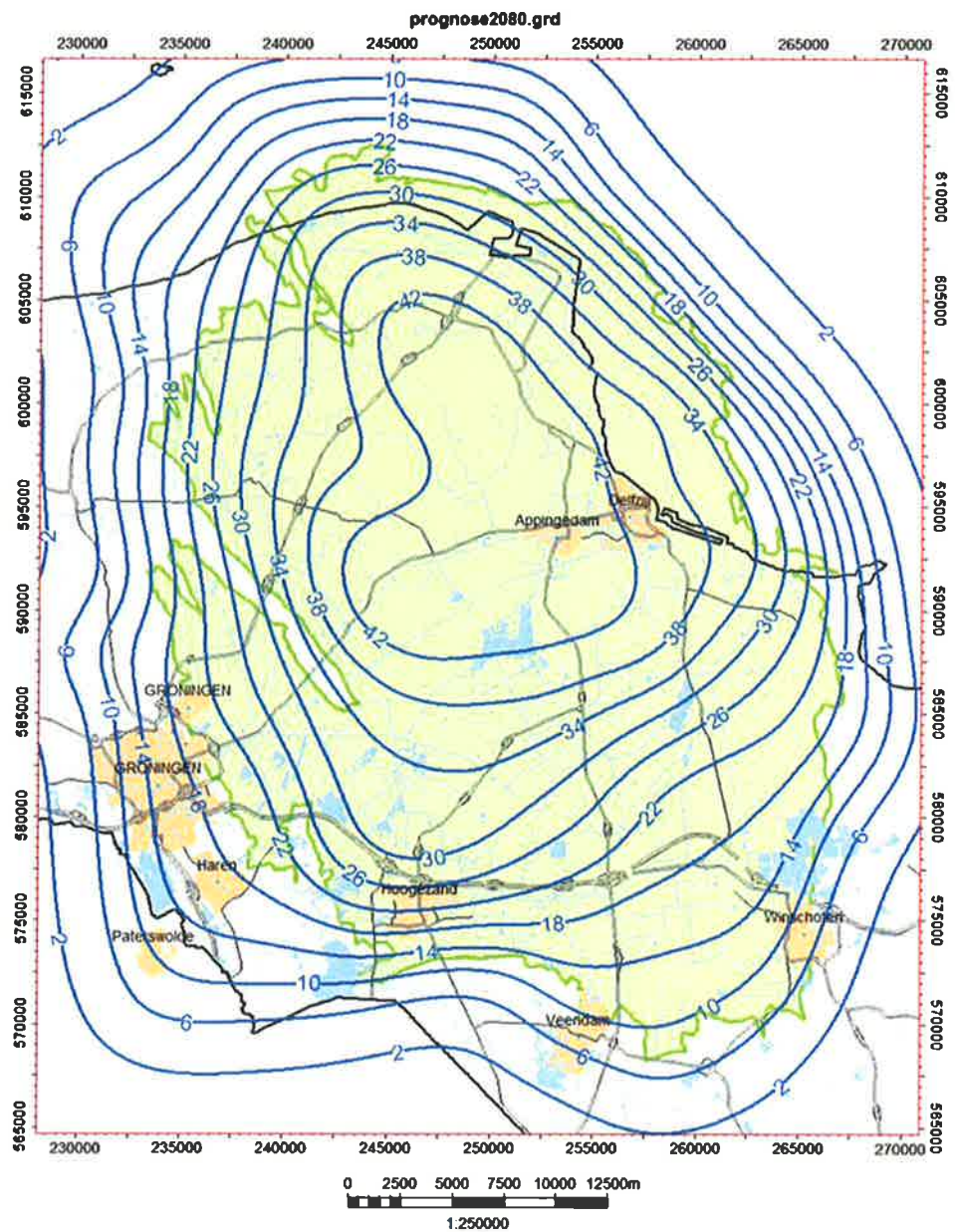
Figuur 5.18 Nog te verwachten bodemdaling vanaf 2013 tot en met 2080. In rood de contouren in centimeters bodemdaling berekend met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. In blauw de contouren uit het Winningsplan van NAM (2013d).



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 countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.



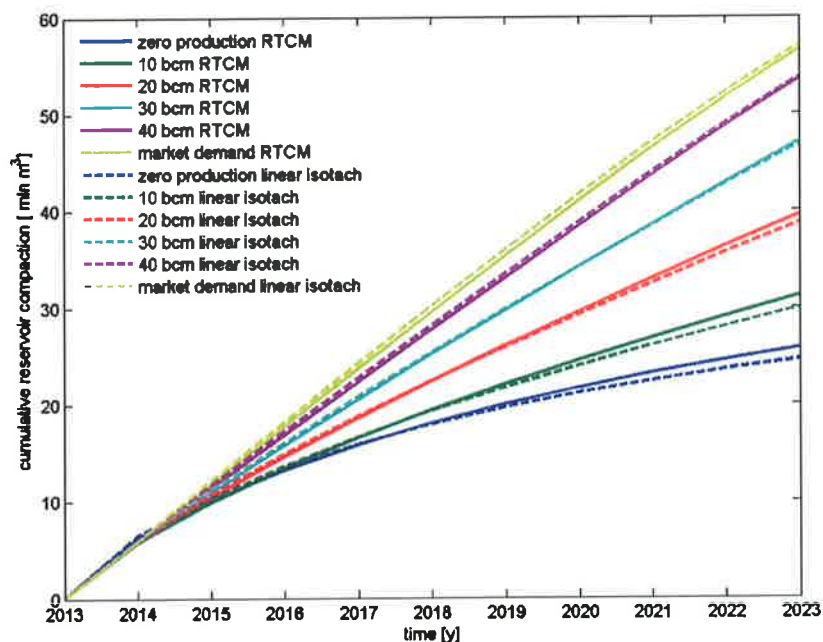
Figuur 5.21 Bodemdalingsprognose voor 2080 (totale bodemdaling vanaf 1964) met het RTCM model en de beste set invoerparameters volgens Red Flag. De countourlijnen van de bodemdaling zijn in centimeters.

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.

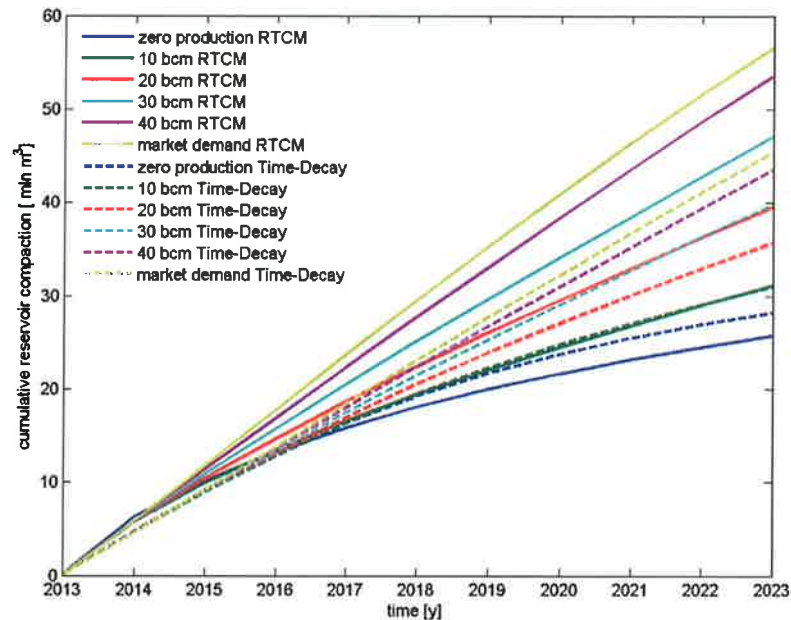
In deze paragraaf wordt de compactie tussen 2013 en 2023 besproken. Appendix D.3 t/m D.5 geeft de compactie resultaten over de gehele periode vanaf 1964 tot en met 2080. Appendix D.3 geeft het totale compactievolume in het reservoir als functie van de tijd voor het RTCM model en de verschillende productiescenario's. 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^3 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.

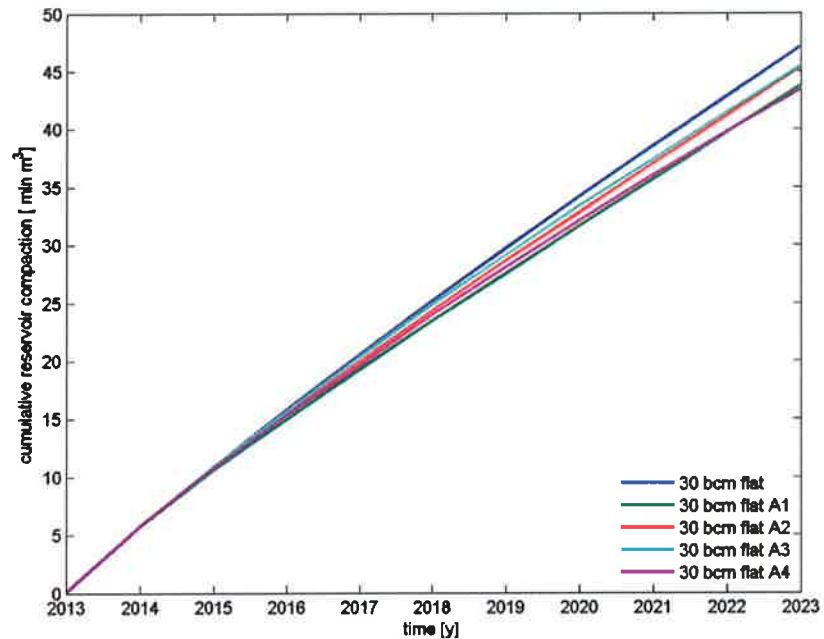


Figuur 5.23 Cumulatieve compactie in miljoen m³ voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het Time-Decay model.

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 m³. Voor het RTCM model en het lineaire isotachenmodel is de spreiding tussen marktvaag en nul productie scenario ongeveer 30 miljoen m³. 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

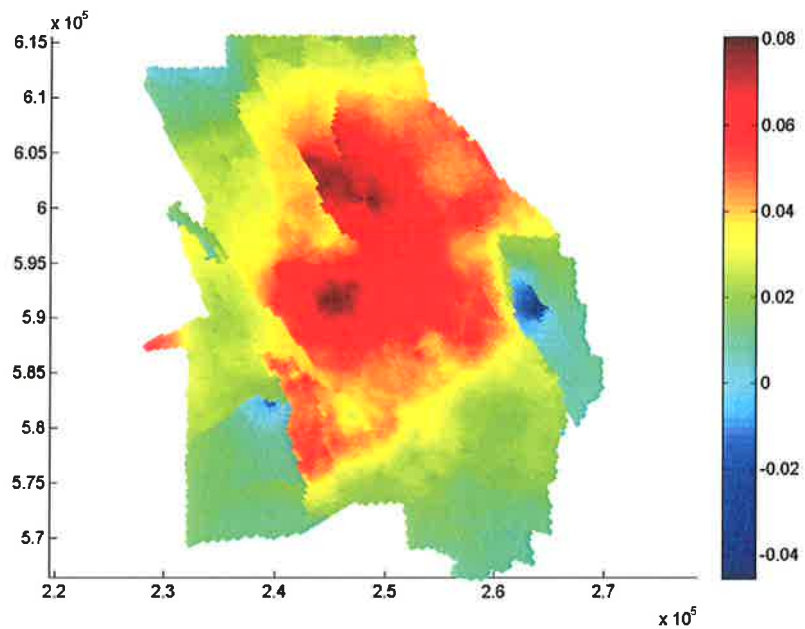
RTCM model. Dit is ook gerelateerd aan de waarschijnlijke keuze van NAM om het Time-Decay model vooral aan de bodemdaling in het diepste punt te kalibreren.

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.

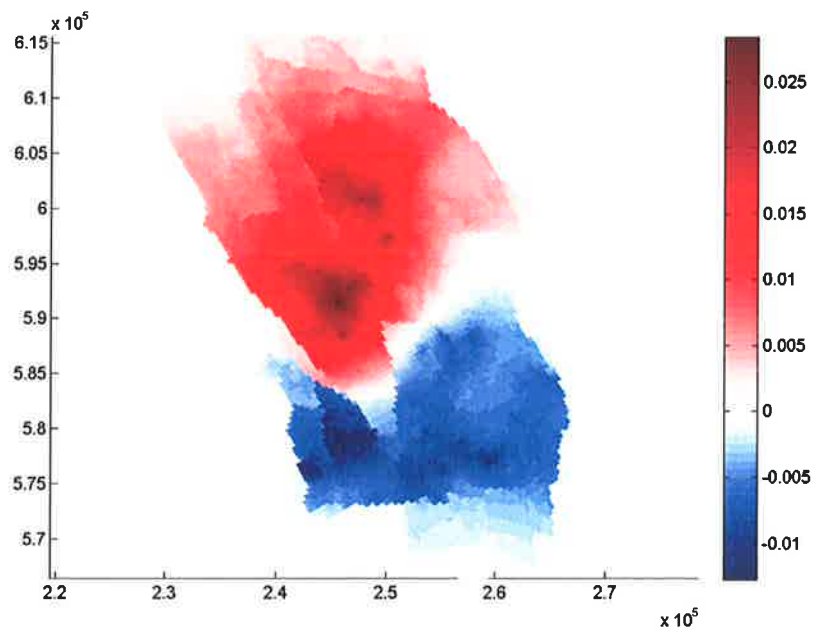


Figuur 5.24 Cumulatieve compactie in miljoen m^3 voor de periode vanaf 2013 tot 2023 berekend met het RTCM model voor de alternatieve 30 bcm scenario's uit Paragraaf 3.3.

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 ± 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):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.07$$

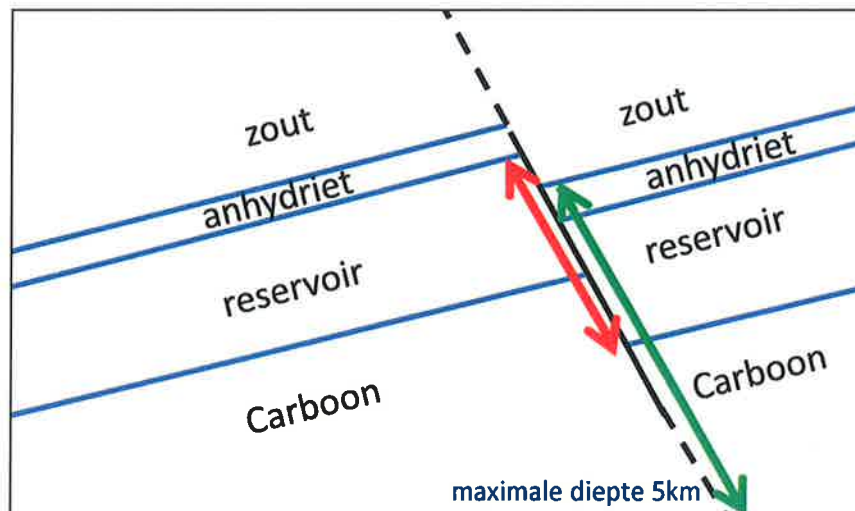
Uit het 3D Petrel model zijn, met behulp van een geautomatiseerde workflow, de breukoppervlaktes van de verschillende breuken op twee manieren berekend (zie Figuur 6.1 voor de 2 manieren van berekening van breuk-parameter w):

- 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.

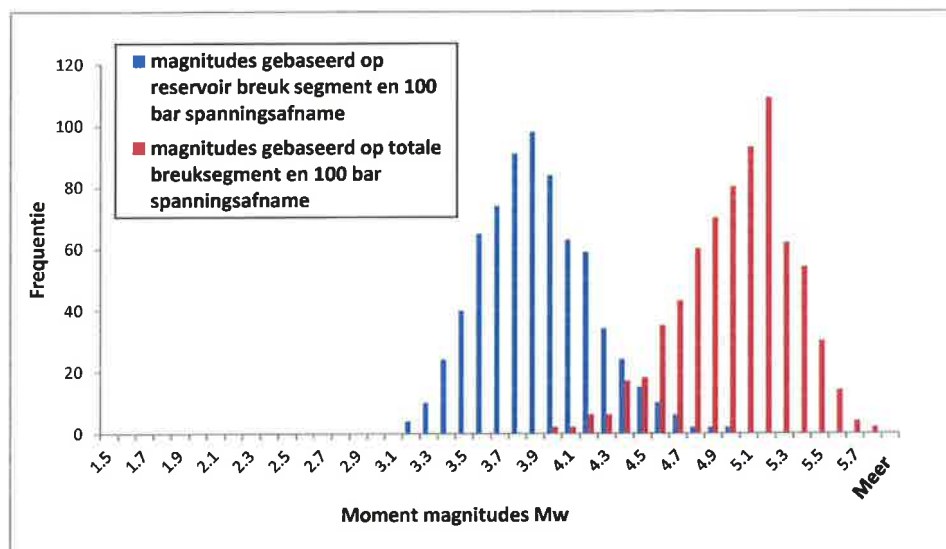
Boven het Rotliegend reservoir en de Zechstein basale anhydriet ligt een dik pakket Zechstein steenzout. Het steenzout wordt gekenmerkt door hoge horizontale spanningen (isotrope spanningscondities ten gevolge van kruip). Het is niet waarschijnlijk dat er in het steenzout grootschalige breukstructuren 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 seismiciteit 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*

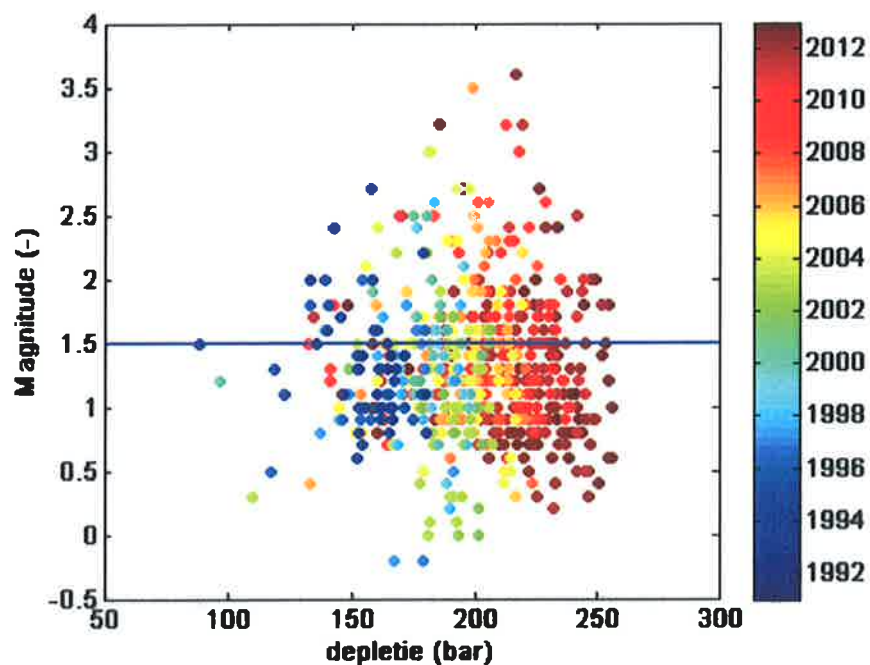
In Figuur E.2.1 in Appendix E.2 worden de depletiedrukken (verticaal over het reservoir gemiddelde waarden van drukverlaging ten opzichte van de initiële druk) voor eind 2012 en de belangrijkste breuken in het Groningen veld weergegeven. Uit Figuur E.2.1 kan worden afgeleid dat de depletie van het reservoir 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 $M_L=1,5$.

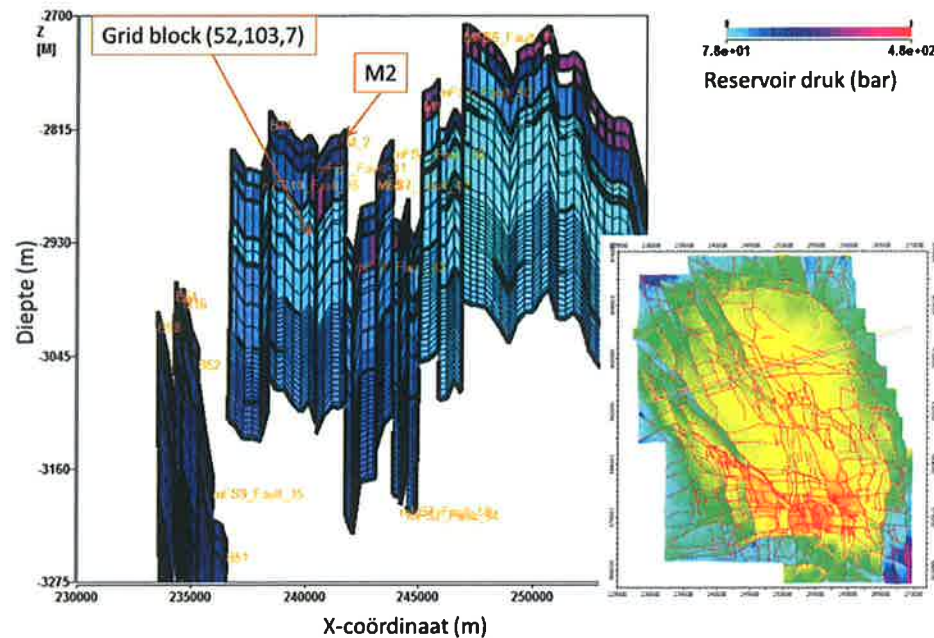
Figuur 6.3 geeft de relatie weer tussen de verticaal gemiddelde drukdepletie in de loop van de tijd versus de magnitude van de bevingen. De depletiedruk is

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.

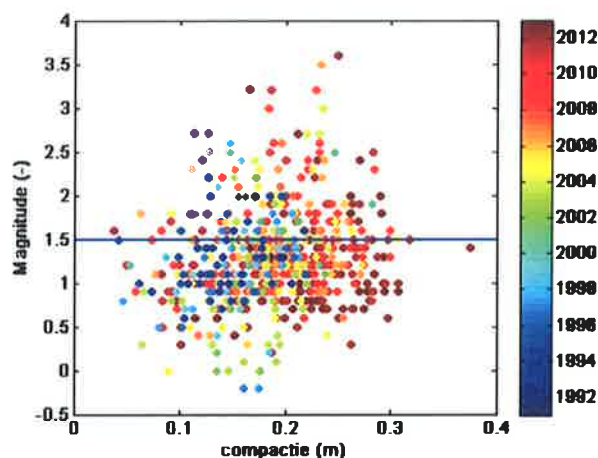
6.3.2 Seismiciteit versus compactie van het reservoirgesteente

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.

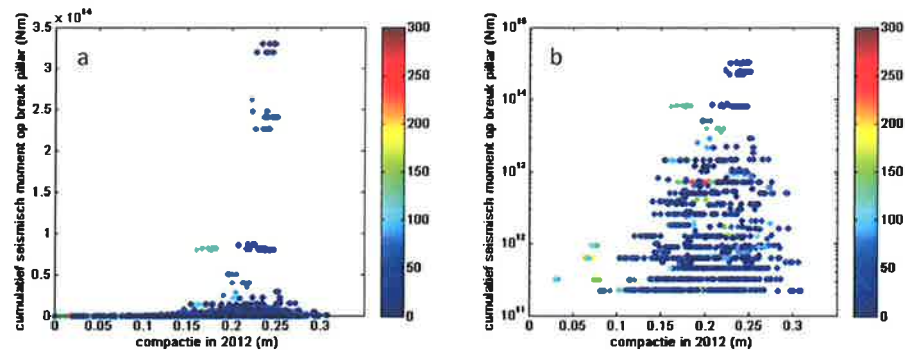
6.3.3 Relatie breuken en seismiciteit

6.3.3.1 Verzet langs de breuken

In eerdere 2D- en 3D modelstudies (Roest en Kuilman, 1994; Mulders, 2003; Orlie 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 ophijning 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 spanningcondities 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 σ_n de effectieve normaalspanning op de breuk is en τ de schuifspanning op de breuk.

De sterkte van een breuk kan worden beschreven door het 'Mohr Coulomb sterkte' criterium:

$$\tau_{max} = C + \sigma_n \tan \varphi$$

waarbij C de cohesie (Pa), φ de frictiehoek ($^{\circ}$) en τ_{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.

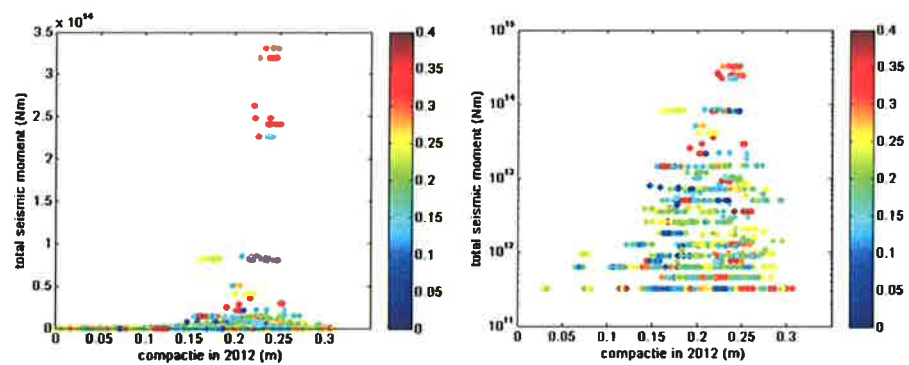
Tabel 6.1 Gradiënten van horizontale en verticale spanning, gebaseerd op NAM (2013b).

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 α Biot's coëfficiënt (-), $\Delta\sigma'_v$ (MPa) de verandering in verticale effectieve spanning, $\Delta\sigma'_h$ (MPa) de verandering in horizontale effectieve spanning, Δp de drukverandering (MPa) en γ_h de depletieconstante van het reservoir. De depletieconstante wordt gegeven door:

$$\gamma_h = \alpha \frac{(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

met ν (-) 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 (km/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 m/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 (km/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.

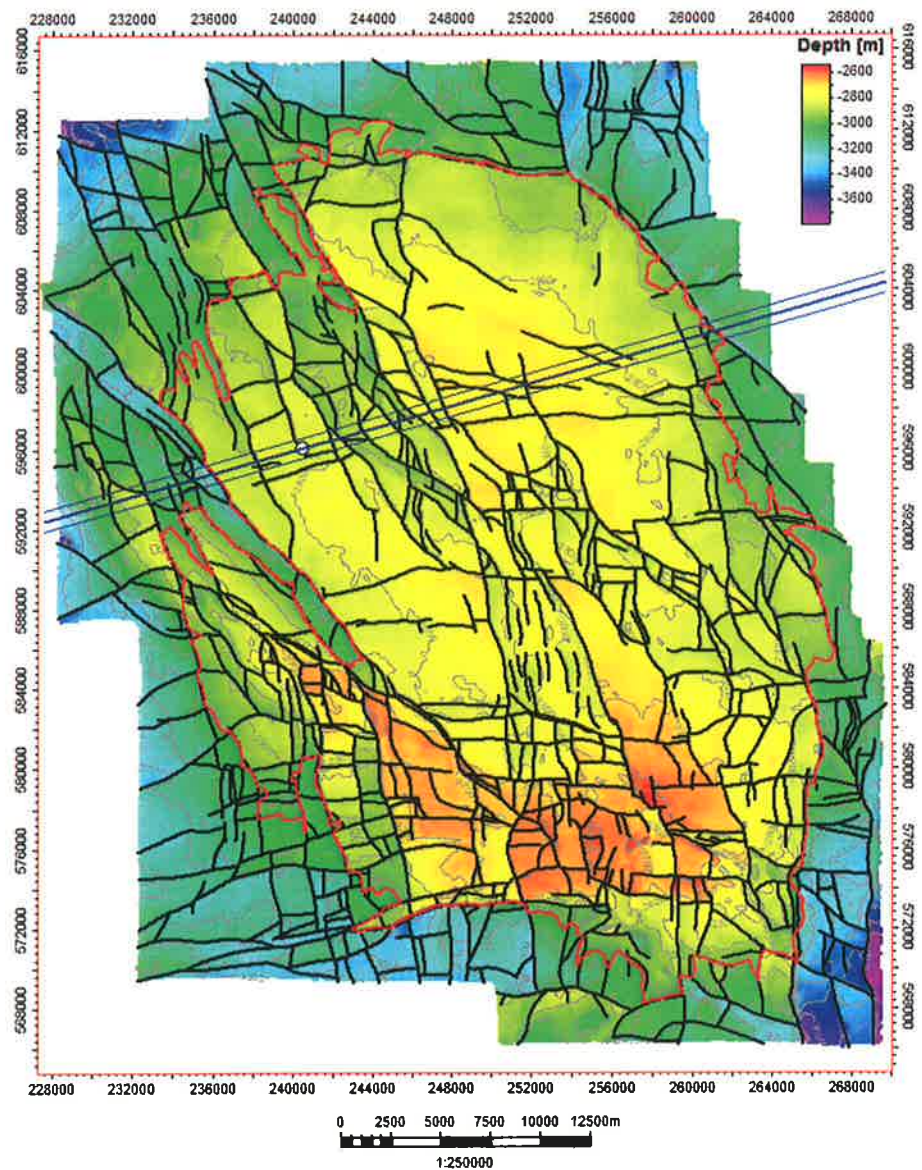
In de seismische hazard analyse wordt het compactie volume in het reservoir (ΔV_{res} in m^3) omgerekend naar een reservoir moment (RM in Nm), via Kostrov's vergelijking (Kostrov, 1974):

$$RM = 2G\Delta V_{res}$$

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.



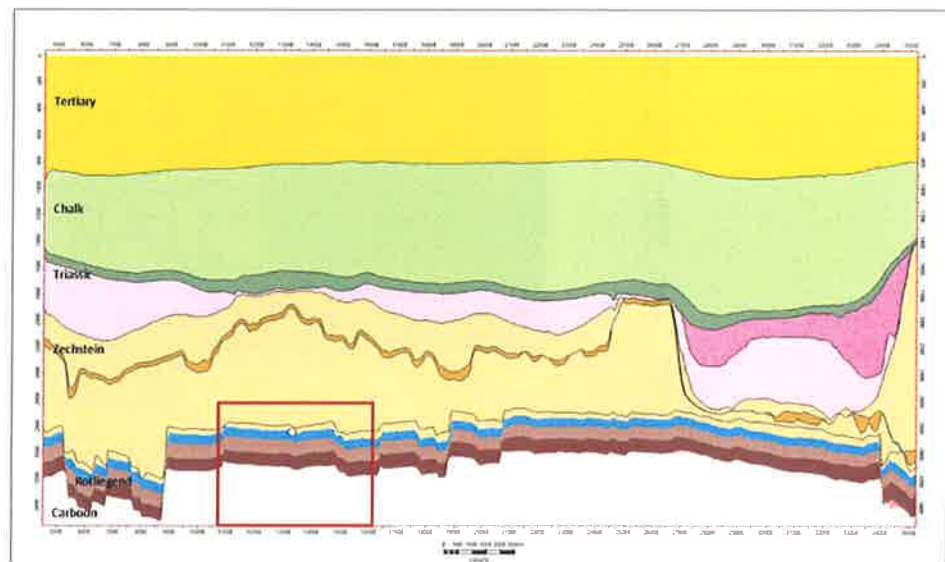
Figuur 6.8 Locatie verticale doorsnede door het Loppersum gebied, dat gekenmerkt wordt door relatief hoge seismiteit. Het gebied wordt gekenmerkt door aanwezigheid van veel NNW-ZZO georiënteerde breuken met variabel verzet. De locatie van de Huizinge $M_w=3,6$ beving is op de kaart aangegeven als witte 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).

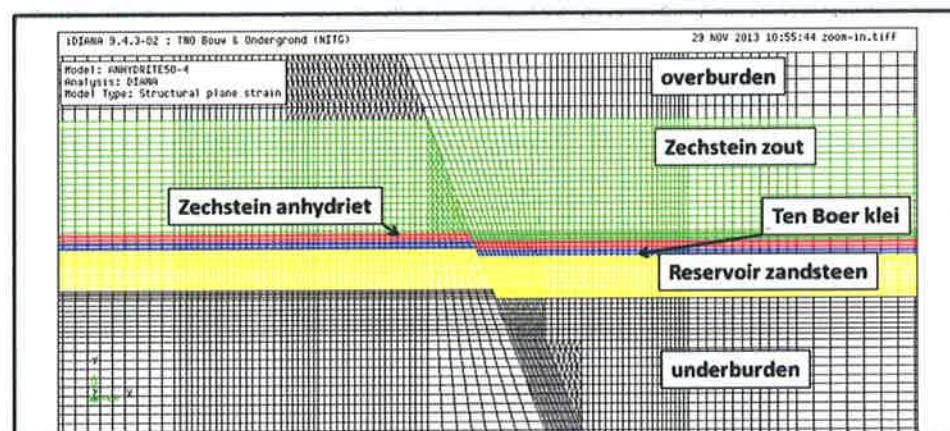
Op basis van deze verticale doorsnede van de geologie zijn in het eindige elementen programma Diana vier (geometrisch vereenvoudigde) modellen geconstrueerd van een breuk met een breukverzet variërend van 0 m, 50 m, 100 m tot 290 m om geometrische effecten te kunnen analyseren. De breuk in het Diana 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. Materiaaleigenschappen van de 6 eenheden en de breuk zijn samengevat in Tabel 6.3. Materiaaleigenschappen 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.

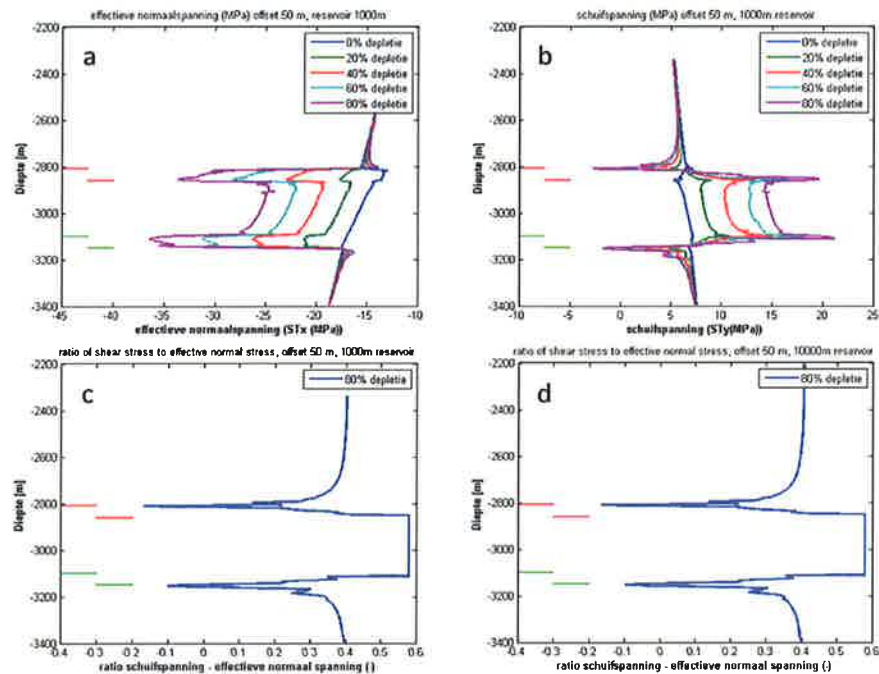
Geomechanische eenheid	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio (-)	Dichtheid (kg/m ³)	K'_0 (-)	Overig
'Overburden'	10 (15)	0,25 (0,20)	2270 (2300)	0,4 (0,4)	
Zechstein gesteentezout	35 (15)	0,30 (0,20)	2150 (2300)	1,0 (0,4)	Kruipgedrag (geen kruip)
Zechstein basale anhydrietlaag	70 (15)	0,25 (0,20)	2970 (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

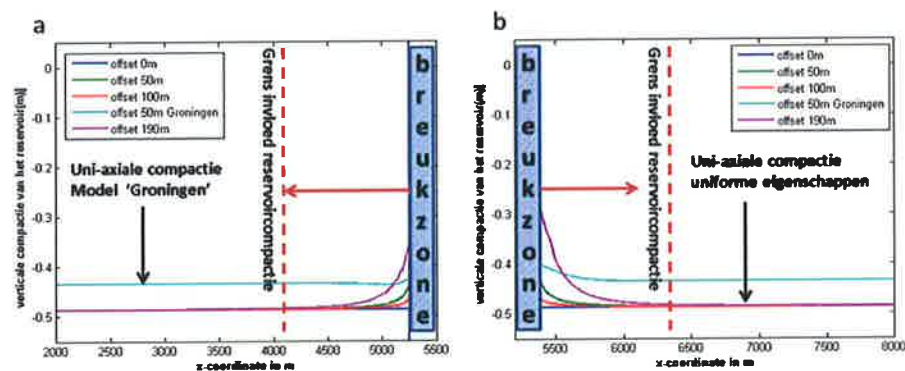
In de eerste set runs is uitgegaan van uniforme materiaaleigenschappen voor het gesteente (alle lagen gelijke materiaaleigenschappen en initiële spanningstoestand), een breuk met een frictie coëfficiënt van 0,6 en een breukverzet van 50 m (zie voor geometrie Figuur 6.10, maar dan uniforme eigenschappen). 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.

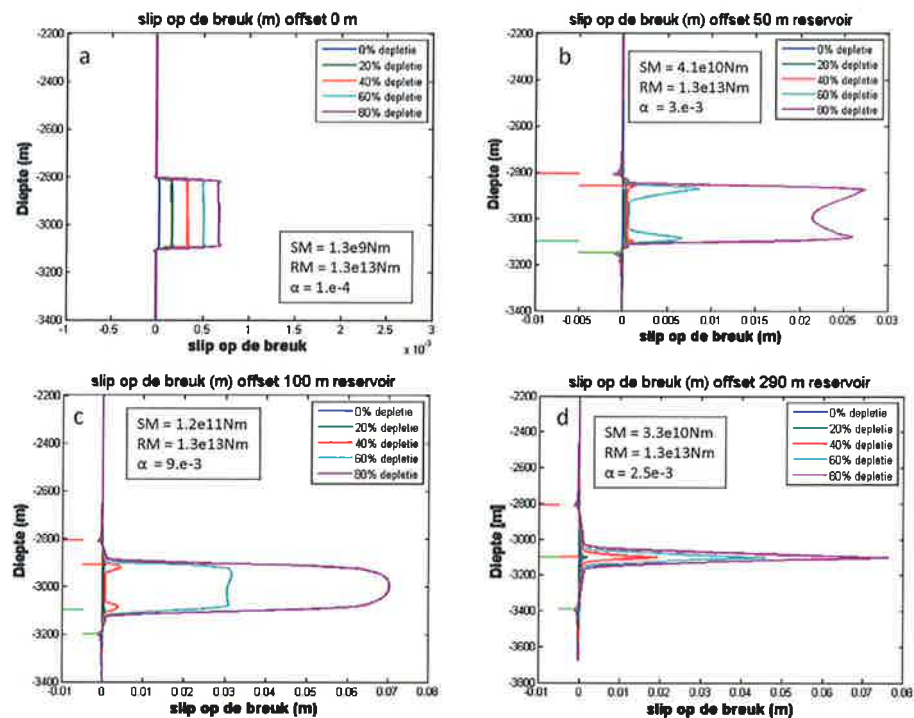


Figuur 6.12 Invloedsgebied van reservoir compactie nabij de breuk. a) Linkerzijde van het breukvlak b) rechterzijde van het breukvlak. De breuk met een verzet (*offset*) van 190m (paarse lijn) beïnvloedt de compactie van het reservoir over de grootste afstand – en vice versa. Rode pijl geeft de maximale 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 'slijp 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 'slijp moment' wordt berekend door de slijp 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 'slijp 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 ($<2 \cdot e^{-3}$).

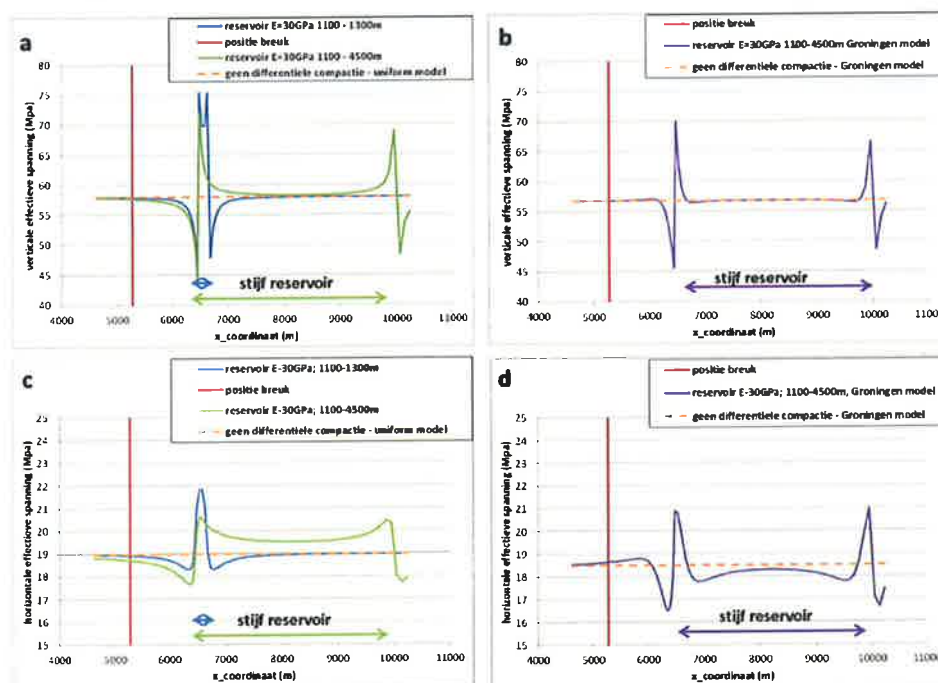


Figuur 6.13 Slip op de breuk tegen de diepte, voor 4 geometrieën: a) offset 0m, b) offset 50m, c) offset 100m, d) offset 290m. Voor elke geometrie is tevens de verhouding berekend tussen het reservoir moment en het 'slip moment' op de breuk.

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

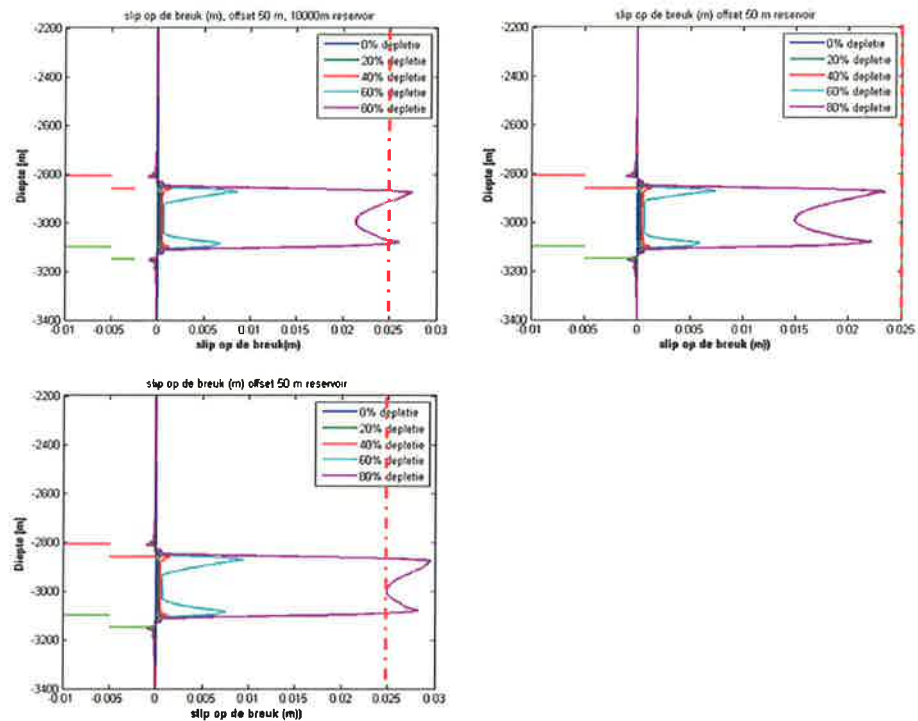


Figuur 6.14 Invloed van differentiële compactie in een reservoir compartiment nabij een breuk, zonder verzet, op de effectieve horizontale en verticale spanning in het reservoir gesteente. In het rechter reservoir compartiment is een gebied gemodelleerd met een hoge stijfheid ($E=30$ GPa), wat lokaal 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.

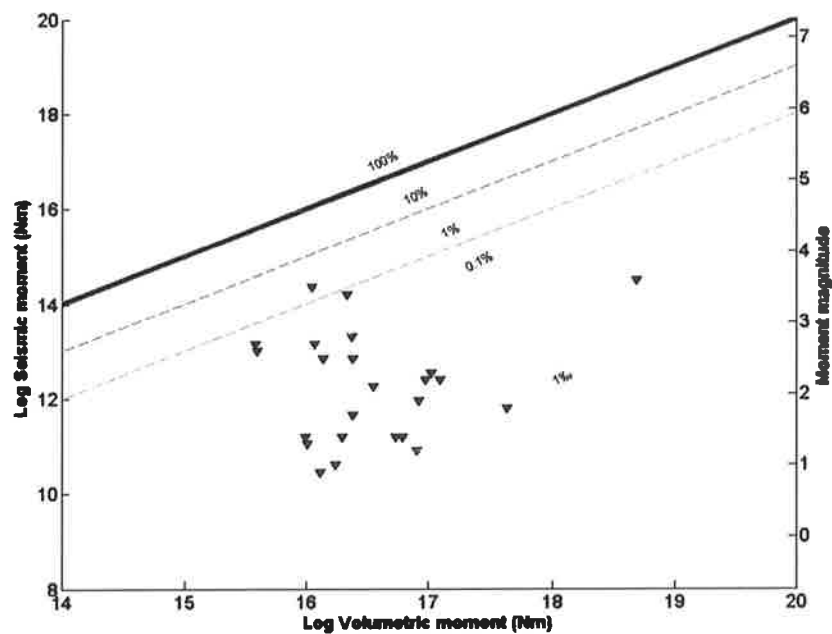
In Figuur 6.15 wordt de invloed van differentiële compactie binnen het lagere reservoir blok op de slip op de breuk getoond bij 80% depletie (voor uniforme reservoir eigenschappen, verzet 50 m). Figuur 6.15 toont drie situaties: een reservoir met homogene stijfheid, een reservoir met lokaal een hogere 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 $dP * C_m$ (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.

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

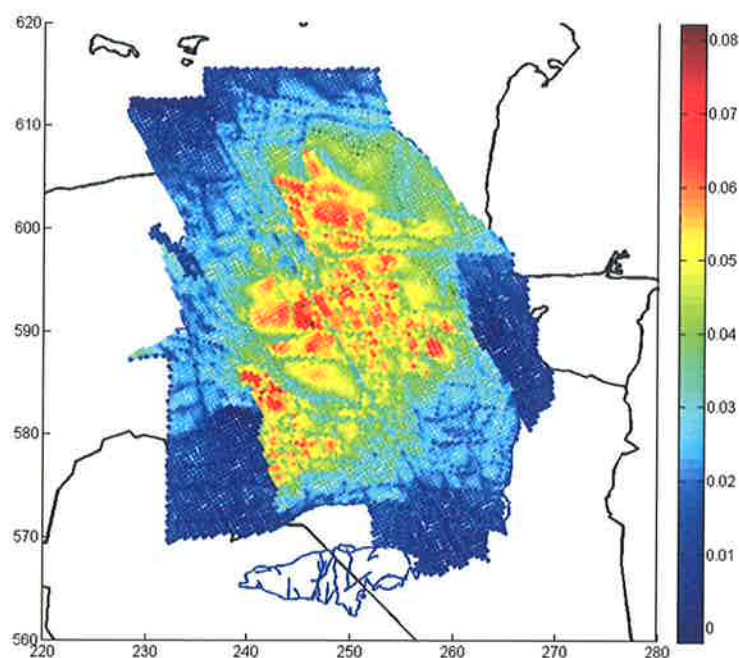
In dit hoofdstuk wordt de seismisch hazard analyse beschreven. Hierbij wordt vooral de rol van de partiticoëfficiënt op de hazard analyse benadrukt en geanalyseerd.

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

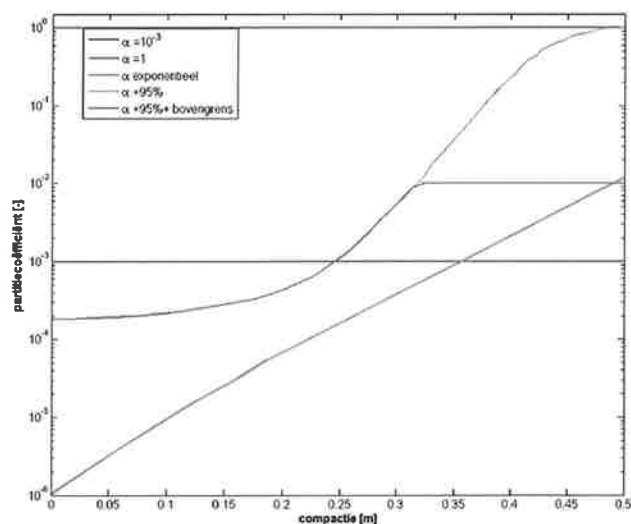
In deze stap wordt het seismisch moment berekend ten gevolge van compactie in een bepaald interval. Hiervoor wordt eerst de cumulatieve compactie berekend in de start van het interval en aan het einde van het interval. Deze cumulatieve compactie wordt dan omgezet in seismisch moment op de twee tijdstippen. 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.

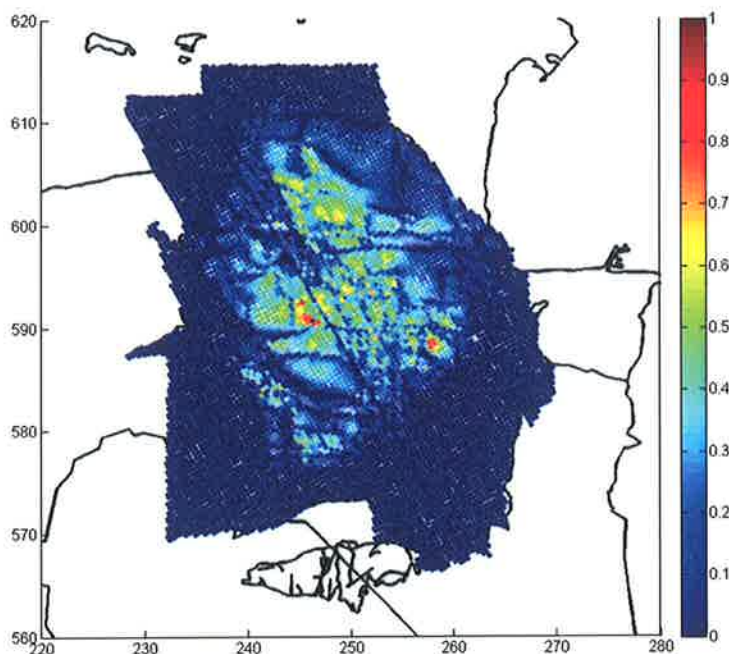


Figuur 7.2 Vier partiticoëfficiënt relaties met compactie: een constante coëfficiënt (blauw), exponentieel (rood), +95% betrouwbaarheidsinterval interval (lichtblauw) en +95% betrouwbaarheidsinterval met een bovengrens op 1% (paars).

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 Aardbevingsdichtheidkaart 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

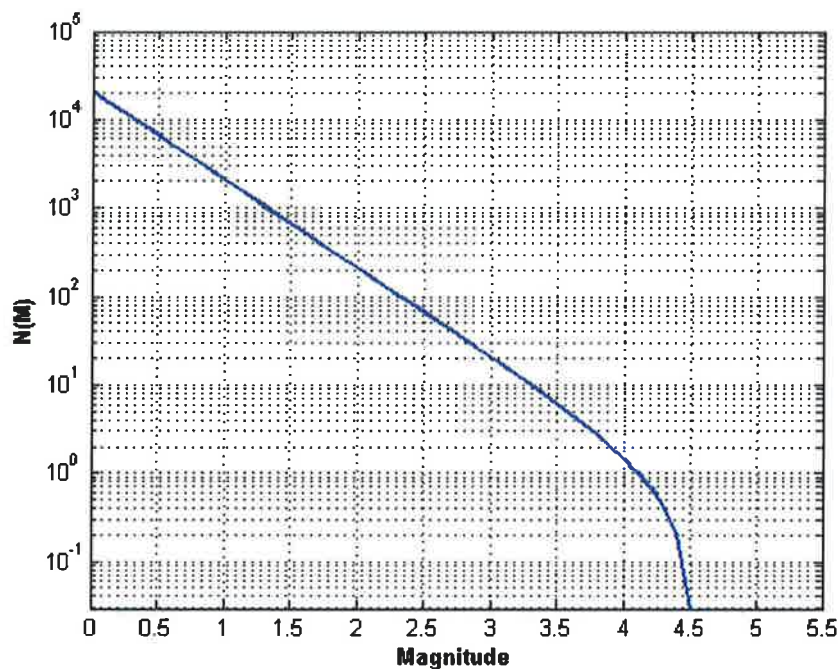
Met behulp van de maximale magnitude berekend in de eerste stap en de minimale magnitude die gegeven wordt door de zogenaamde magnitude van compleetheid van de seismische catalogus wordt een Cornell-Vanmarcke distributie berekend. Deze is gegeven door:

$$N(M) = N(M_{\min}) \frac{e^{-\beta(M-M_{\min})} - e^{-\beta(M_{\max}-M_{\min})}}{1 - e^{-\beta(M_{\max}-M_{\min})}} \quad (7.1)$$

met

$$\beta = b \ln 10 \quad (7.2)$$

Voor Groningen geldt $b = 1$ (NAM, 2013a; Dost en Kraaijpoel, 2013) en de magnitude van compleetheid 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*

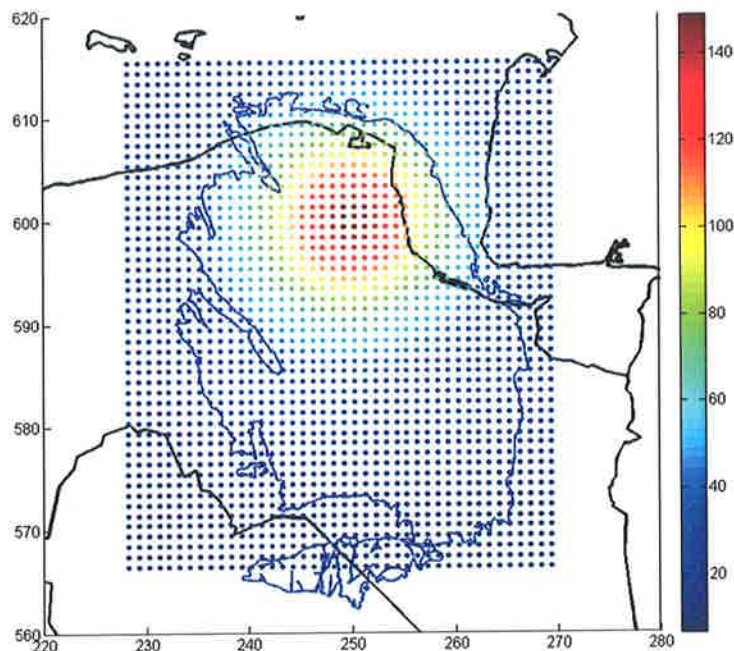
Met de Cornell-Vanmarcke distributie uit stap drie wordt eerst een catalogus opgebouwd voor de magnitudes van de bevingen. Hierbij wordt de maximale magnitude uit de distributie aangepast zodanig dat geen magnitude kan worden getrokken waarbij de totale beschikbare seismische energie, verkregen in Paragraaf 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 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

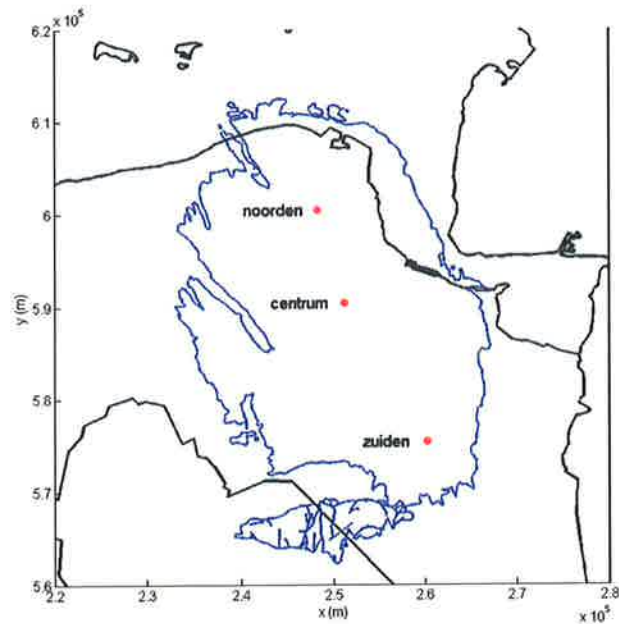
Tabel 7.3. Overschrijdingskansen voor PGA in cm/s^2 voor de locatie in het noorden (Figuur 7.6) en de exponentiële functie van de partiticoëfficiënt met de compactie (Figuur 7.5).

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 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).

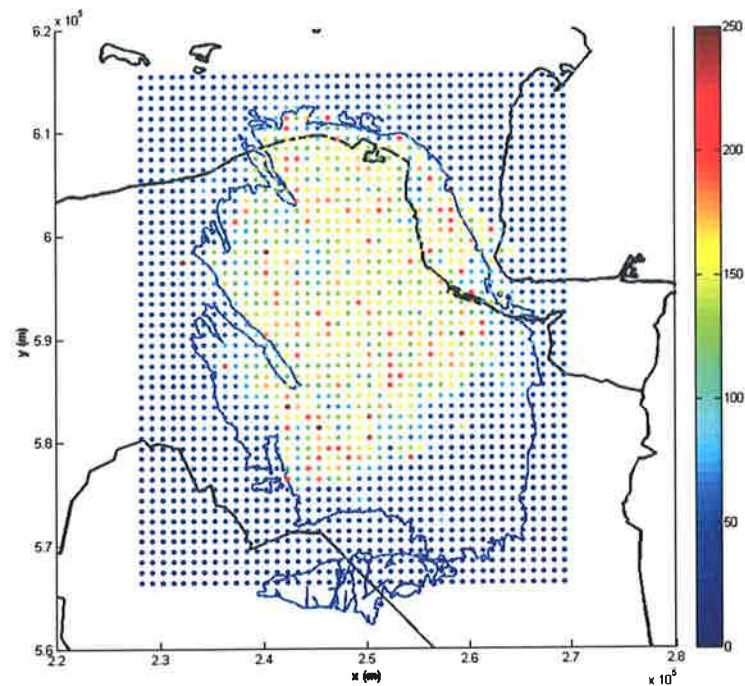
Overschrijdingskans	100 catalogi	200 catalogi	1.000 catalogi	10.000 catalogi
2 %	86	34	91	98
10 %	79	28	56	60
50 %	47	12	18	18

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.

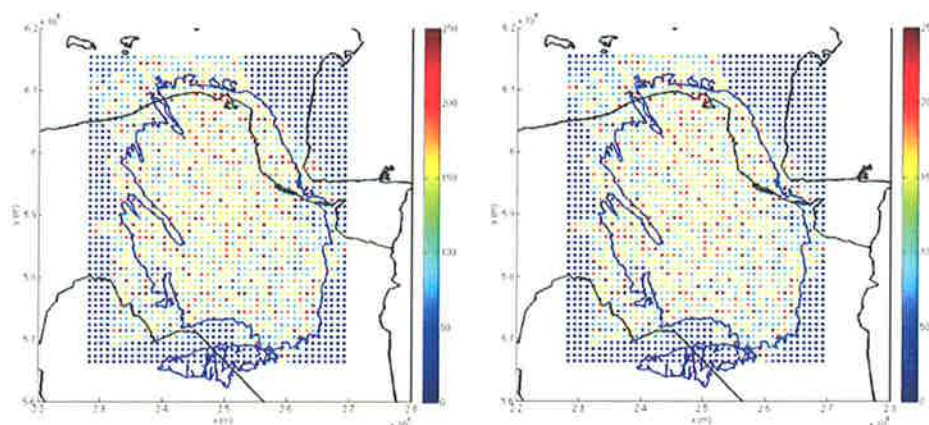


Figuur 7.6 Drie locaties (noord, centrum, zuid) welke gebruikt worden in de seismische hazard analyse.

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 cm/s²), voor de exponentiële partiticoëfficiënt compactie functie en de komende 10 jaar.



Figuur 7.8 2% overschrijdingskans voor de gegeven grondversnellingen (PGA in cm/s²), 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 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

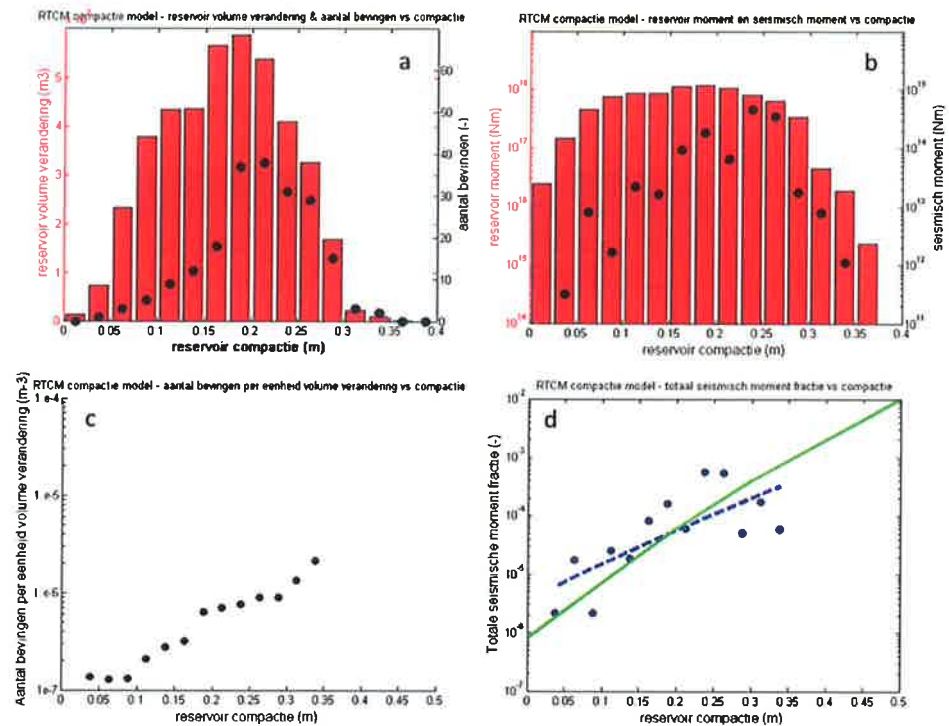
In deze paragraaf wordt ingegaan op de afhankelijkheid tussen de partiticoëfficiënt en de compactie. De relatie voor de partiticoëfficiënt wordt voor het marktvaagscenario berekend met het RTCM compactiemodel. Deze relatie wordt vergeleken met de relatie die door NAM (2013b) is bepaald. Daarnaast wordt 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 \cdot 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_{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_{seis}) per compactie-interval is geplott in Figuur 7.9a. Het cumulatieve seismische moment (M_{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 α'_f de totale seismische moment fractie of partiticoëfficiënt is, f en g modelparameters zijn, Δh compactie is en $\gamma = 0,75$ de fractie van reservoircompactie beschrijft die heeft plaats gevonden voor 1995 (NAM, 2013a,b).

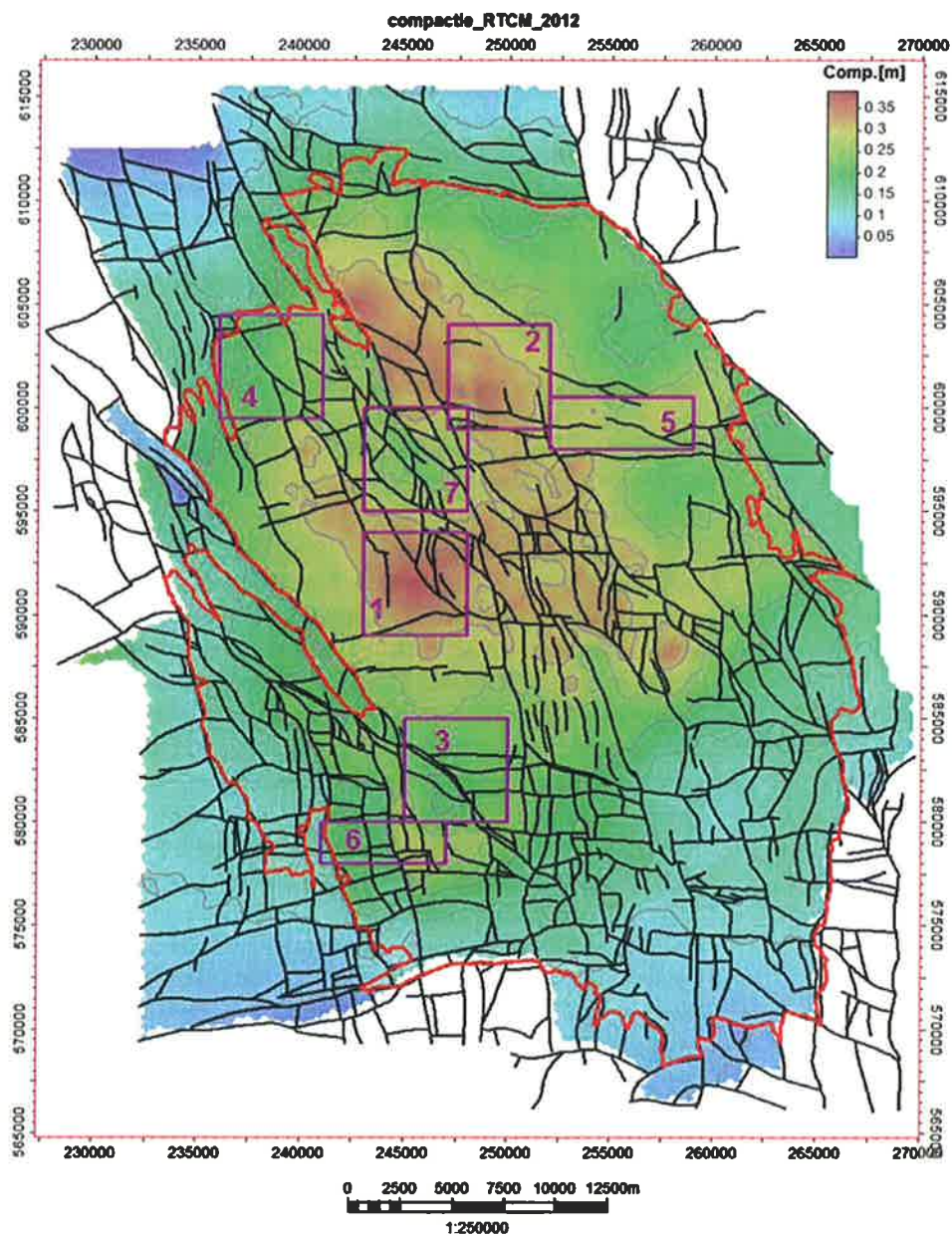
Compactie-intervallen waarbinnen geen aardbevingen zijn geobserveerd (oftewel geen seismisch moment) zijn niet in de data-fit meegenomen.

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).

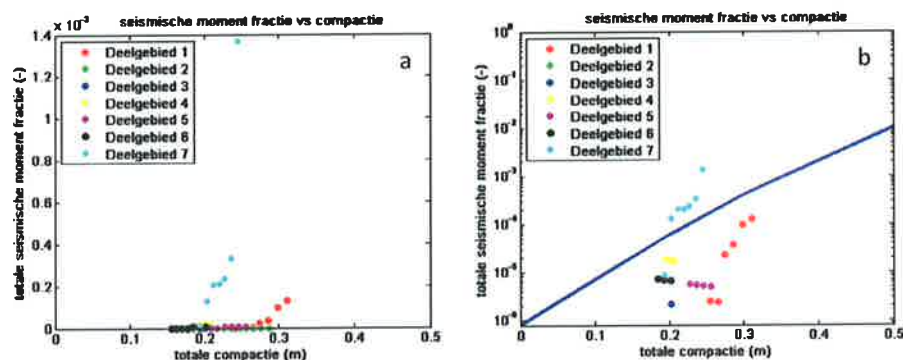
7.3.2 *Afleiding van de relatie voor de partiticoëfficiënt voor deelgebieden in het Groningen veld*

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_{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_{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.

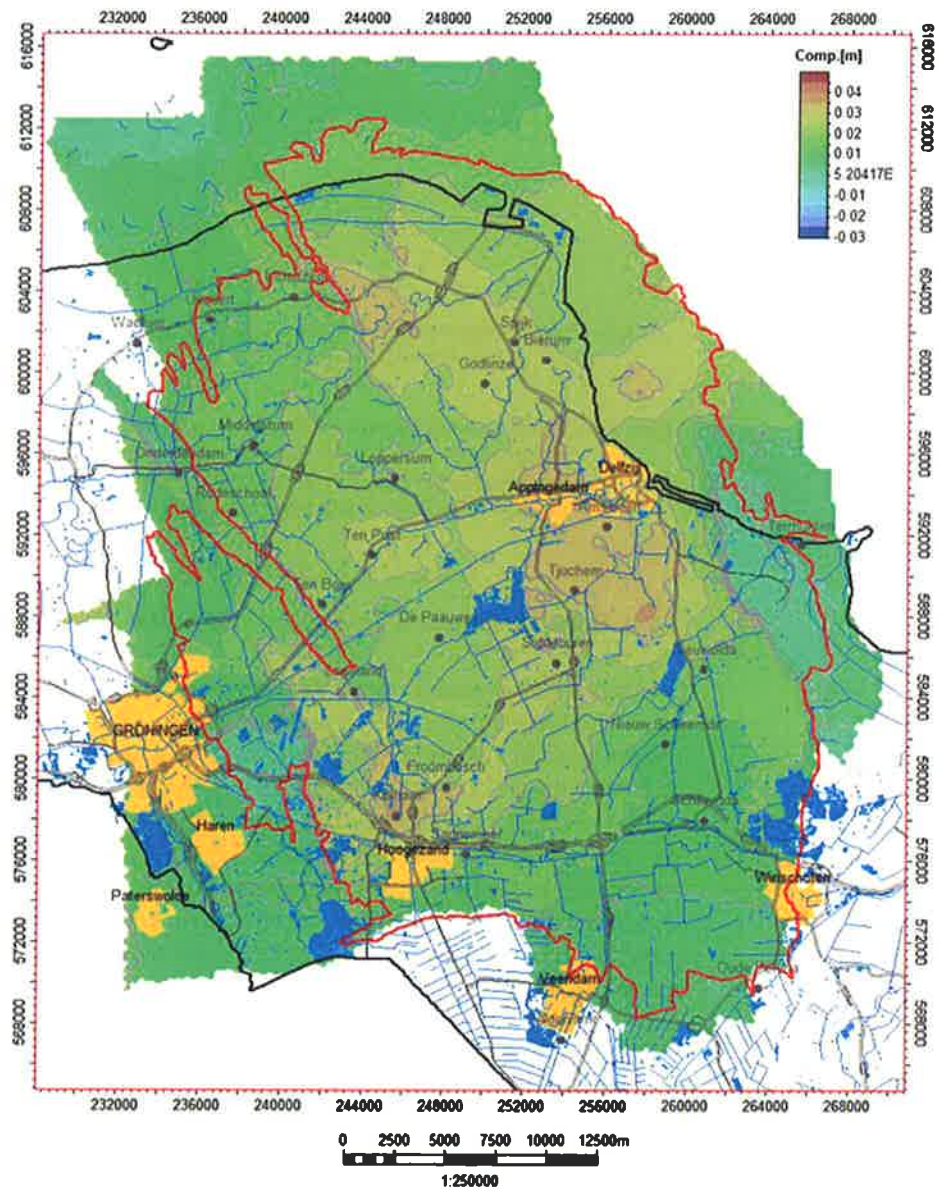


Figuur 7.11 Totale seismische moment fractie of partiticoëfficiënt versus compactie voor 7 deelgebieden in het Groningen gasveld. Locatie van de deelgebieden wordt weergegeven in Figuur 7.10. De blauwe lijn in b) geeft de oorspronkelijke best-fit weer van het 'time decay' compactie model beschreven in NAM (2013b).

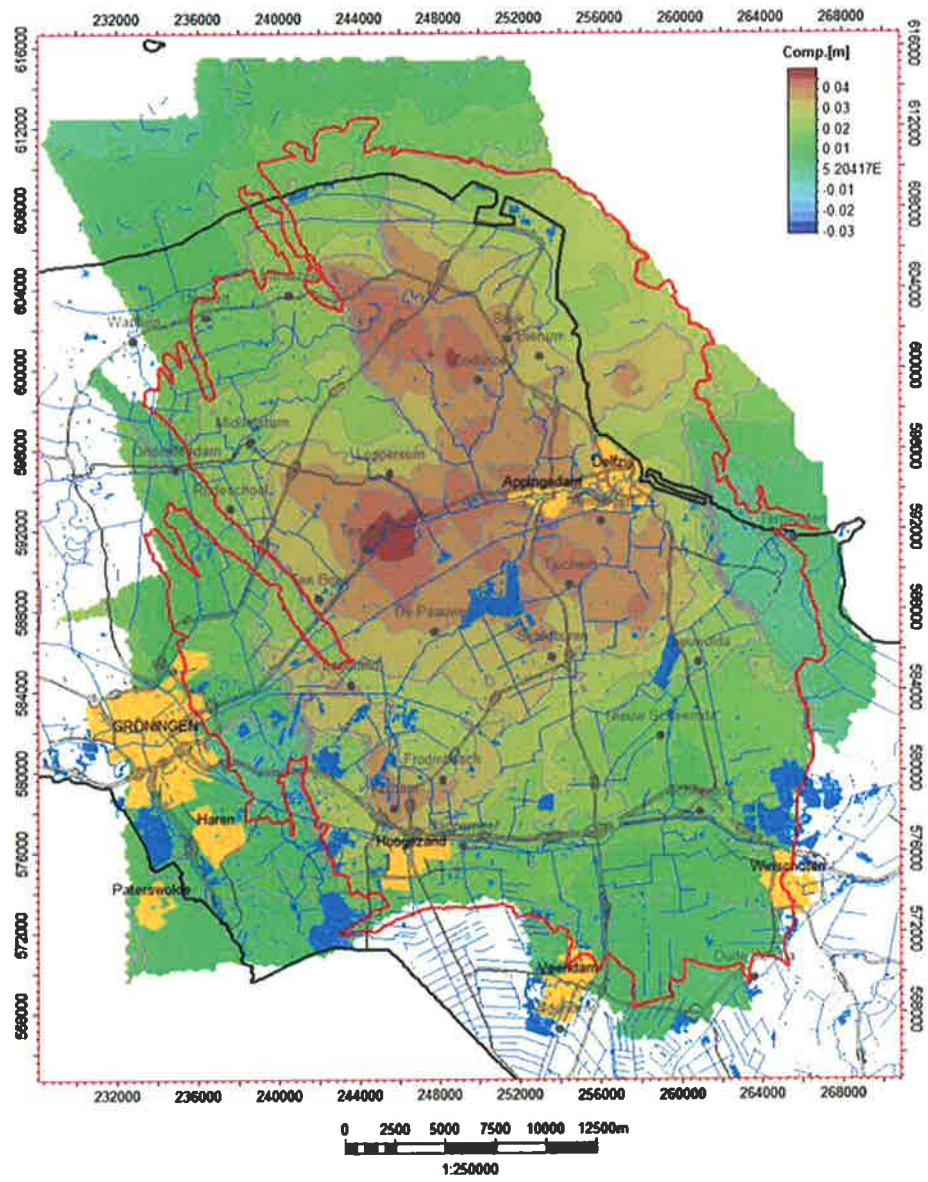
7.4 Seismisch hazard naar seismisch risico

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.

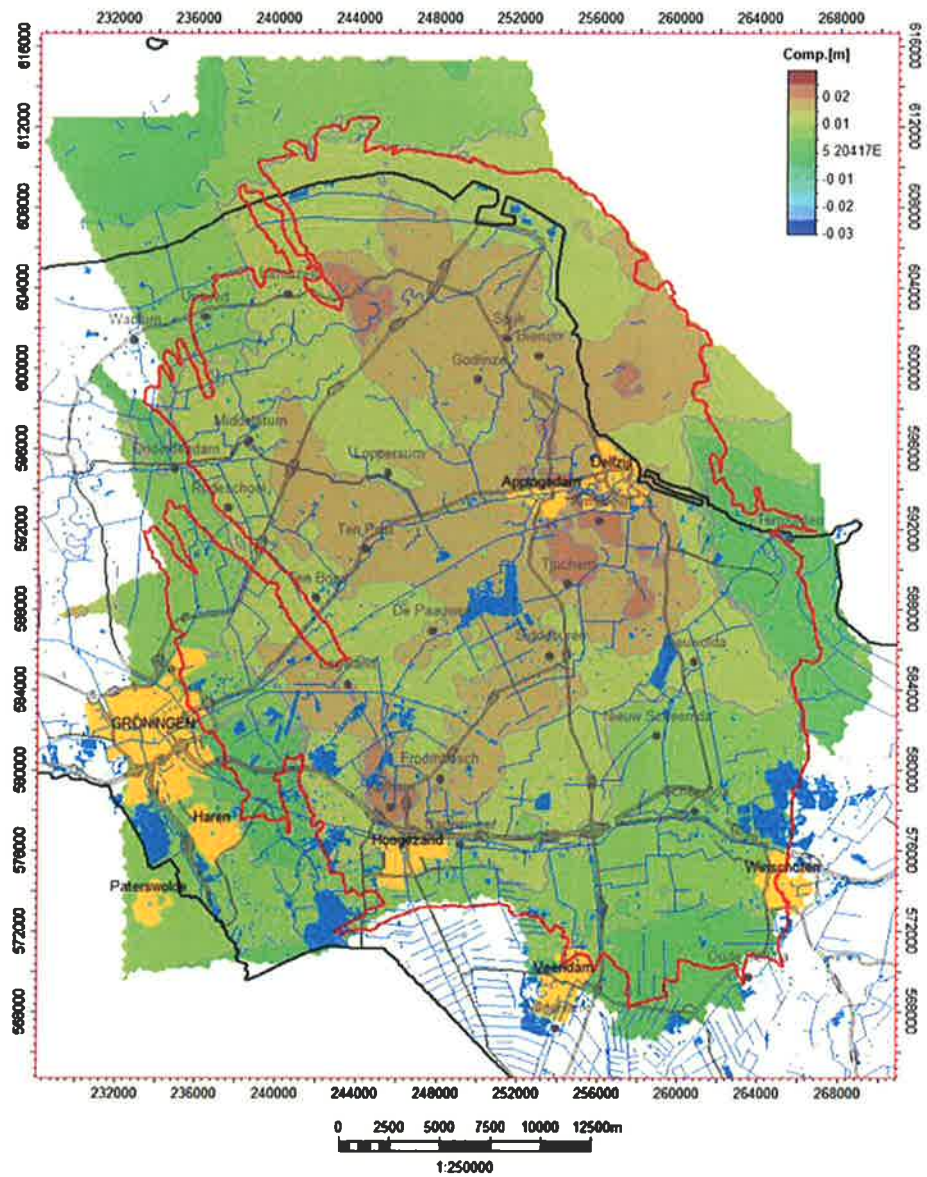
In Figuur 7.12 en Figuur 7.13 worden twee productiescenario's vergeleken in termen van compactie nl. 1) het marktvraag scenario en 2) het 30 bcm/jaar scenario met een stop in de productie voor 5 clusters in het Loppersum gebied (30 bcm A4), voor het tijdsinterval 2013 tot 2018. Deze compactiescenario's 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.



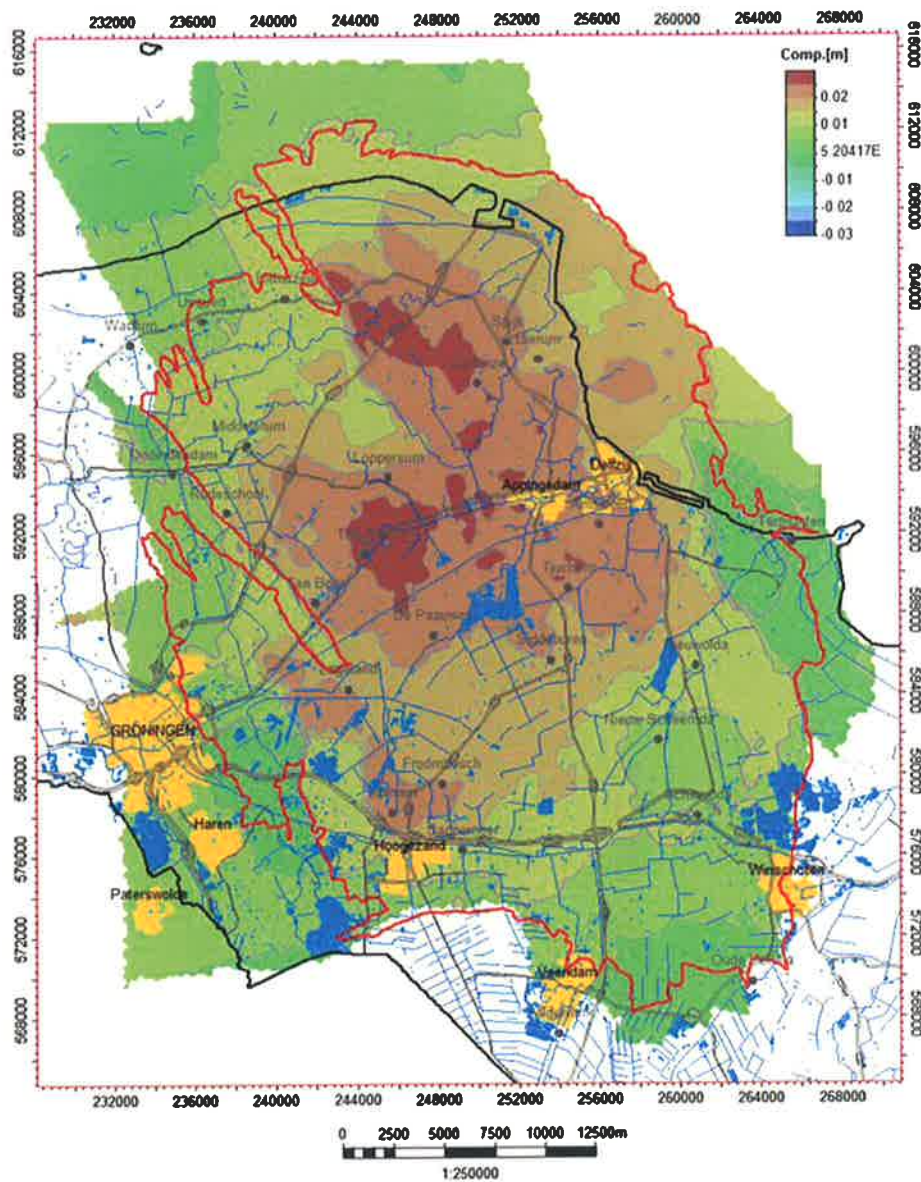
Figuur 7.12 Compactie in het interval 2013 tot 2018 voor het 30 bcm/jaar scenario waarbij de productie rondom Loppersum is stilgelegd (Tabel 3.2).



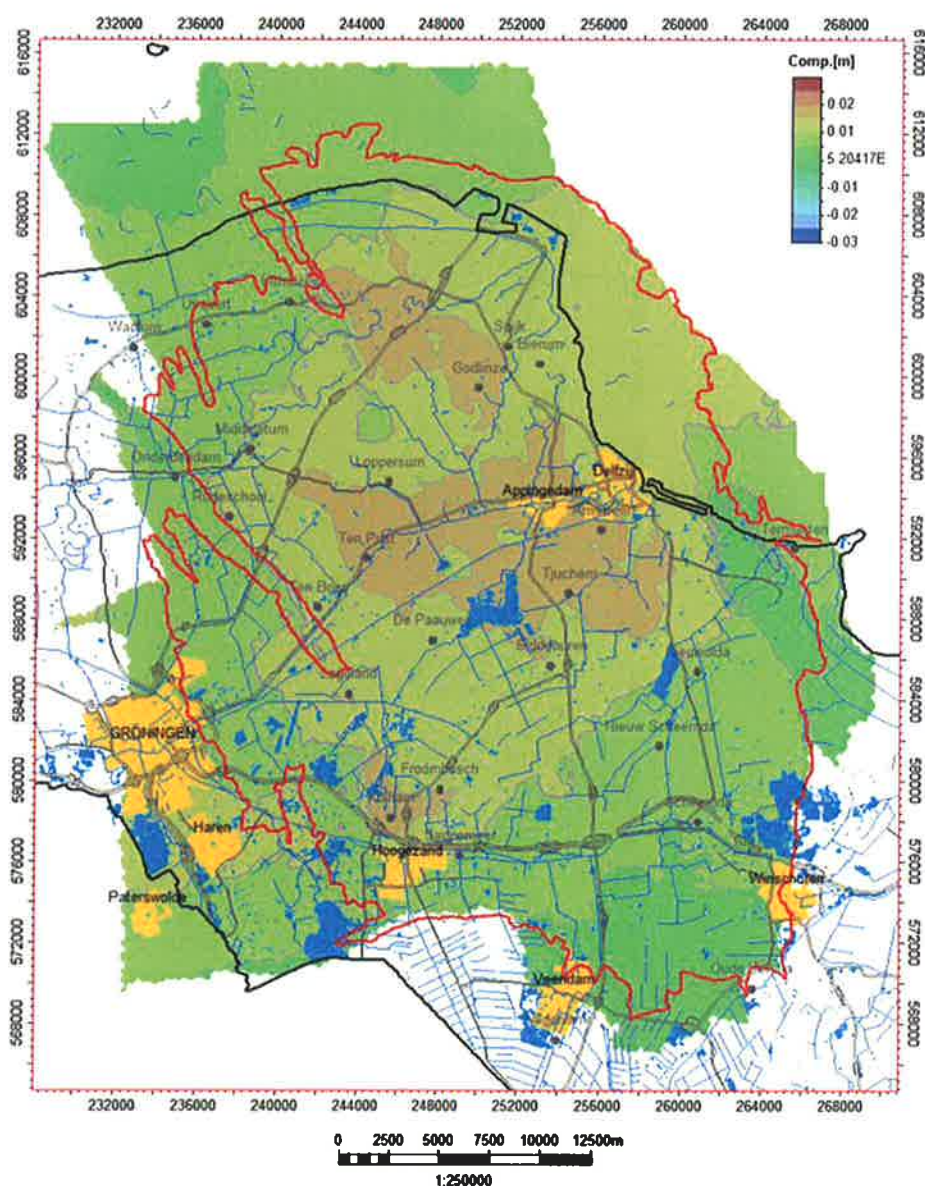
Figuur 7.13 Compactie in het interval 2013 tot 2018 voor het marktvaag scenario (Tabel 3.2).



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).



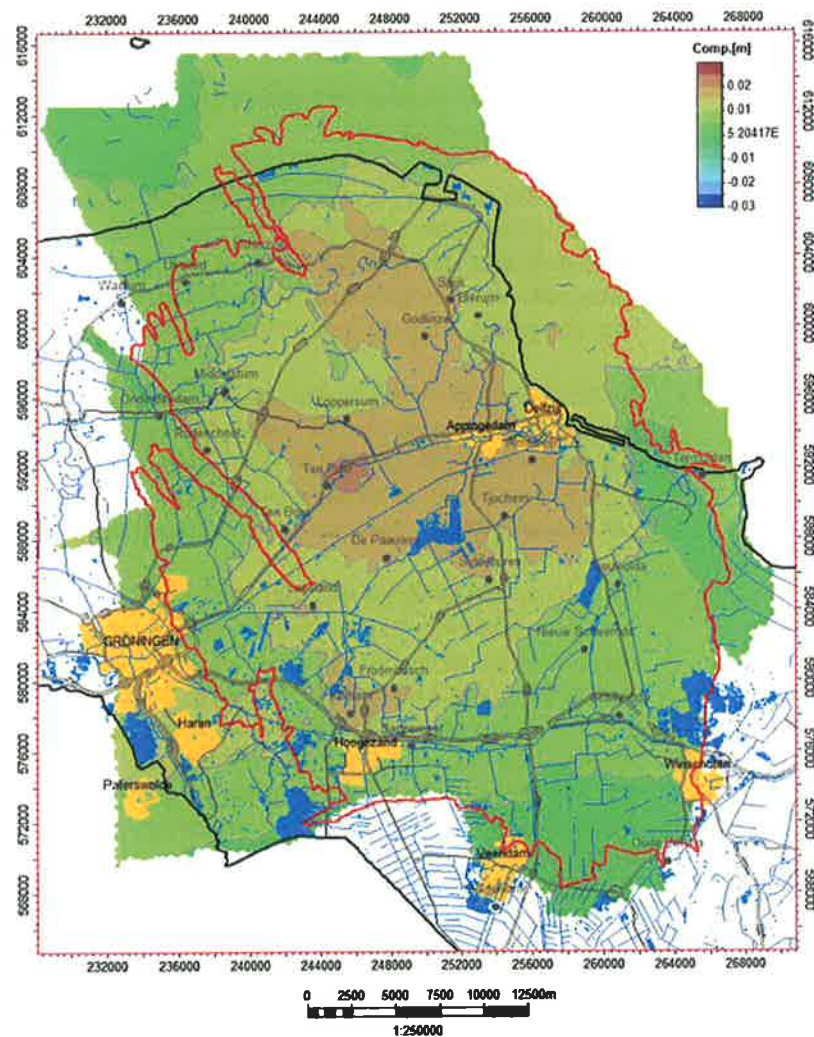
Figuur 7.15 Compactie in het interval 2013 tot 2016 voor het marktvaag scenario (Tabel 3.2).



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 maat 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 stopzetting 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 ± 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 3rd 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 1st 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 gebruiksruimte 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.

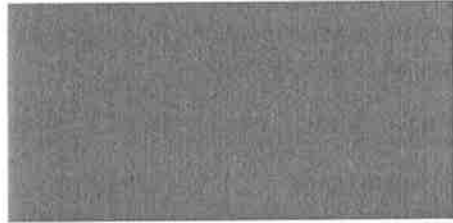
NAM, 2013a. Report to the technical guidance committee (TBO) on subsurface aspects of induced earthquakes in the Groningen field.

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 TNO 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

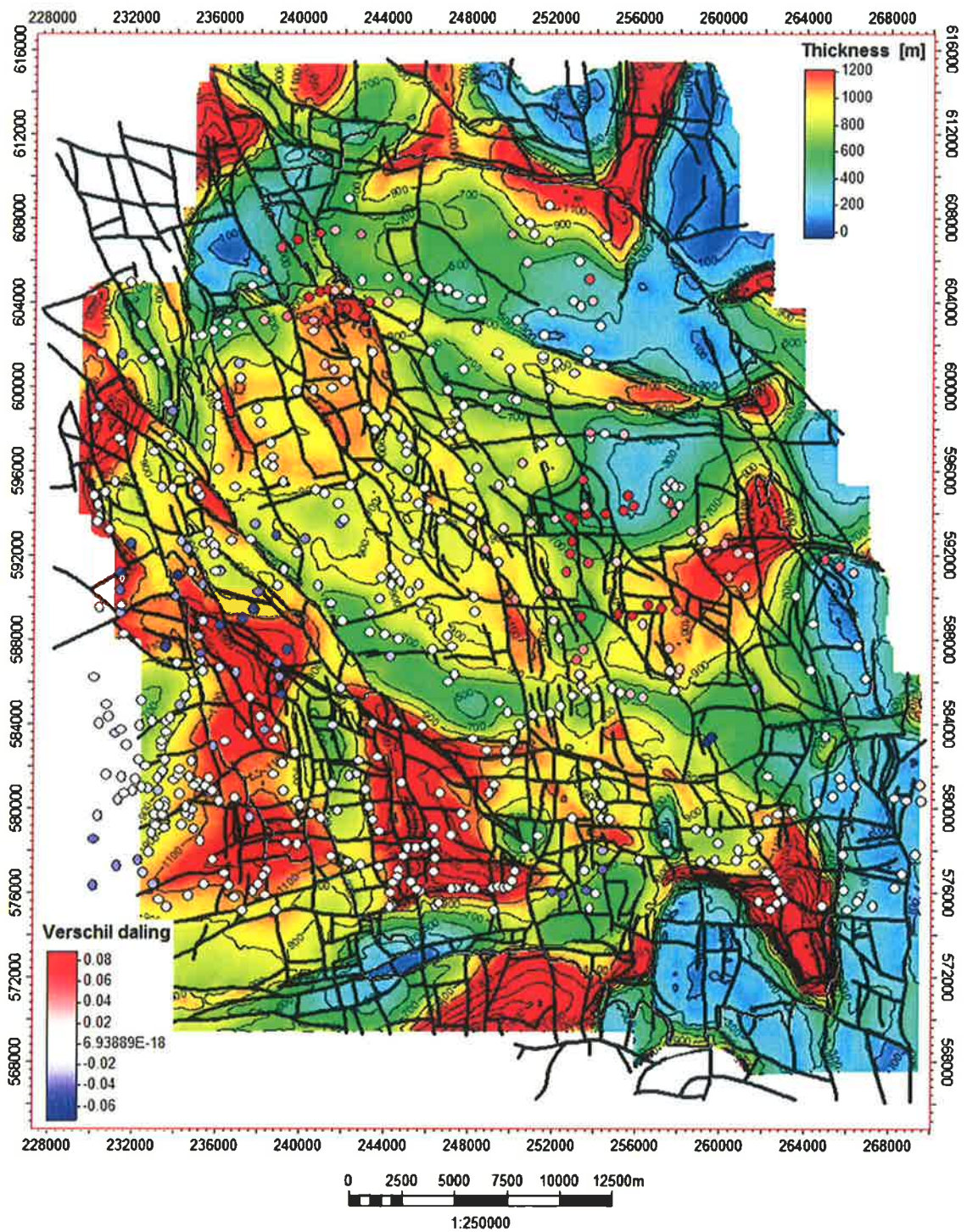
Utrecht, 23 december 2013



11 Appendices

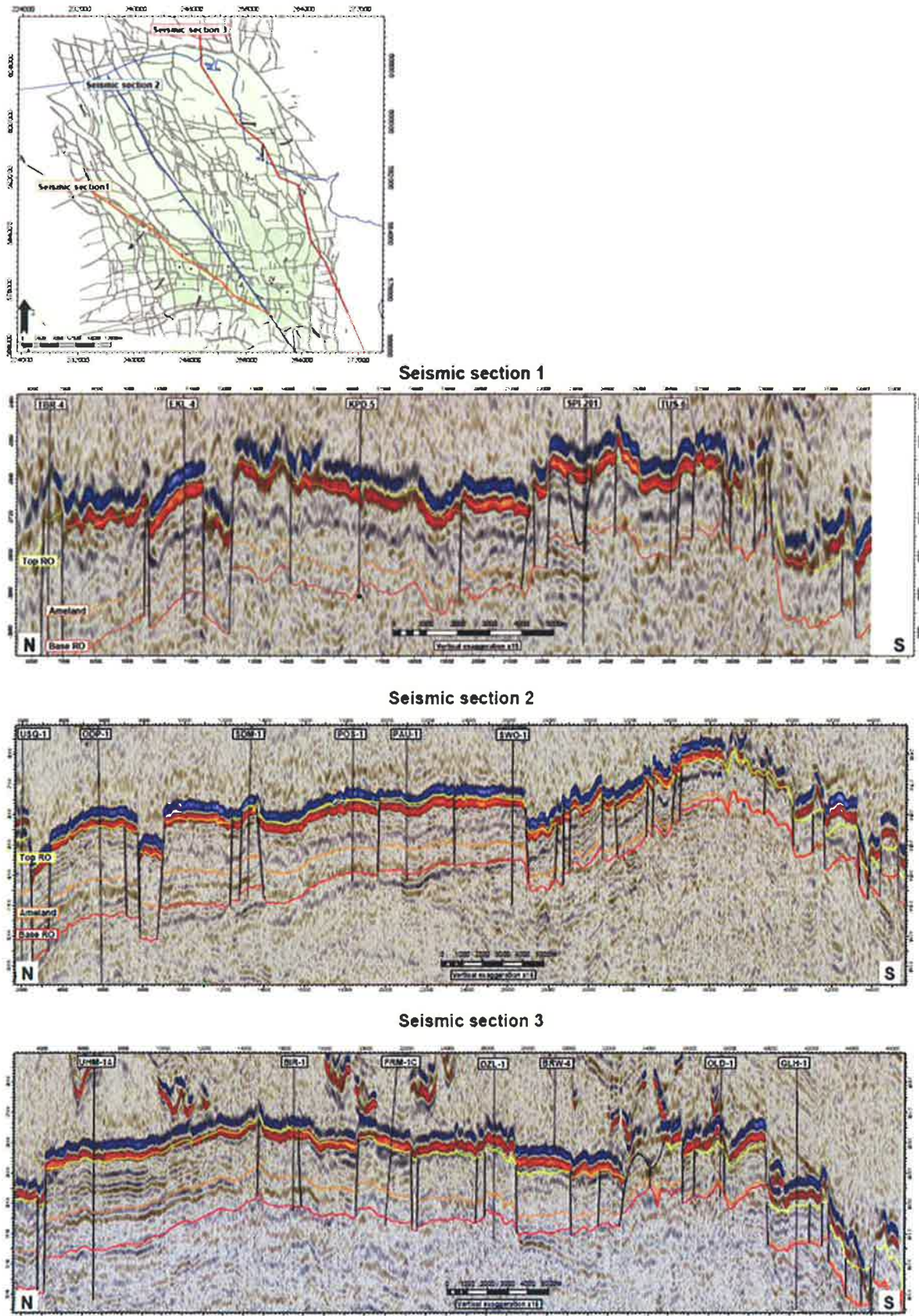
Appendix A

Appendix A.1: Discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling op de kaart van Zechstein dikte



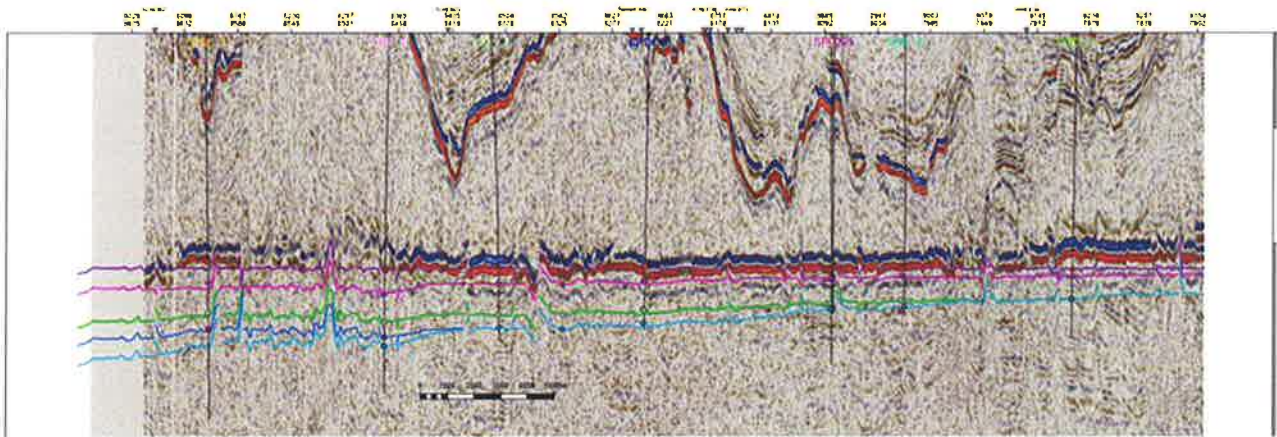
Figuur A.1.1 Diktekaart van de Zechstein formatie. Er is geen correlatie tussen de Zechstein dikte en de discrepantie tussen berekende en geobserveerde bodemdaling.

Appendix A.2: Noord-zuid seismische doorsnedes.

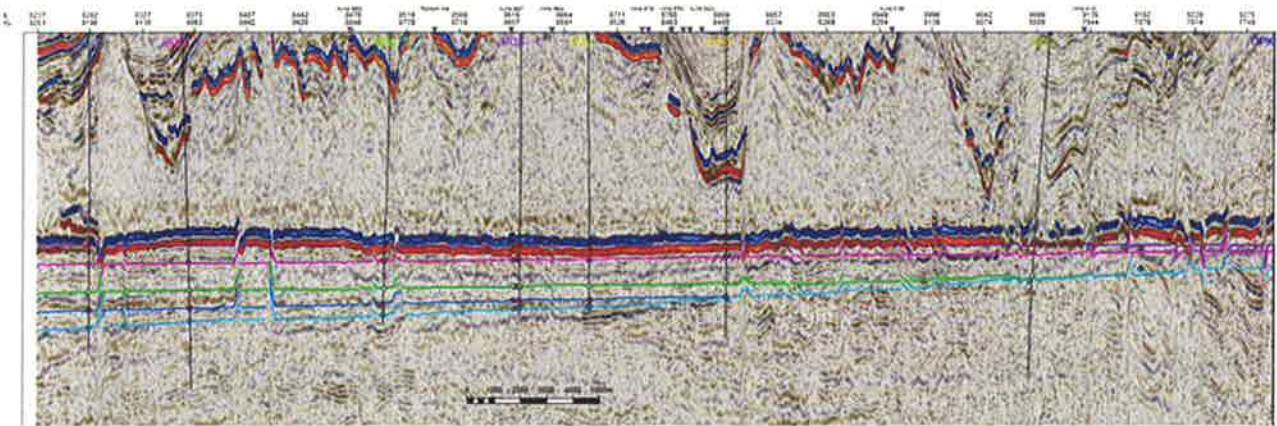


Figuur A.2.1 Noord-zuid seismische doorsnede.

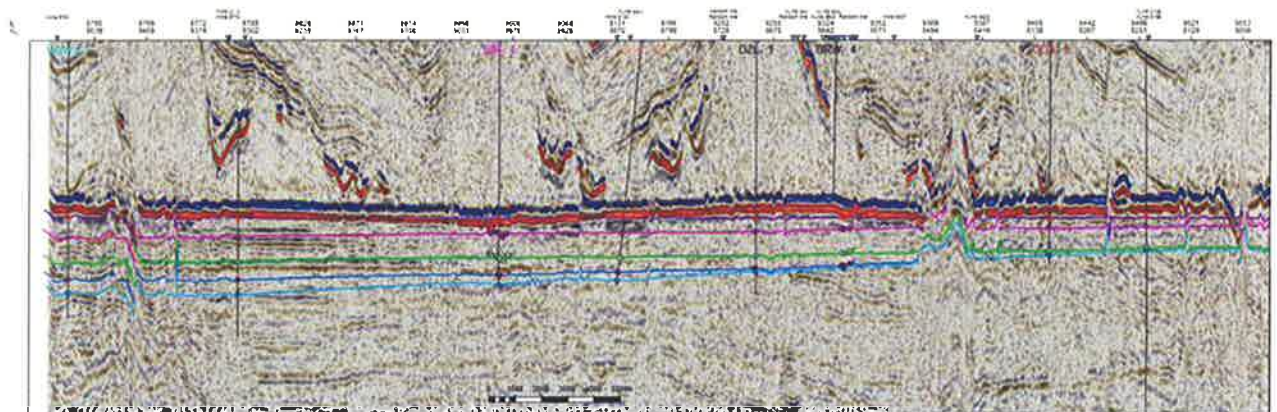
Well Section 1 Flattened on modelled top Rotliegend



Well Section 2 Flattened on modelled top Rotliegend

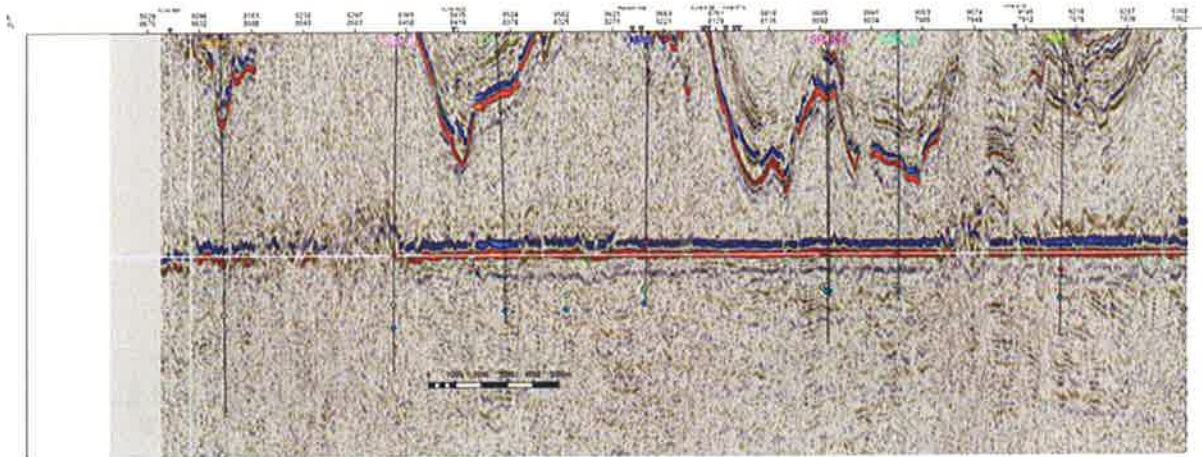


Well Section 3 Flattened on modelled top Rotliegend

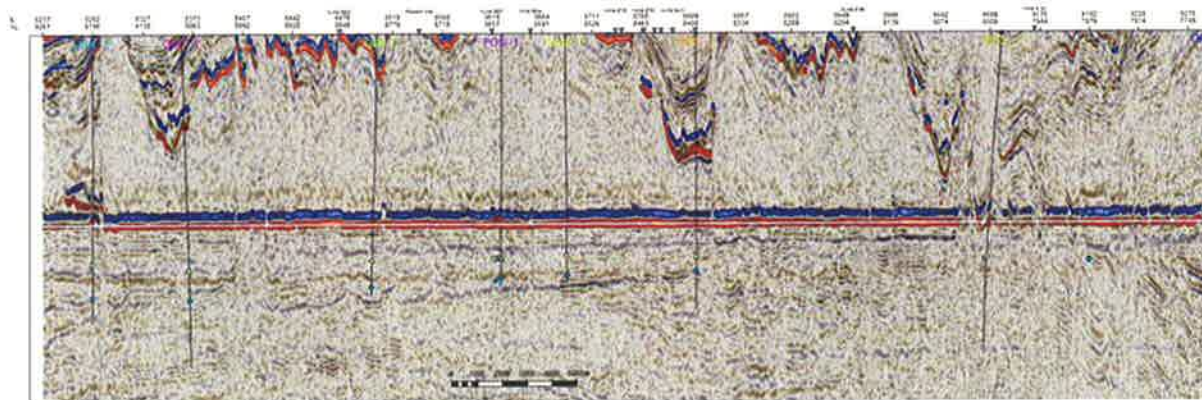


Figuur A.2.2 Noord-zuid seismische doorsnede (afgeplat op gemodelleerde top Rotliegend).

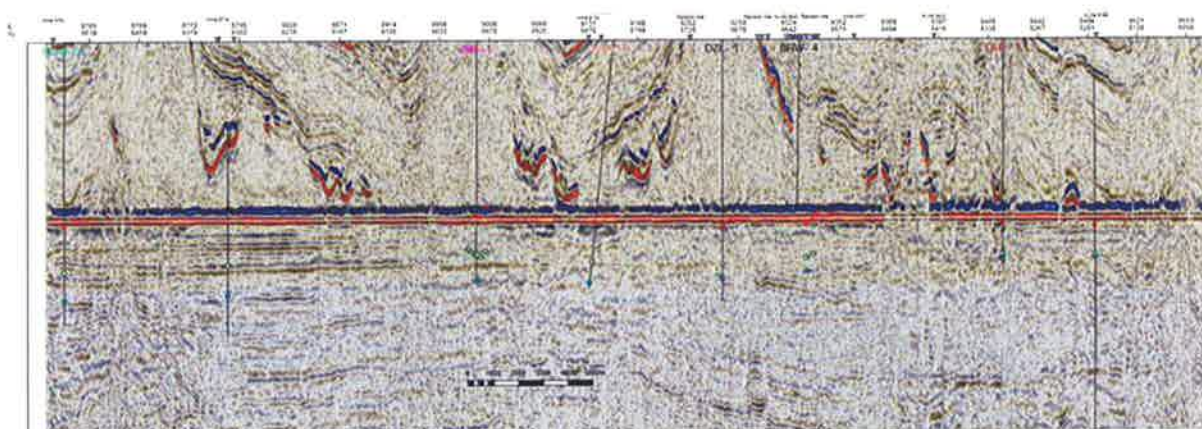
Well Section 1 Flattened on Interpreted top Rotliegend



Well Section 2 Flattened on Interpreted top Rotliegend

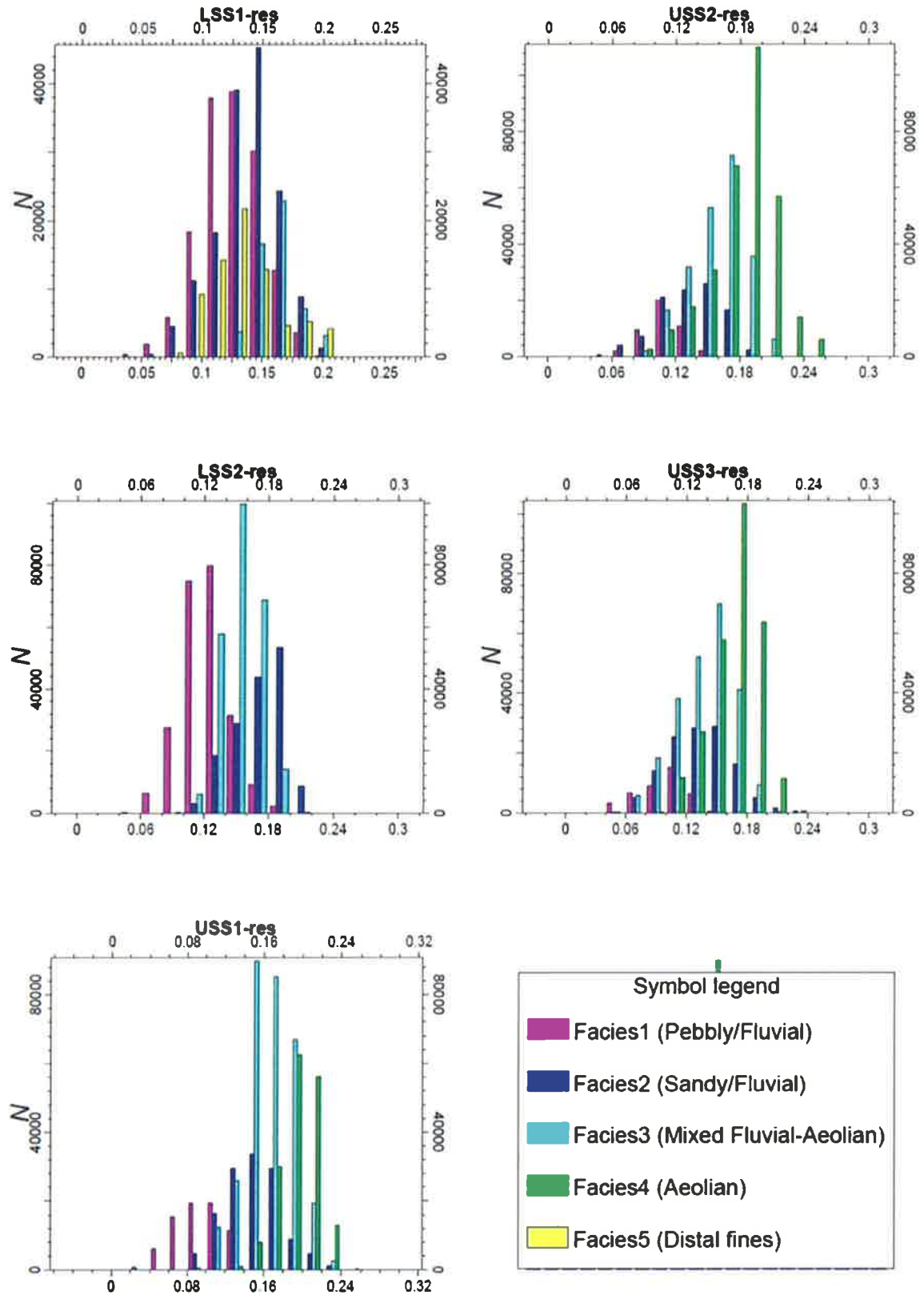


Well Section 3 Flattened on Interpreted top Rotliegend



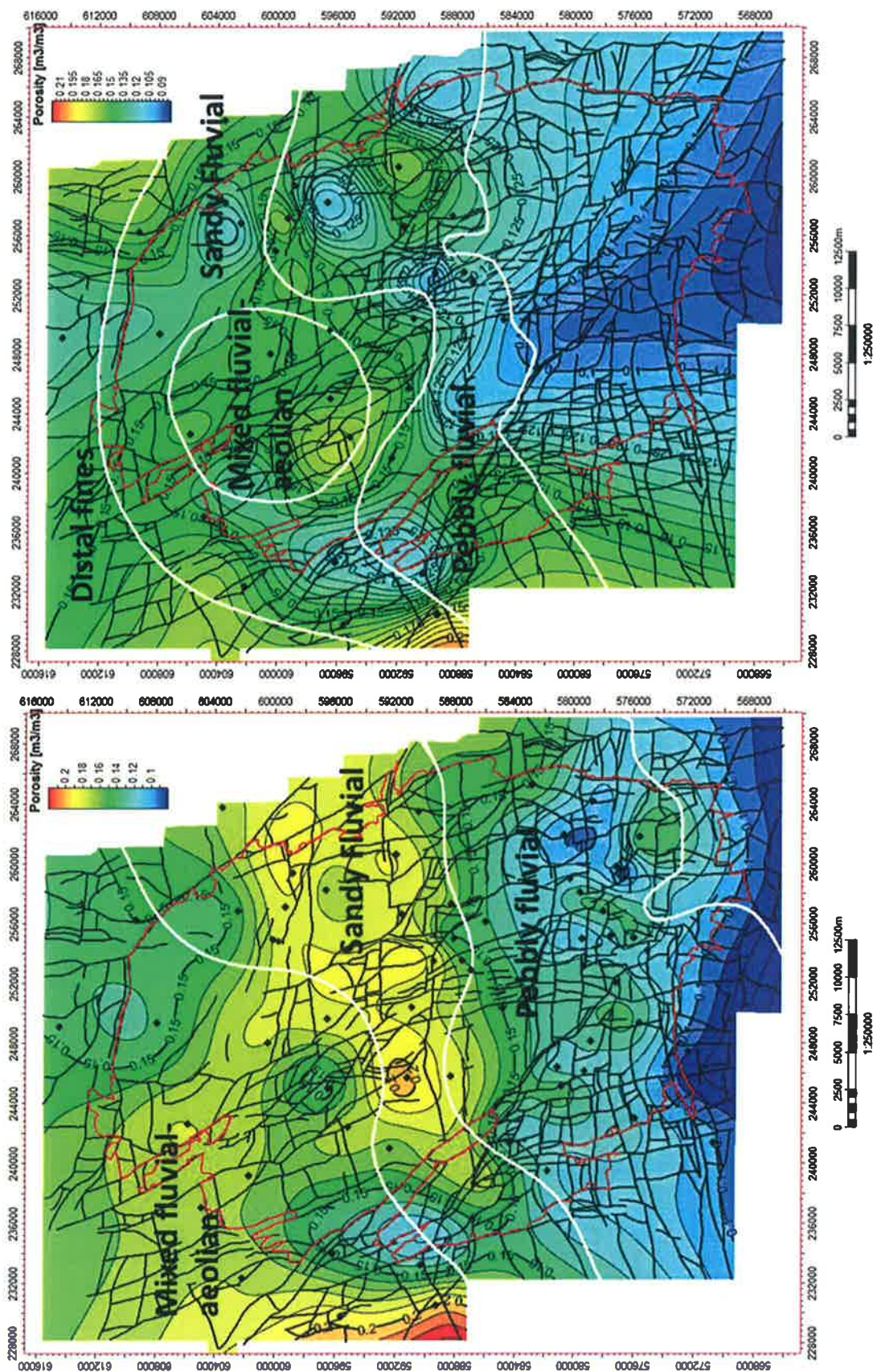
Figuur A.2.3 Noord-zuid seismische doorsnedes (afgeplat op in de seismiek geïnterpreteerde top Rotliegend).

Appendix A.3: Porositeitsdistributie per faciesklasse

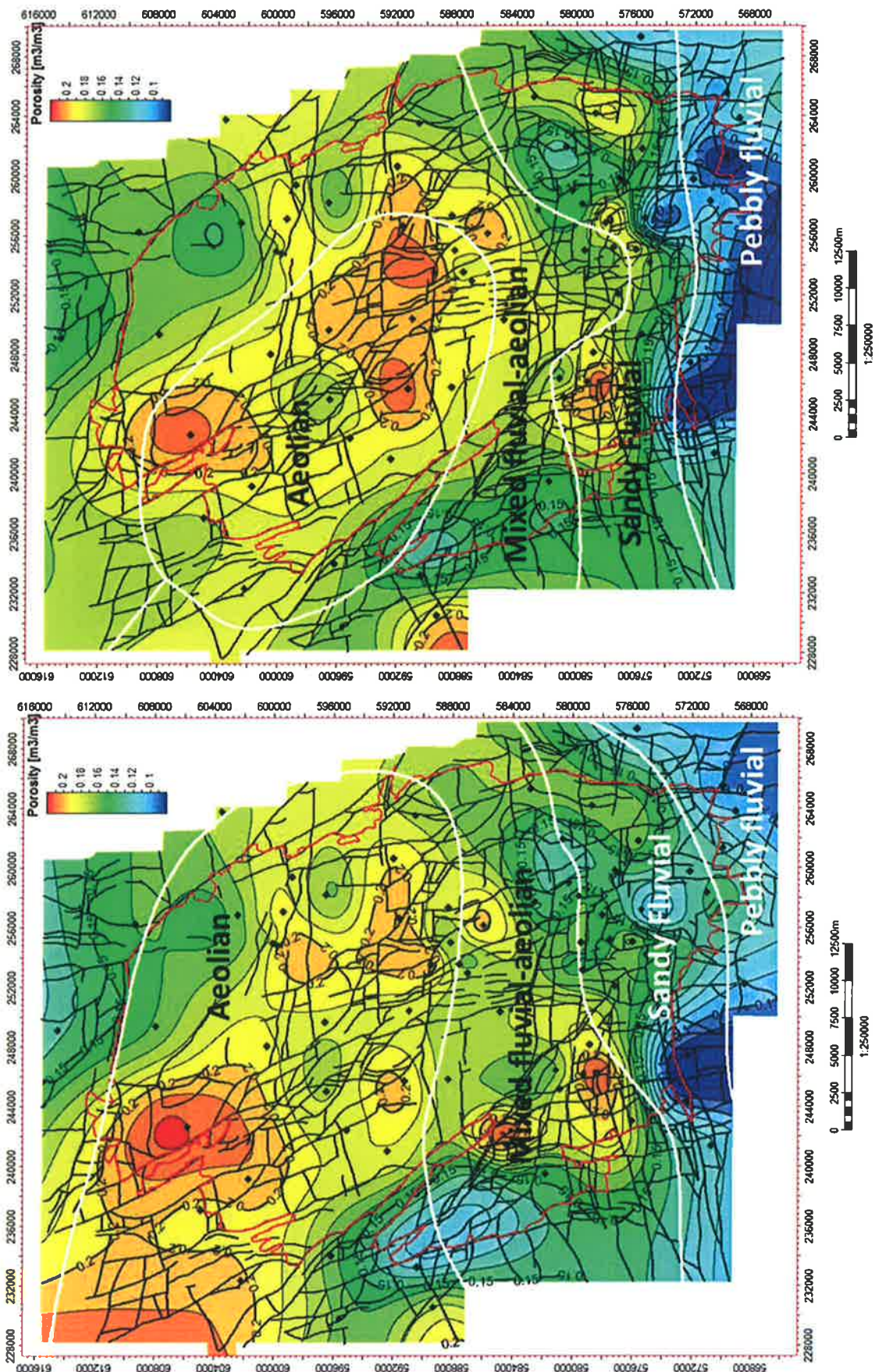


Figuur A.3.1 Porositeitsdistributie per faciesklasse voor de reservoirzones LSS1-res, LSS2-res, USS1-res, USS2-res en USS3-res.

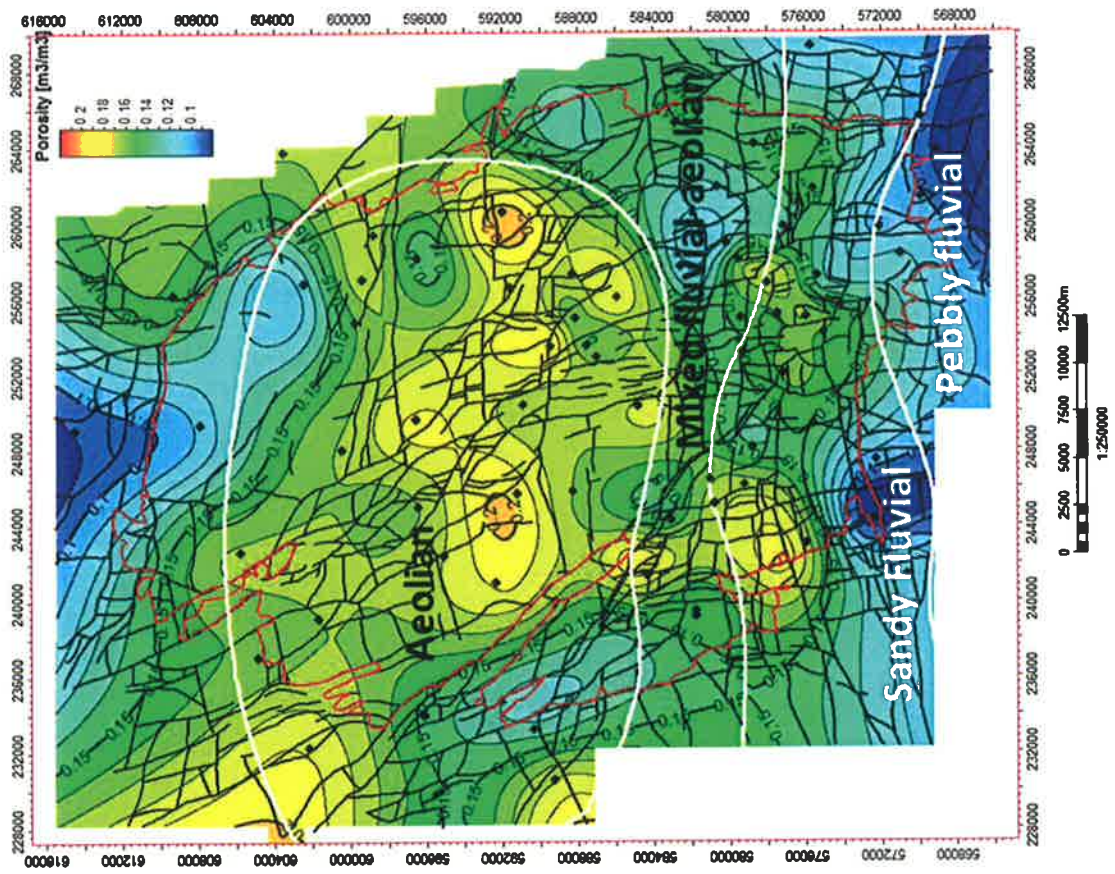
Appendix A.4: Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van alle reservoirzones



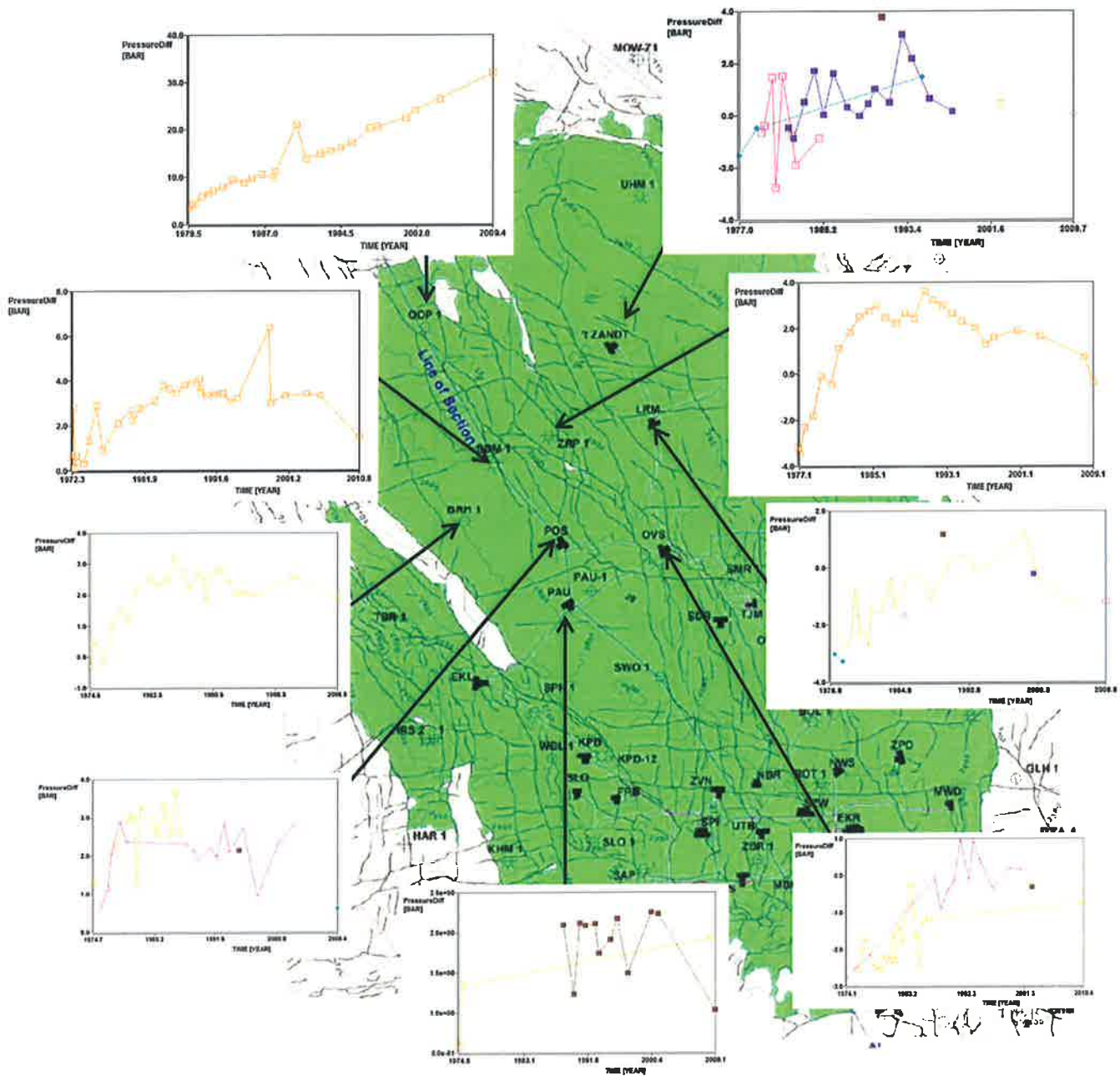
Figuur A.4.1 Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van de reservoirzones LSS1res en LSS2res.



Figuur A.4.2 Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van de reservoirzones USS1res en USS2res.



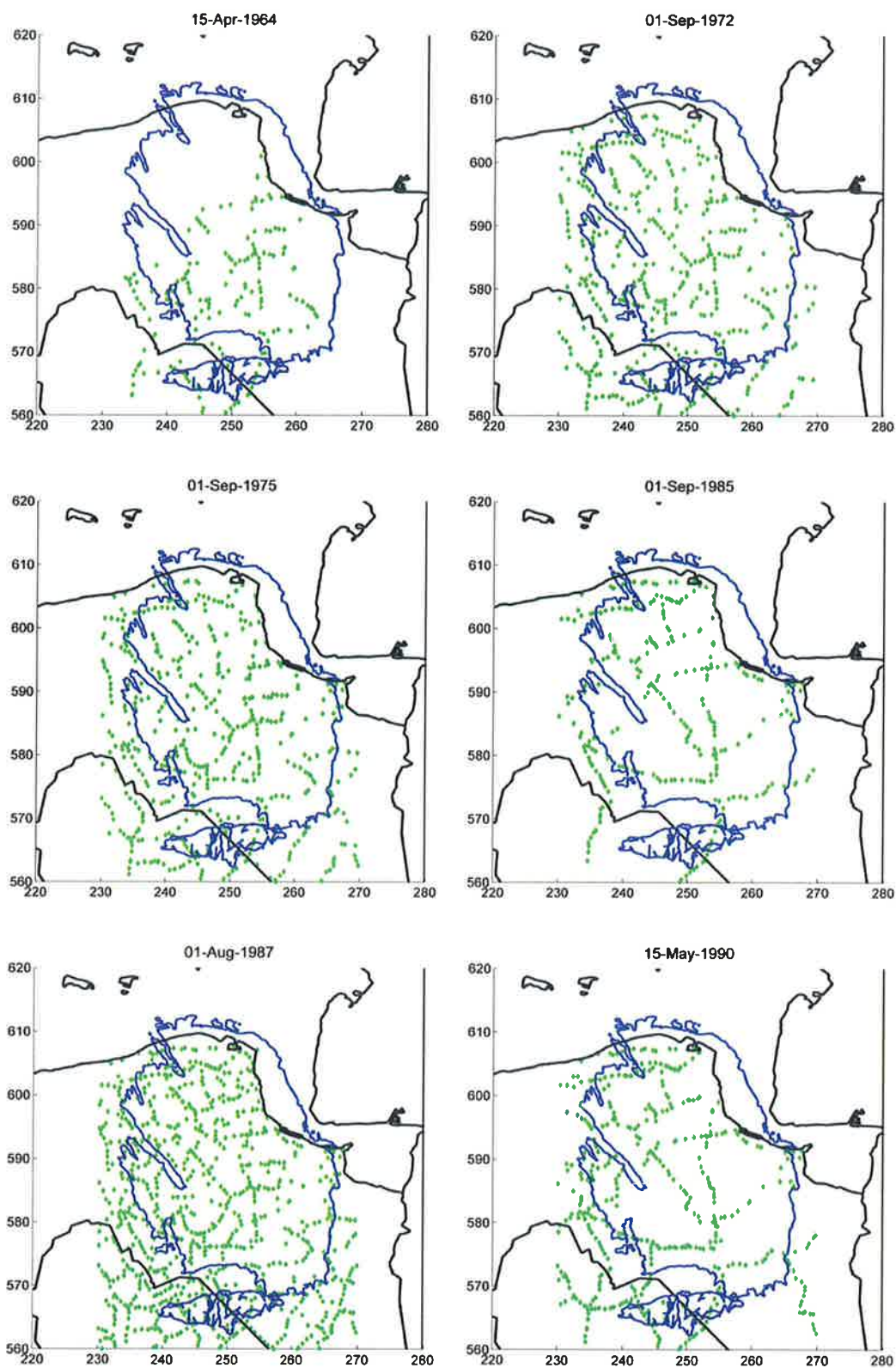
Figuur A.4.3 Faciesgrenzen op de porositeitstrendkaarten van de reservoirzone USS3res.



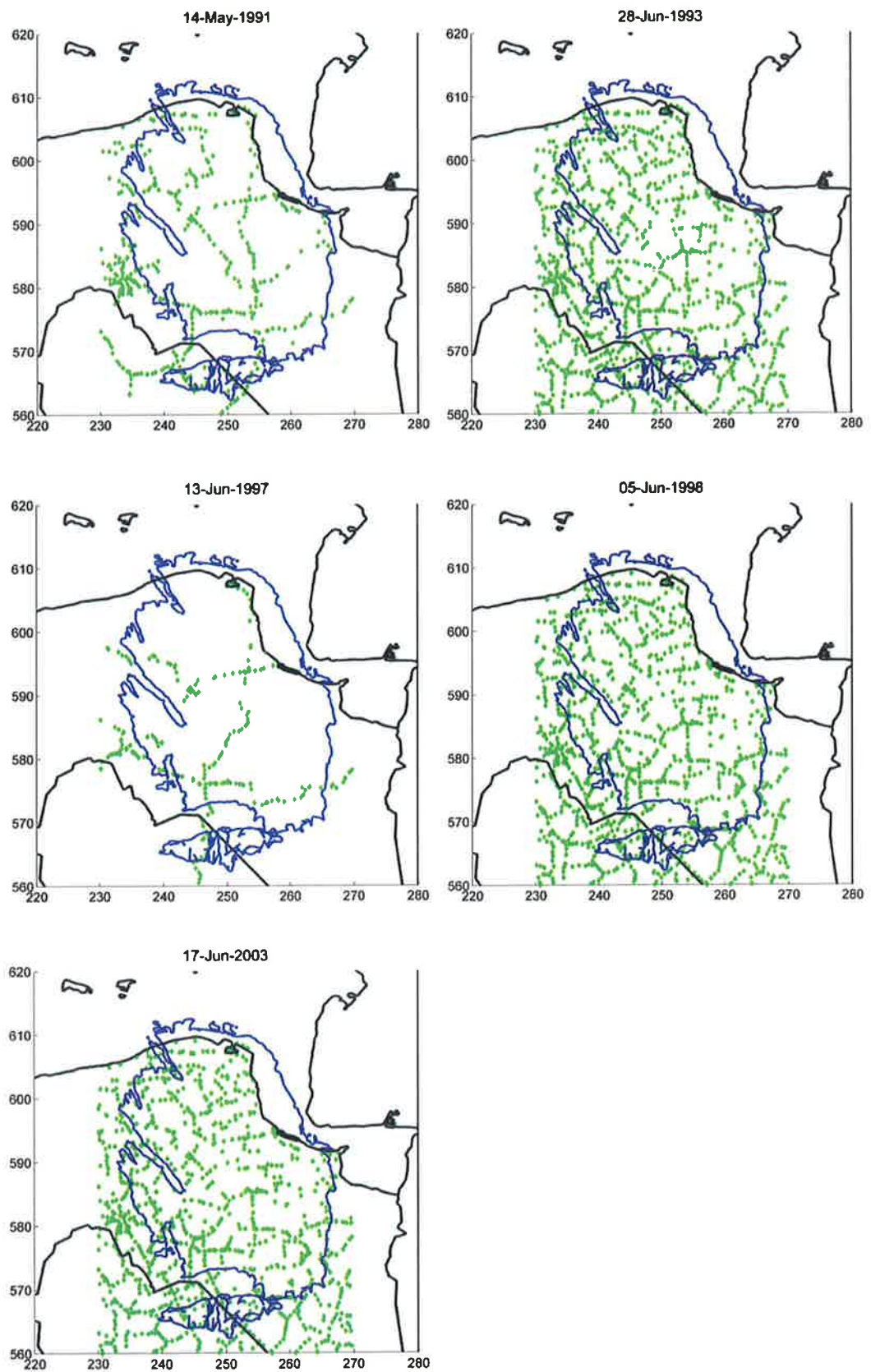
Figuur B.2: Overzicht van de mismatches in reservoirdruk van verschillende putten in het Groningen gasveld.

Appendix C

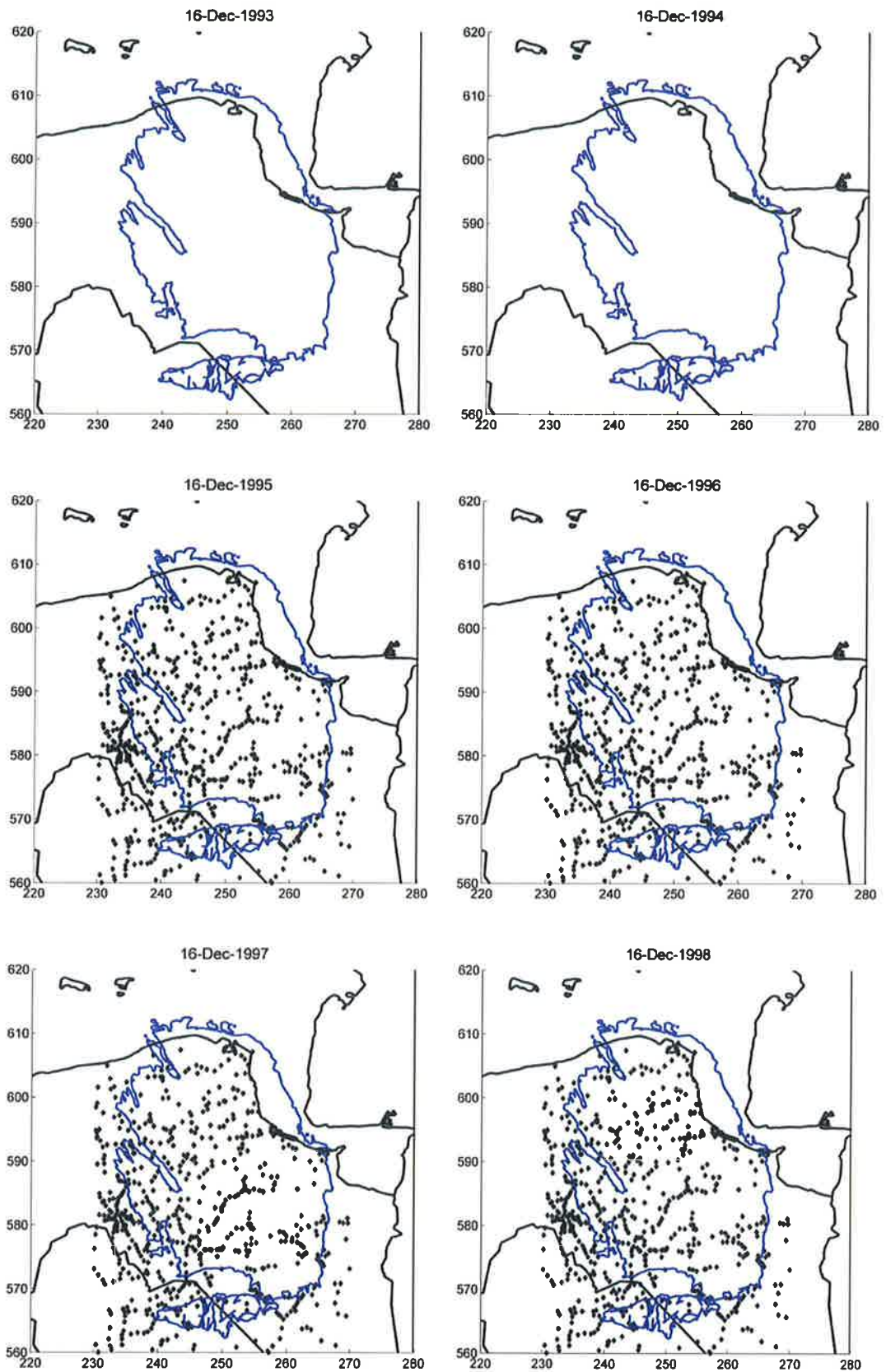
Appendix C.1: Primaire meetcampagnes door Rijkswaterstaat.



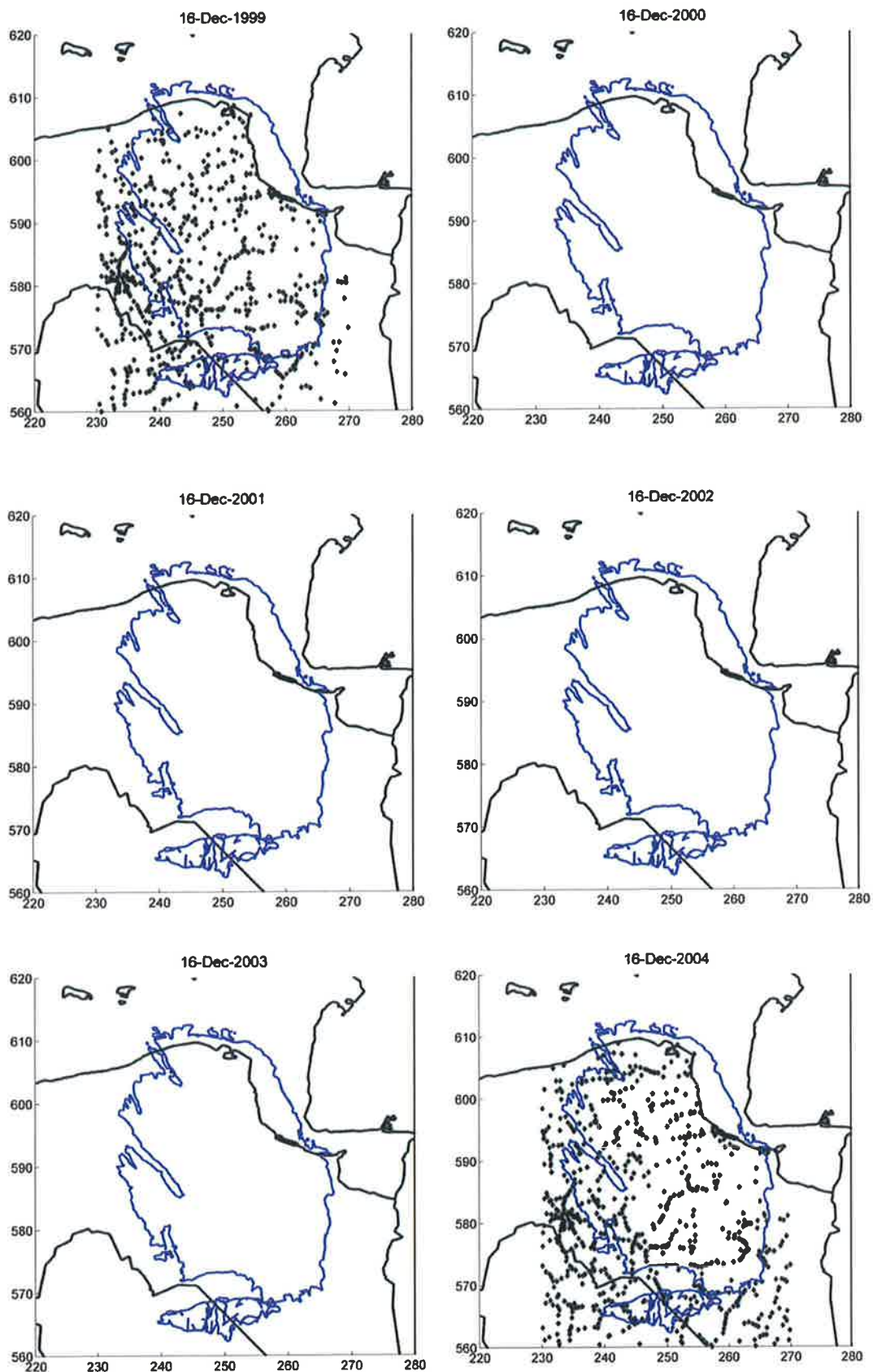
Figuur C.1.1 Primaire meetcampagnes door Rijkswaterstaat in 1964, 1972, 1975, 1985, 1987, 1990.



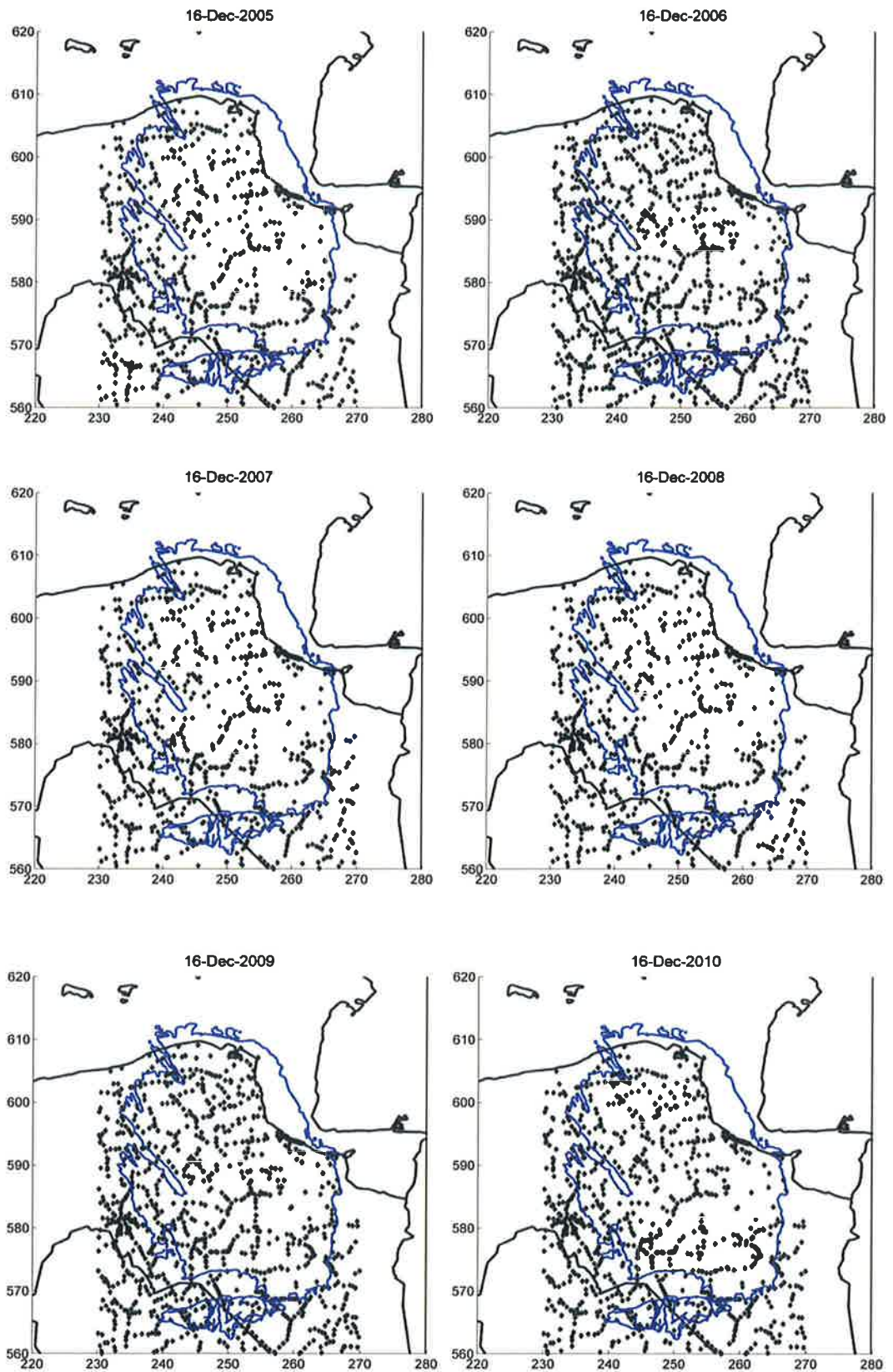
Figuur C.1.2 Primaire meetcampagnes door Rijkswaterstaat in 1991, 1993, 1997, 1998, 2003.

Appendix C.2: InSAR metingen in de differentiestaat van 1993-2011.

Figuur C.2.1 InSAR metingen in de differentiestaat van 1993-1998.



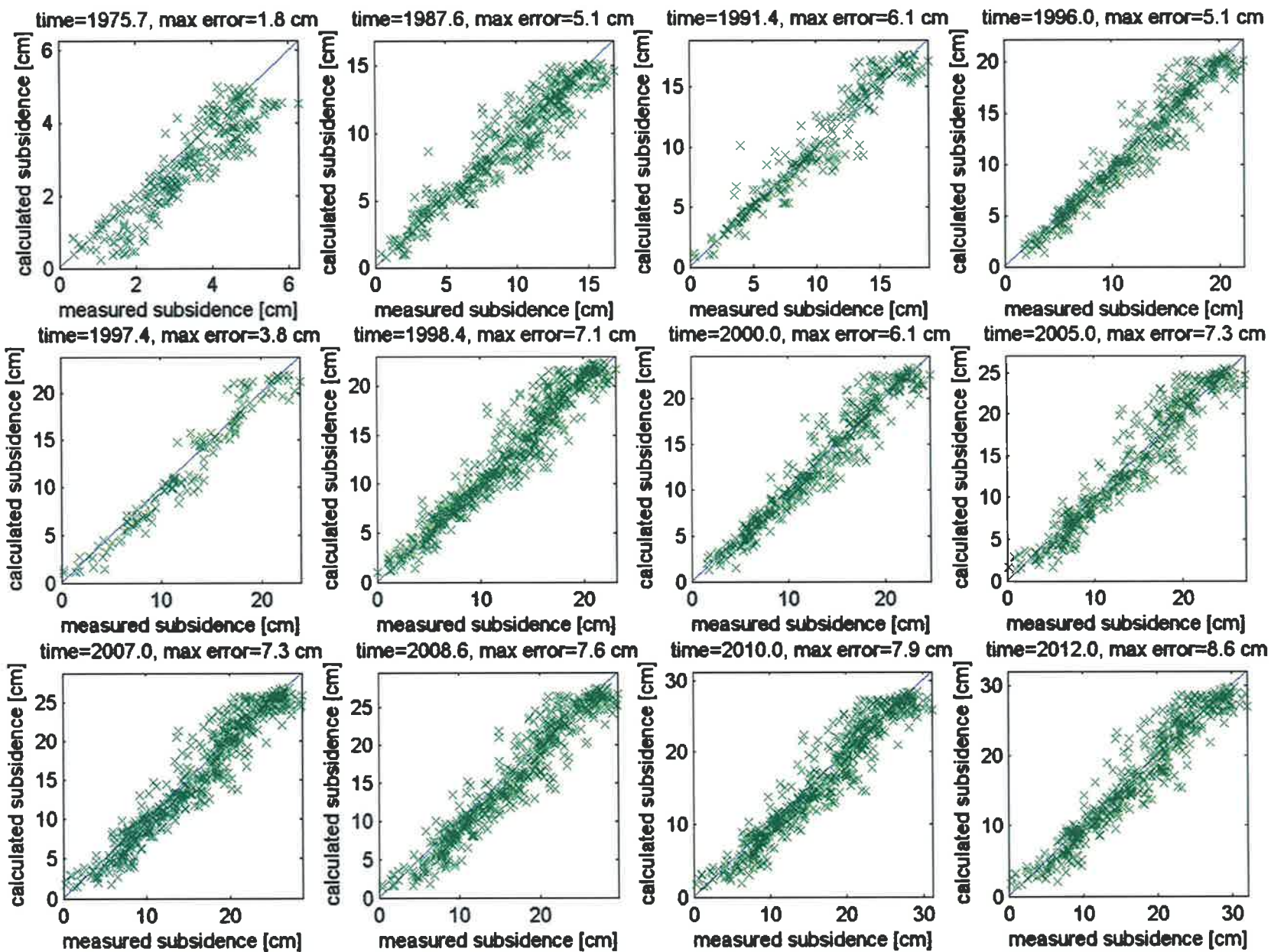
Figuur C.2.2 InSAR metingen in de differentiestaat van 1999-2004.



Figuur C.2.3 InSAR metingen in de differentiestaat van 2005-2010.

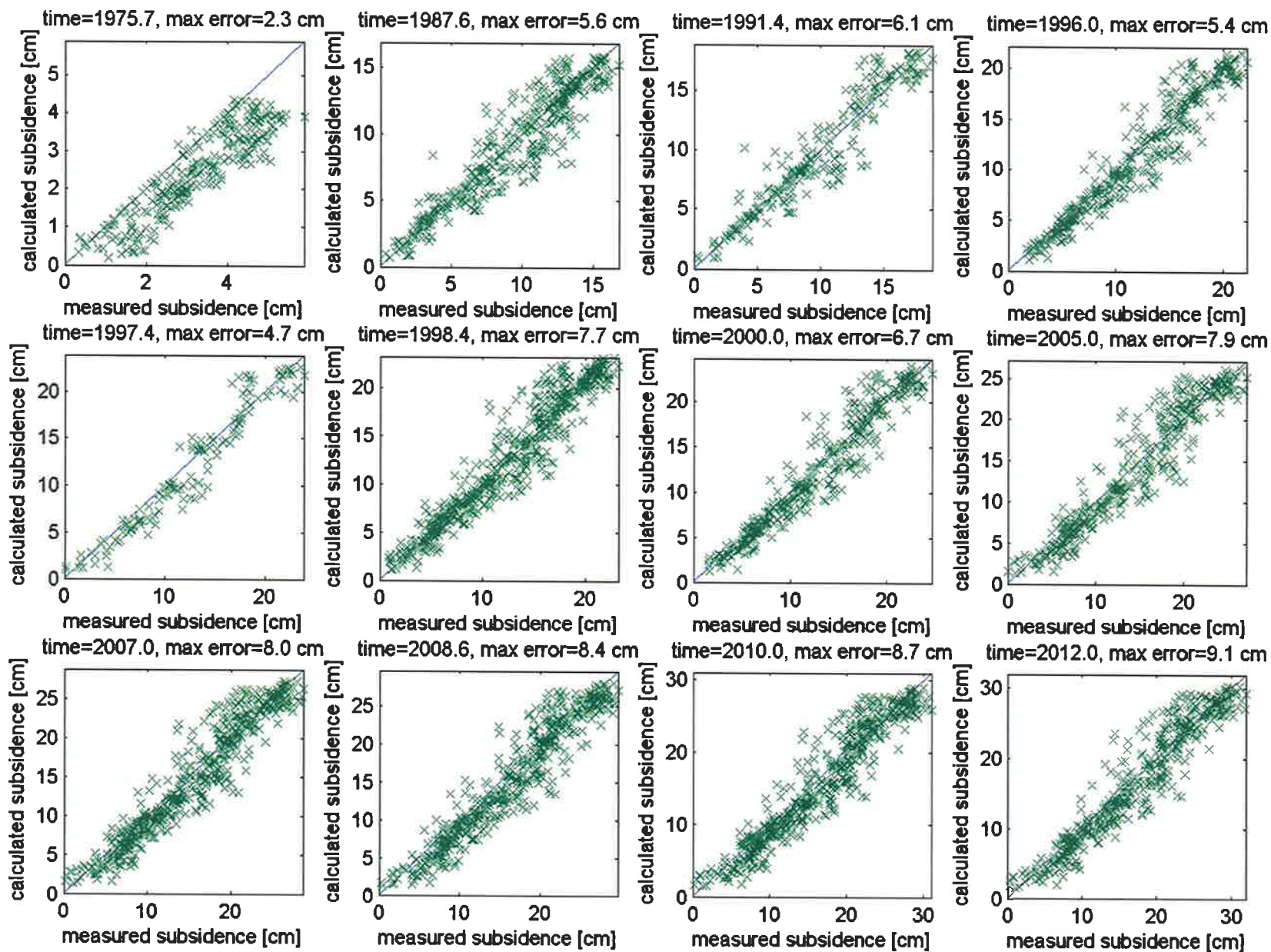
Appendix D

Appendix D.1: Gemeten versus berekende bodemdaling

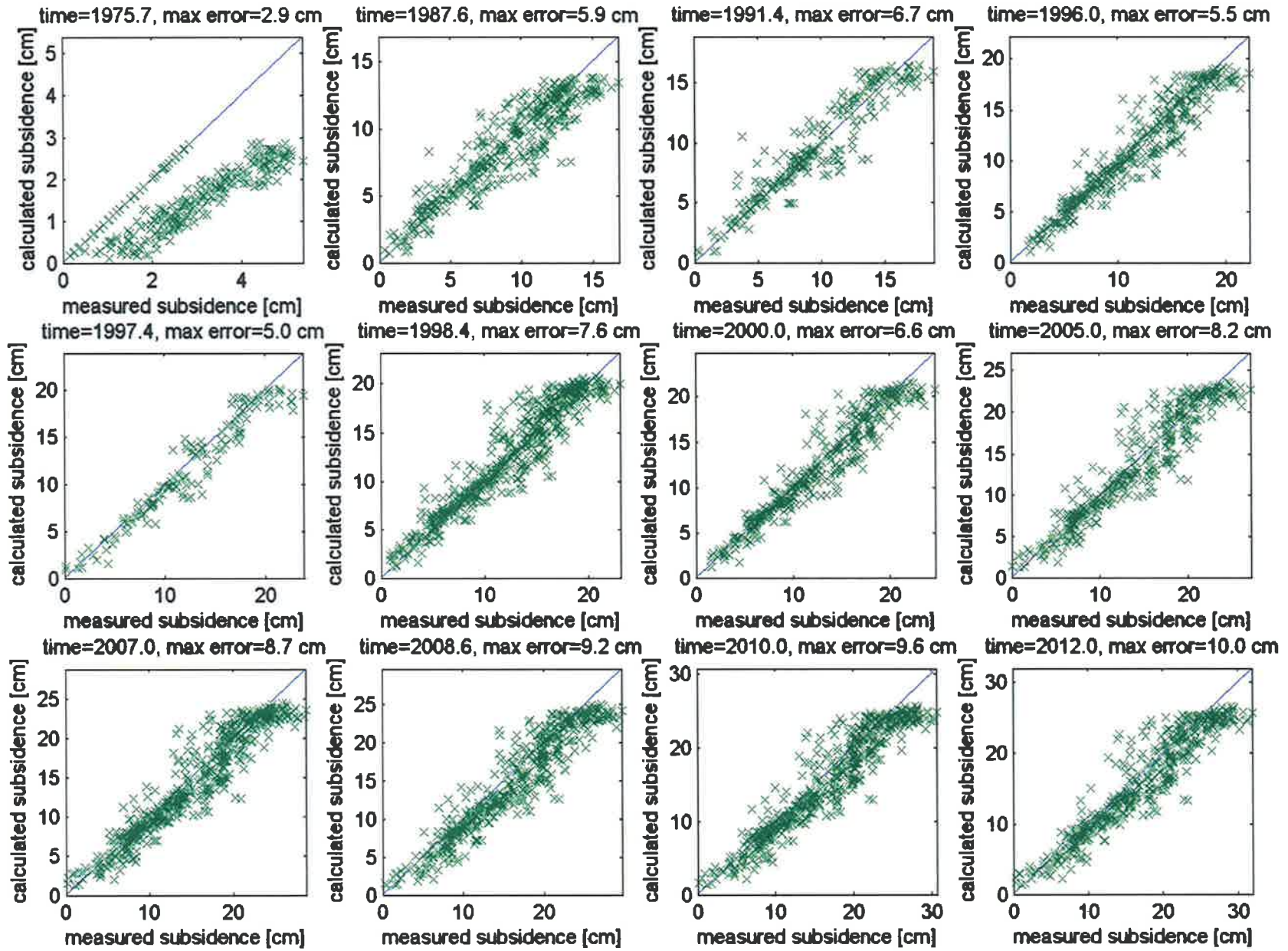


Figuur D.1.1 Gemeten versus berekende bodemdaling voor het RTCM model.

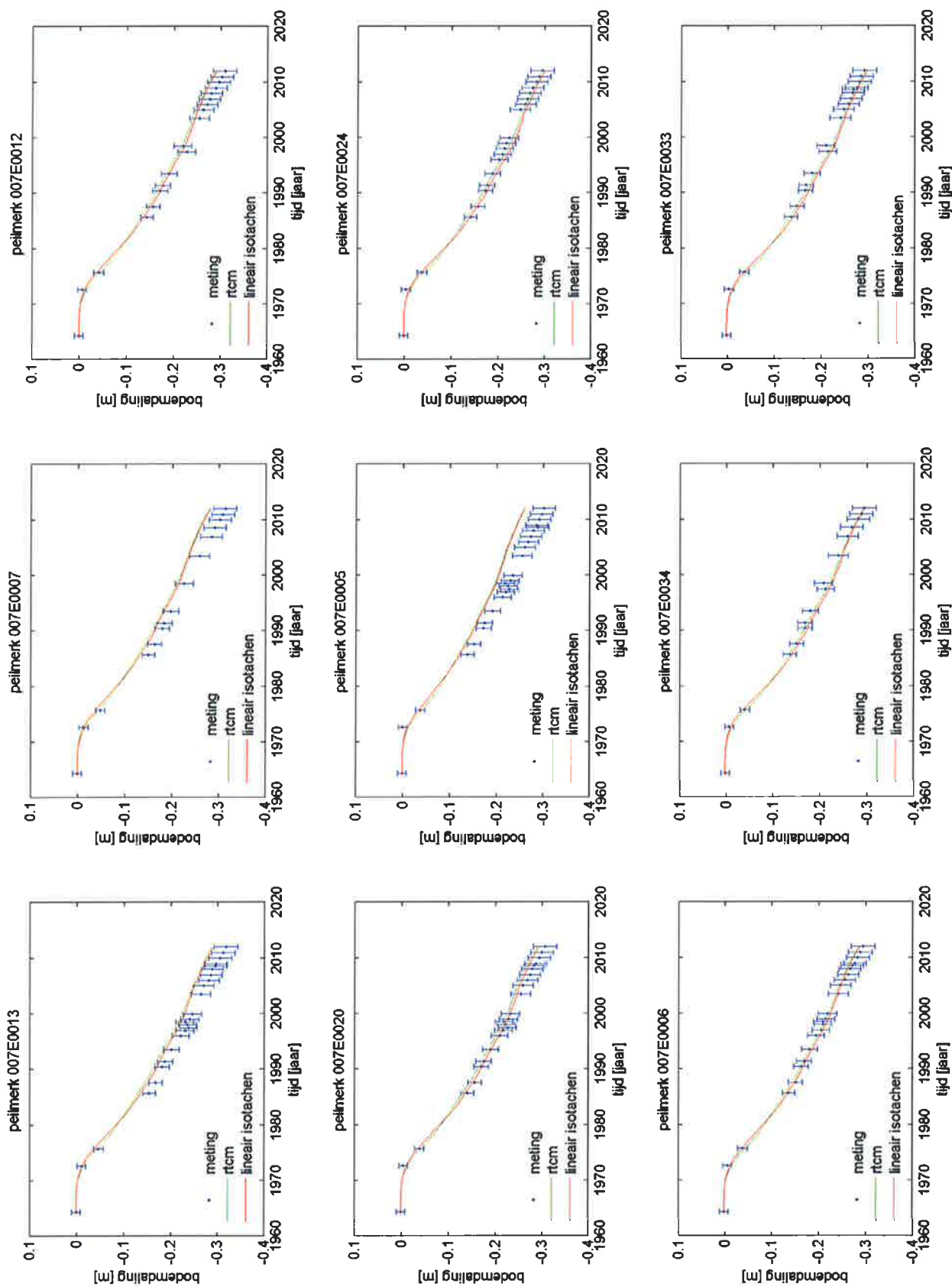
Figuur D.1.2 Gemeten versus berekende bodemdaling voor het lineair isotachien model.



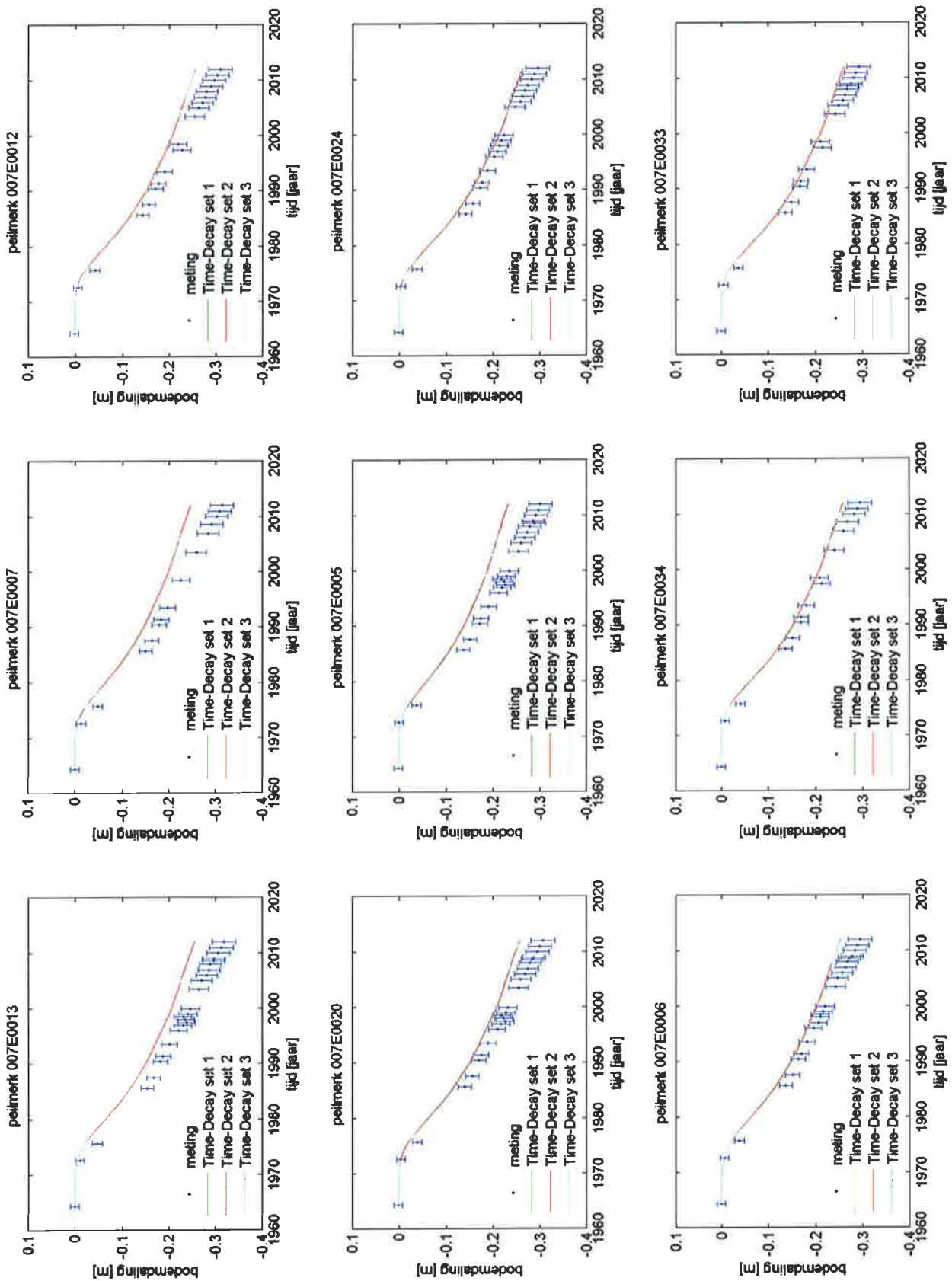
Figuur D.1.3 Gemeten versus berekende bodemdaling voor het Time-Decay model.



Appendix D.2: Maximale bodemdaling

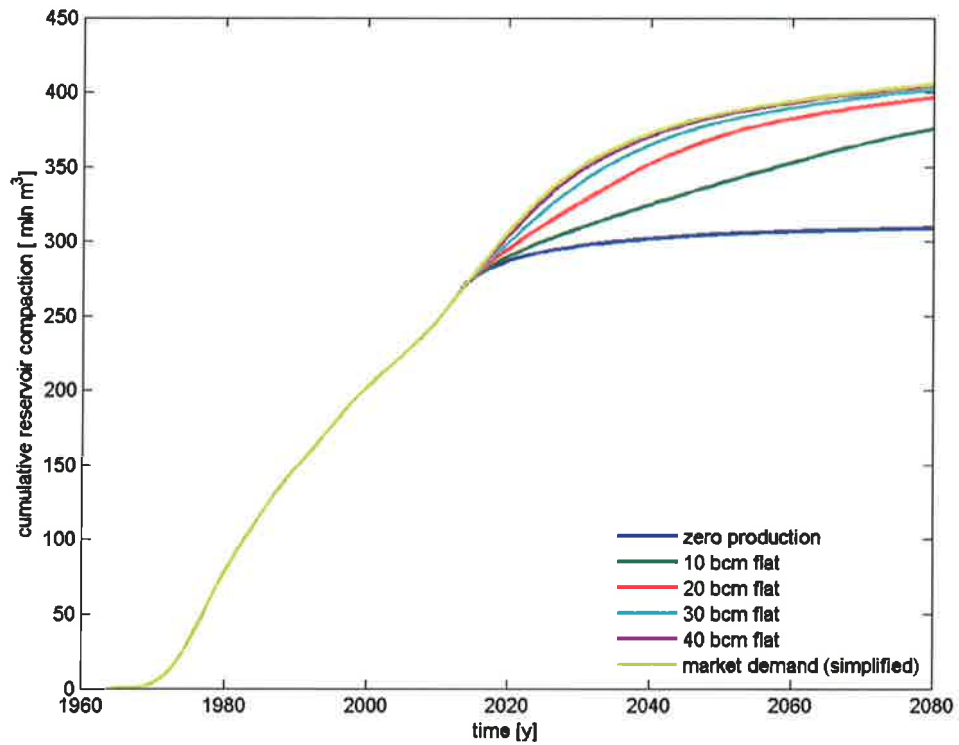


Figuur D.2.1 Maximale bodemdaling met het beste RTCM model en lineair isotachenmodel.

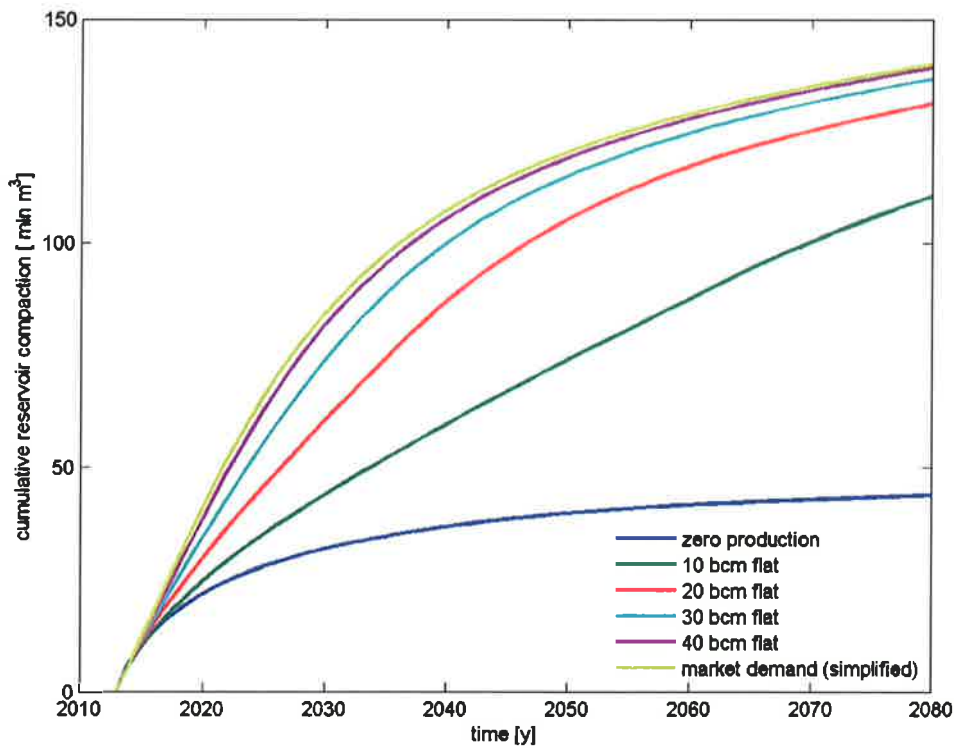


Figuur D.2.2 Maximale bodemdaling met het Time-Decay model en drie beste parameter sets.

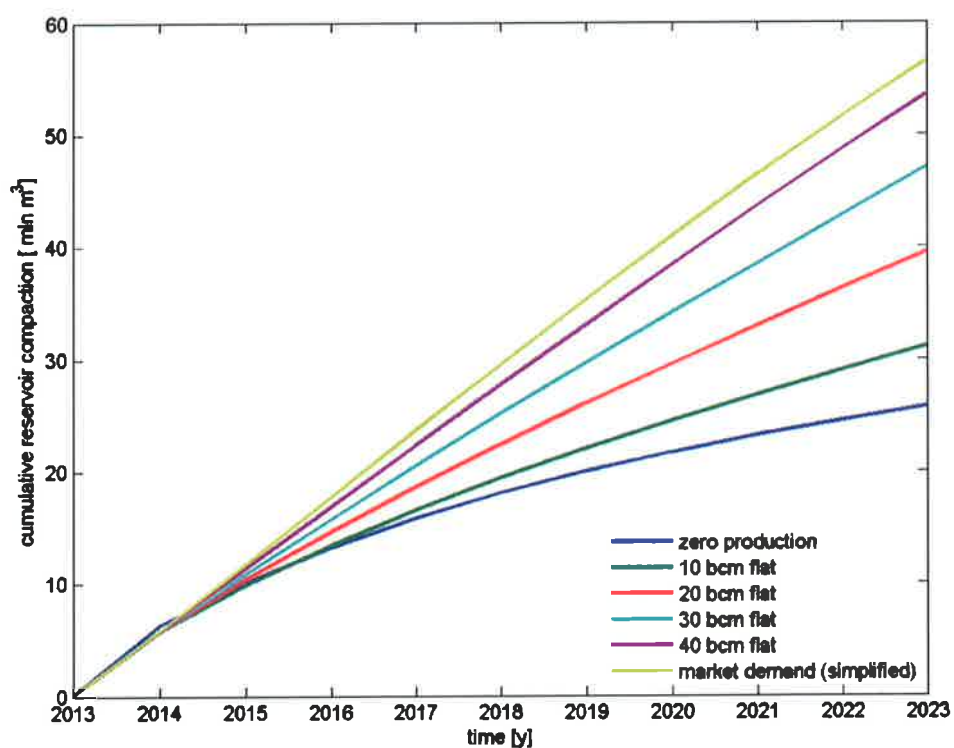
Appendix D.3: Cumulatieve compactie met het RTCM model



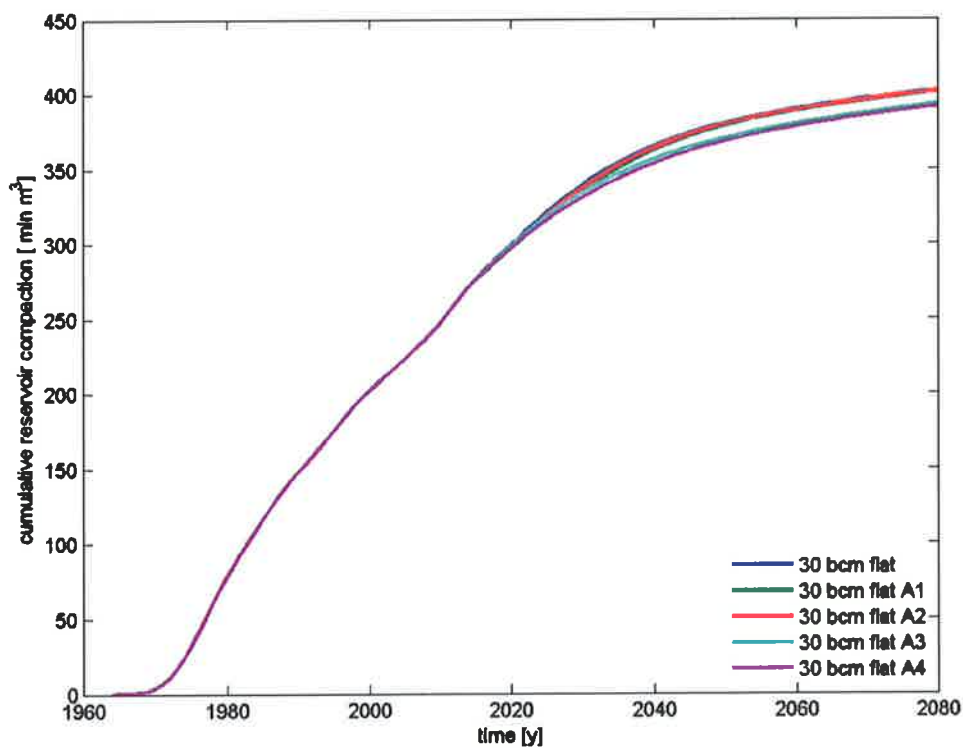
Figuur D.3.1 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model.



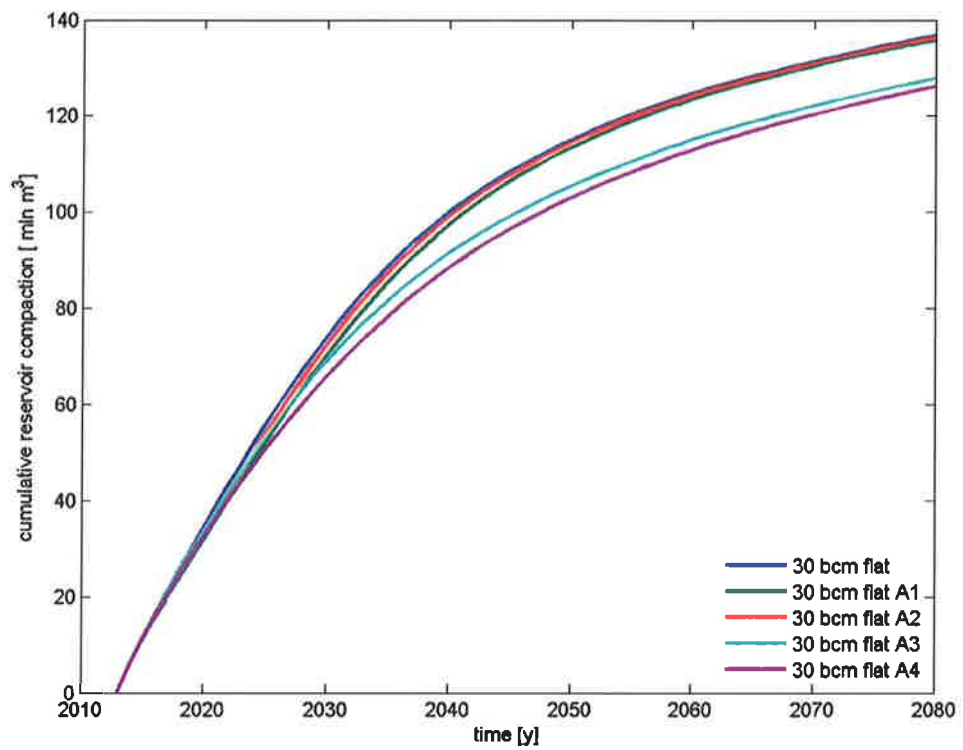
Figuur D.3.2 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model.



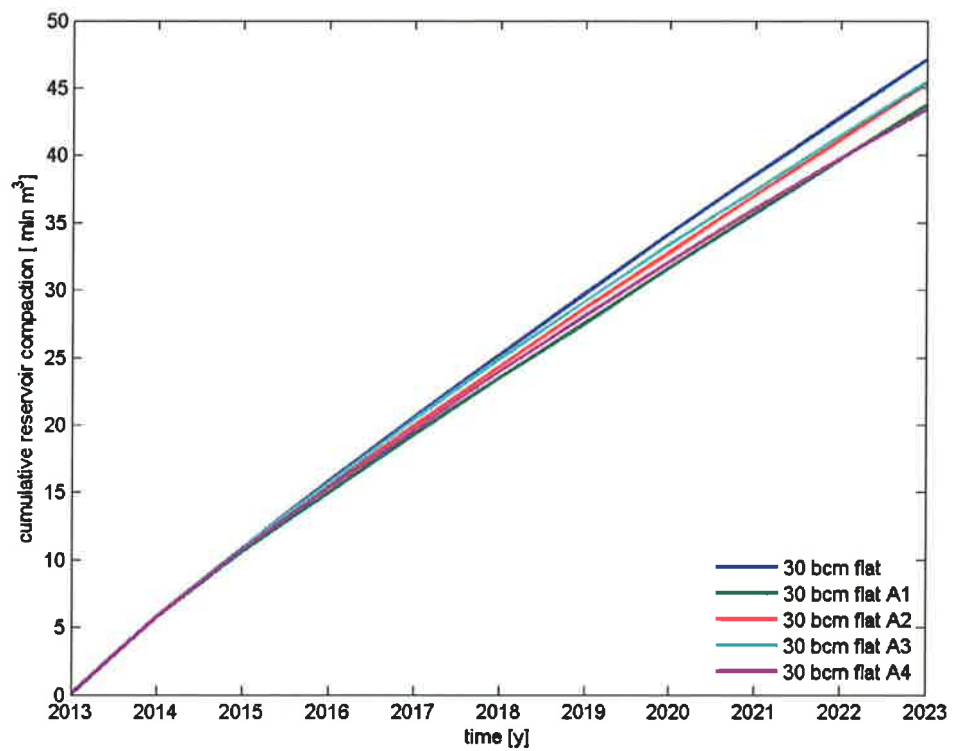
Figuur D.3.3 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het RTCM model.



Figuur D.3.4 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de gehele periode met het RTCM model.

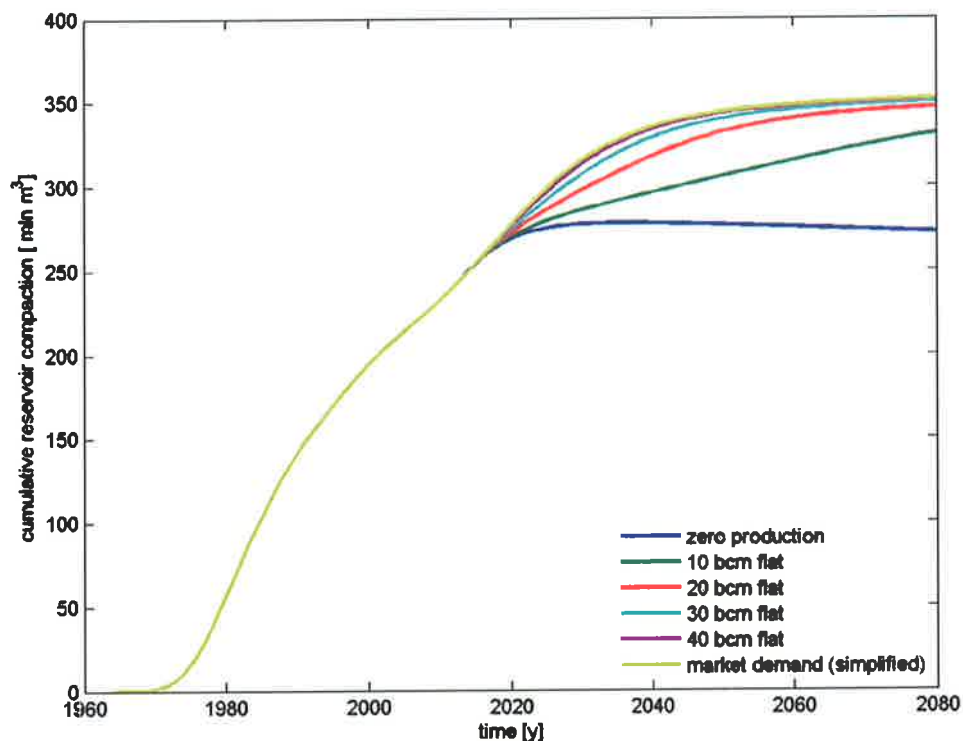


Figuur D.3.5 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model.

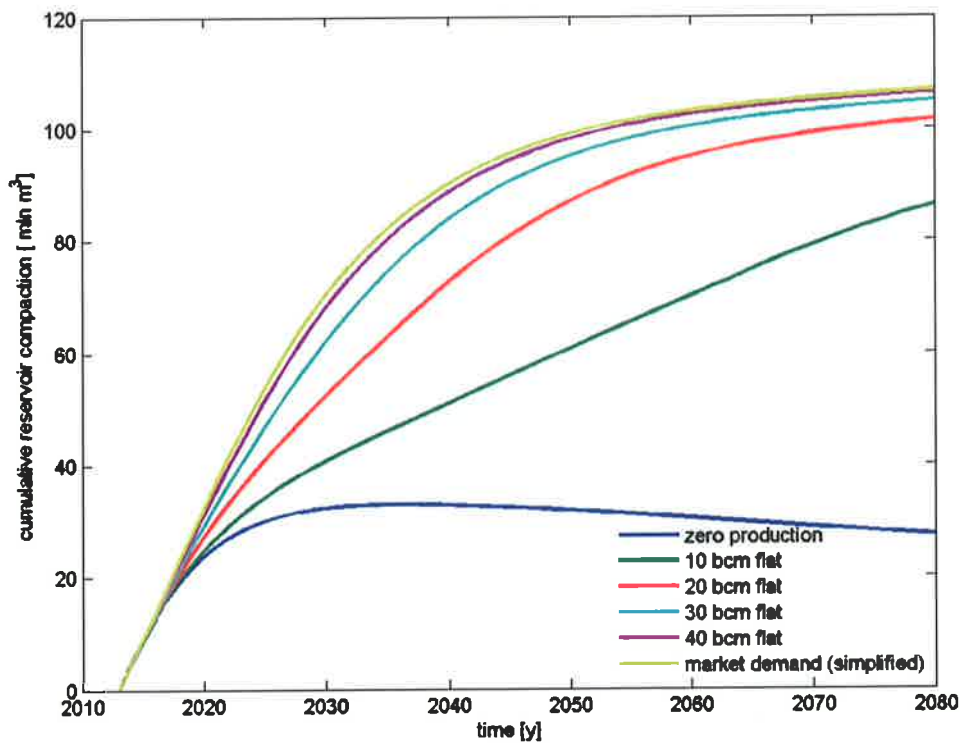


Figuur D.3.6 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het RTCM model.

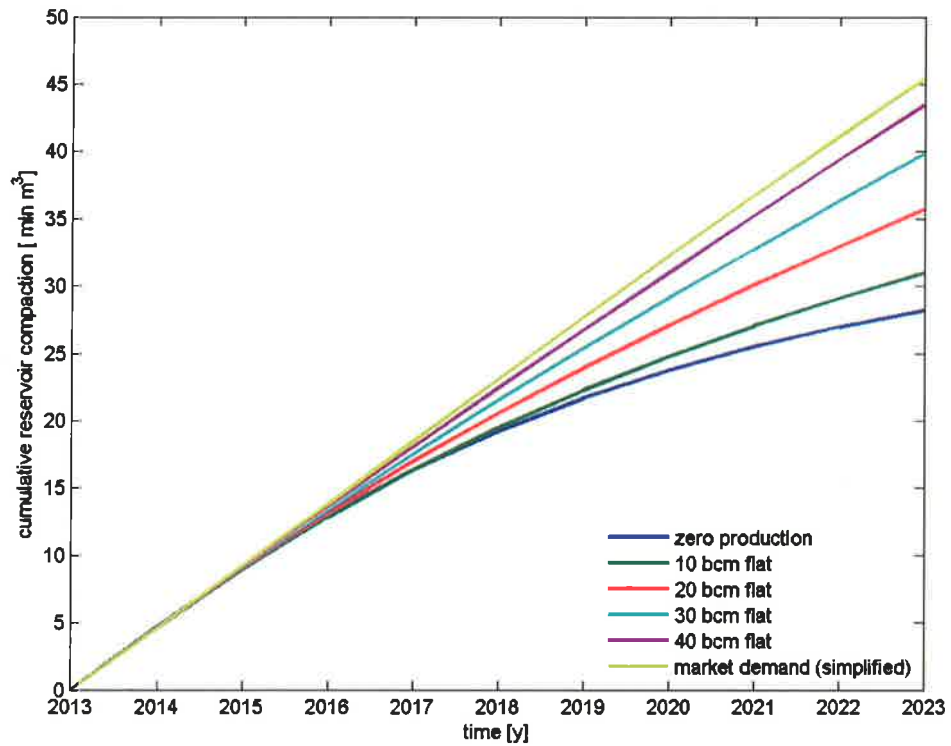
Appendix D.4: Cumulatieve compactie met het Time-Decay model



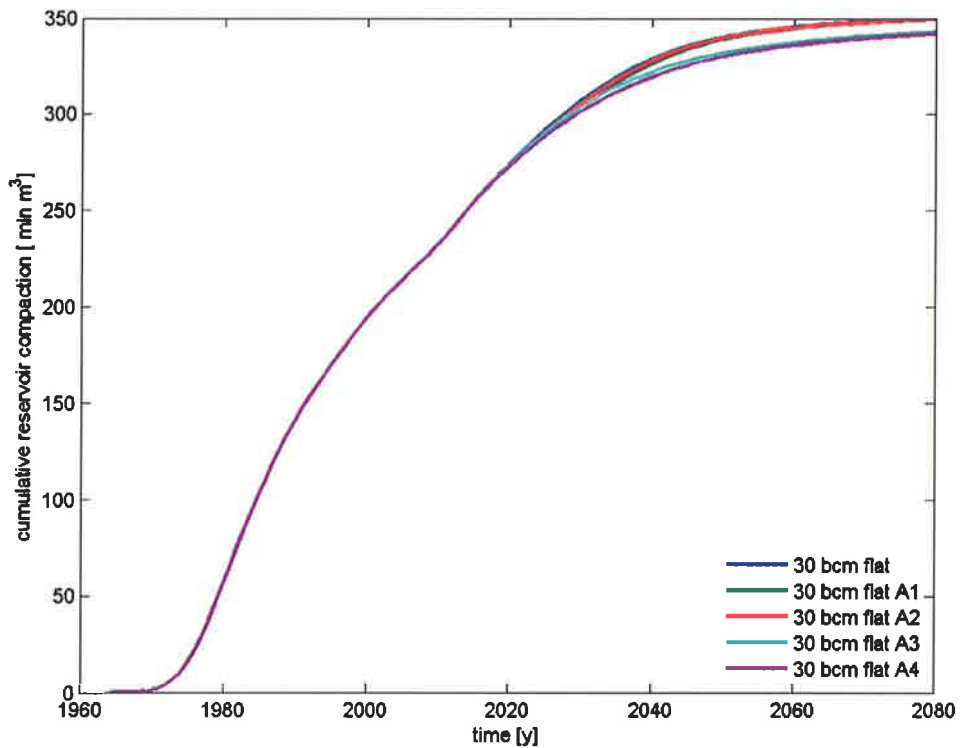
Figuur D.4.1 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het Time-Decay model.



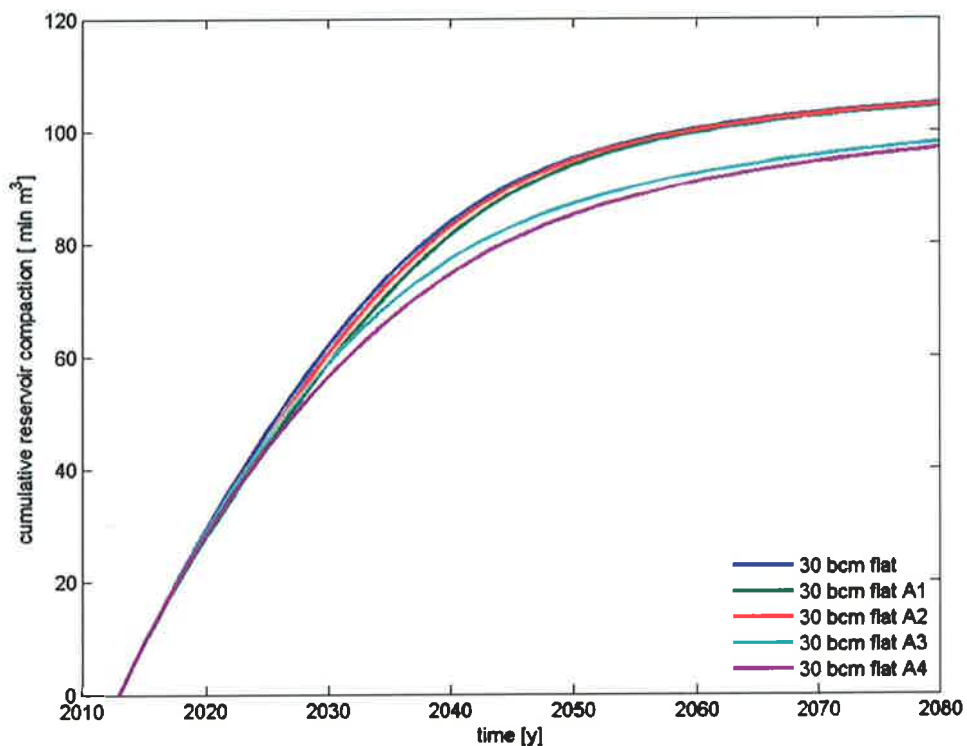
Figuur D.4.2 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 met het Time-Decay model.



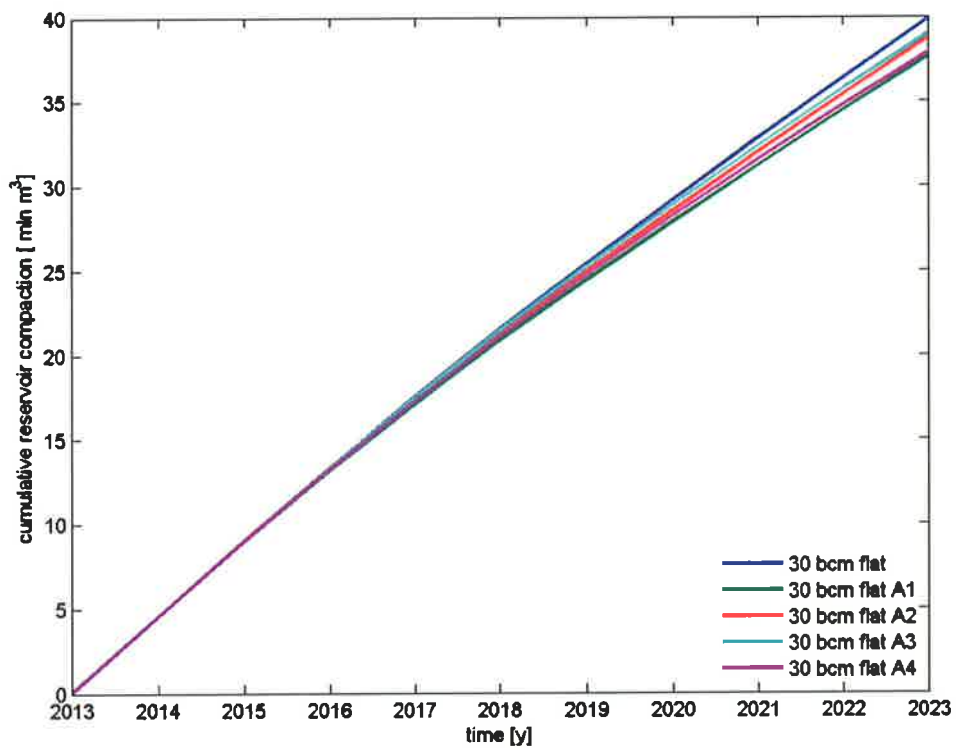
Figuur D.4.3 Cumulatieve compactie voor de verschillende scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het Time-Decay model.



Figuur D.4.4 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de gehele periode met het Time-Decay model.

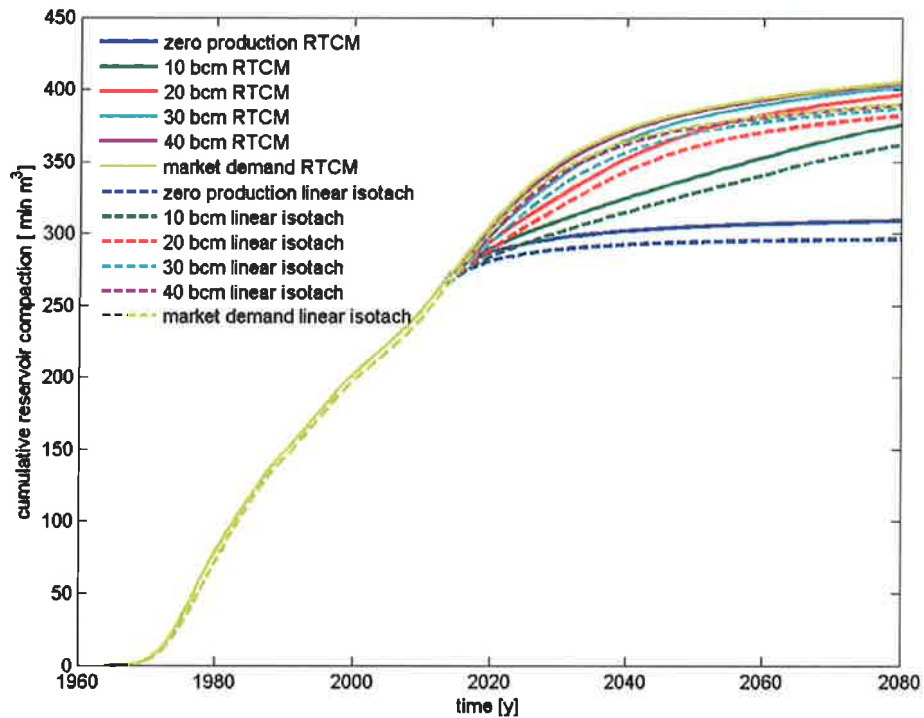


Figuur D.4.5 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 met het Time-Decay model.

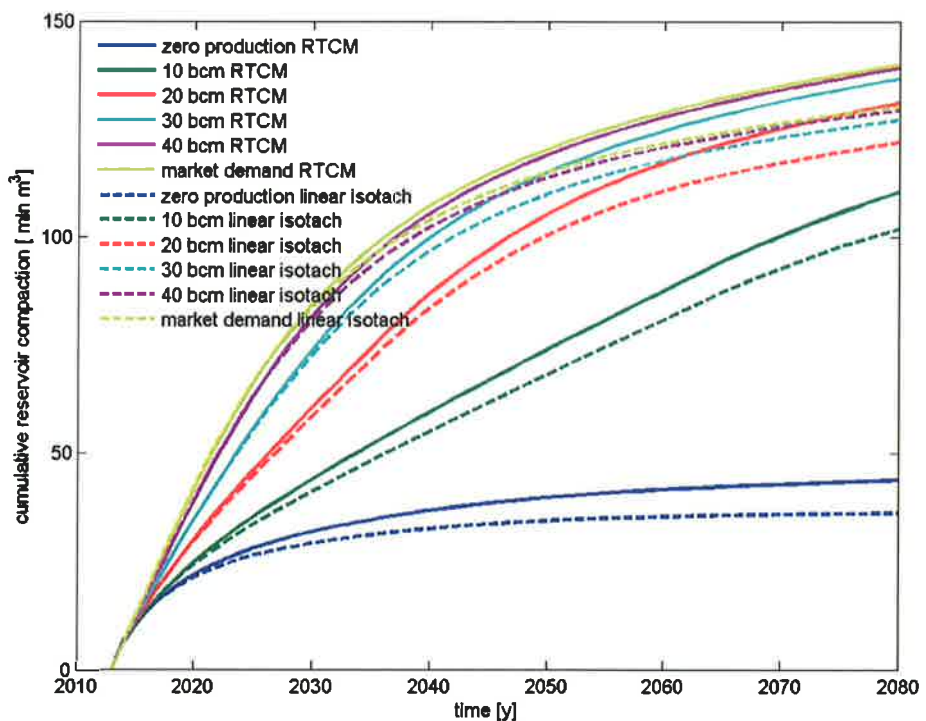


Figuur D.4.6 Cumulatieve compactie voor de alternatieve 30 BCM scenario's voor de periode vanaf 2013 tot en met 2023 met het Time-Decay model.

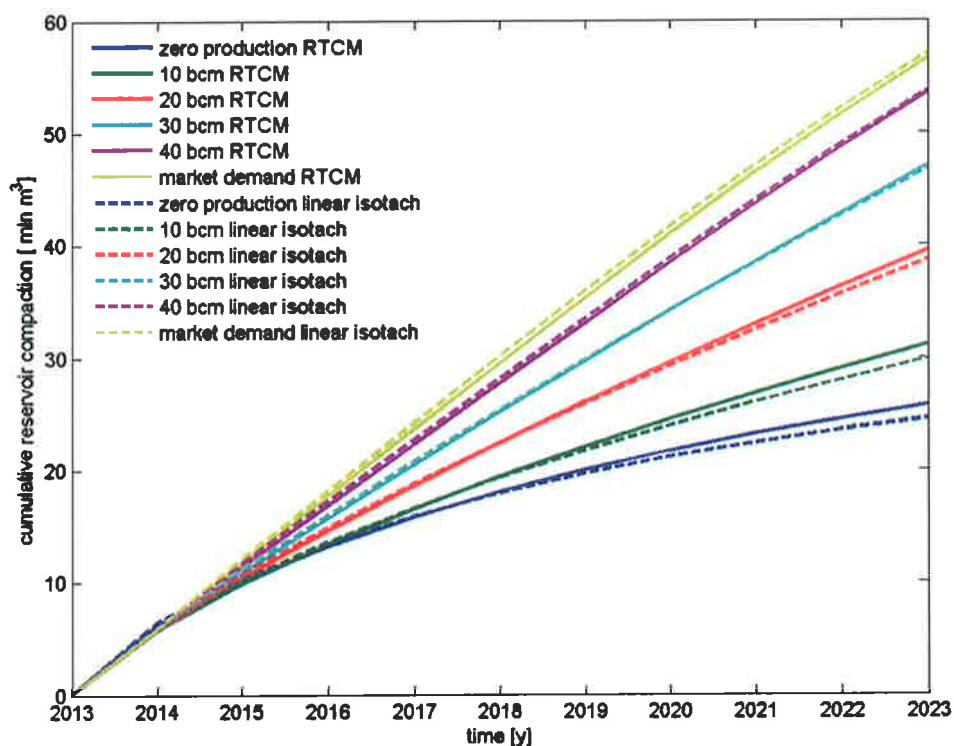
Appendix D.5: Cumulatieve compactieverschillen tussen het RTCM model en het gelineariseerd isotachenmodel, en tussen het RTCM model en het Time-Decay model



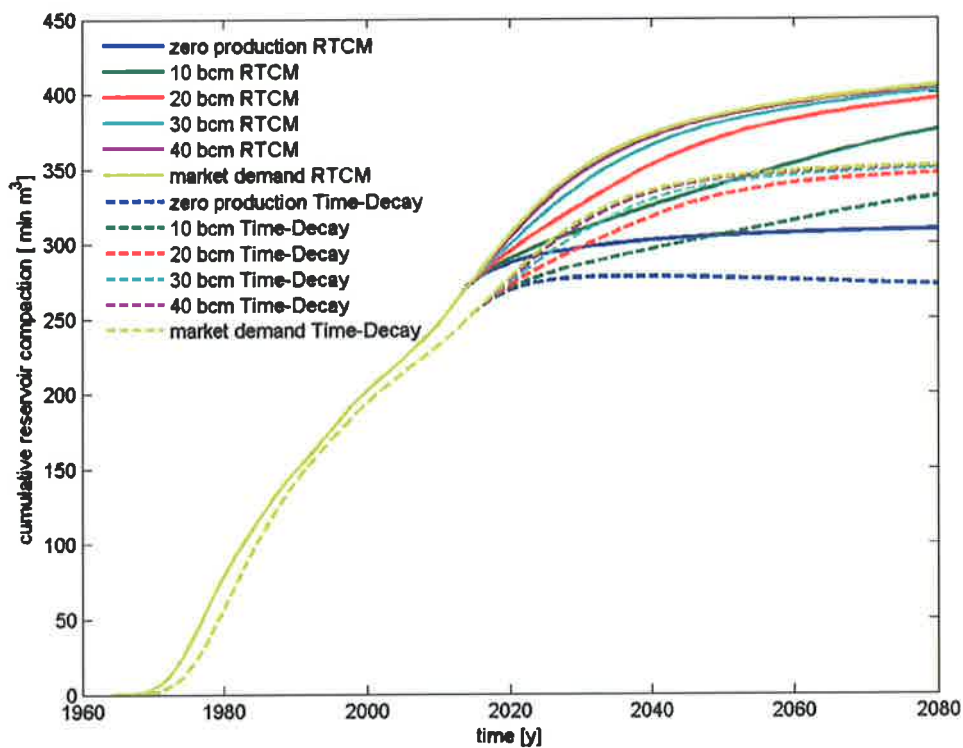
Figuur D.5.1 Cumulatieve compactie voor de gehele periode met het RTCM model en het lineair isotach model.



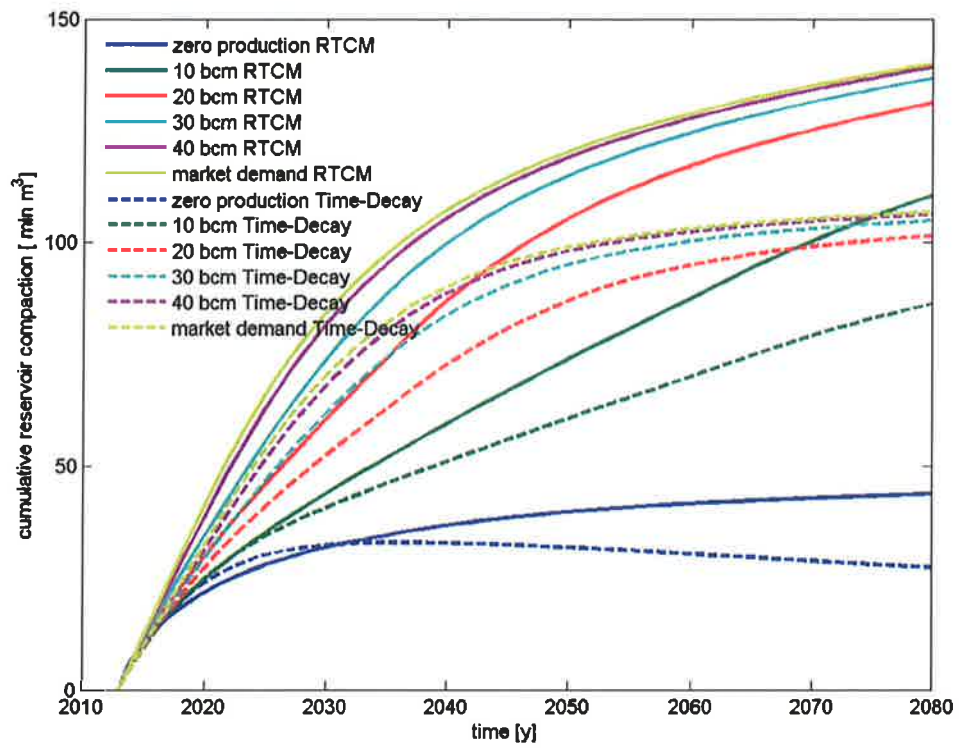
Figuur D.5.2 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model en het lineair isotach model.



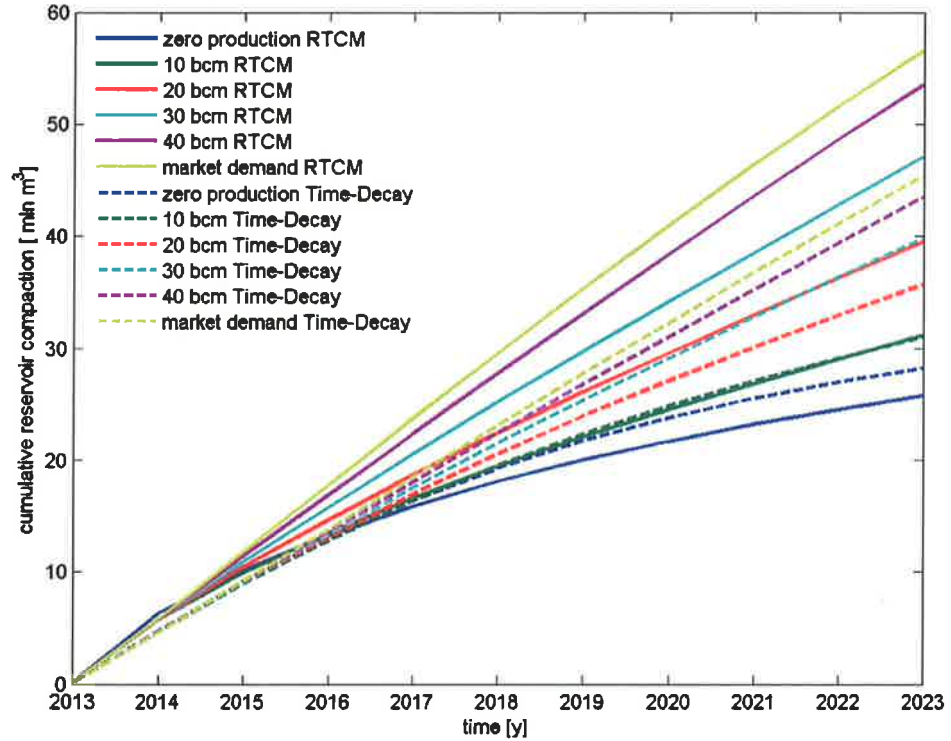
Figuur D.5.3 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het lineair isotach model.



Figuur D.5.4 Cumulatieve compactie voor de gehele periode met het RTCM model en het Time-Decay model.

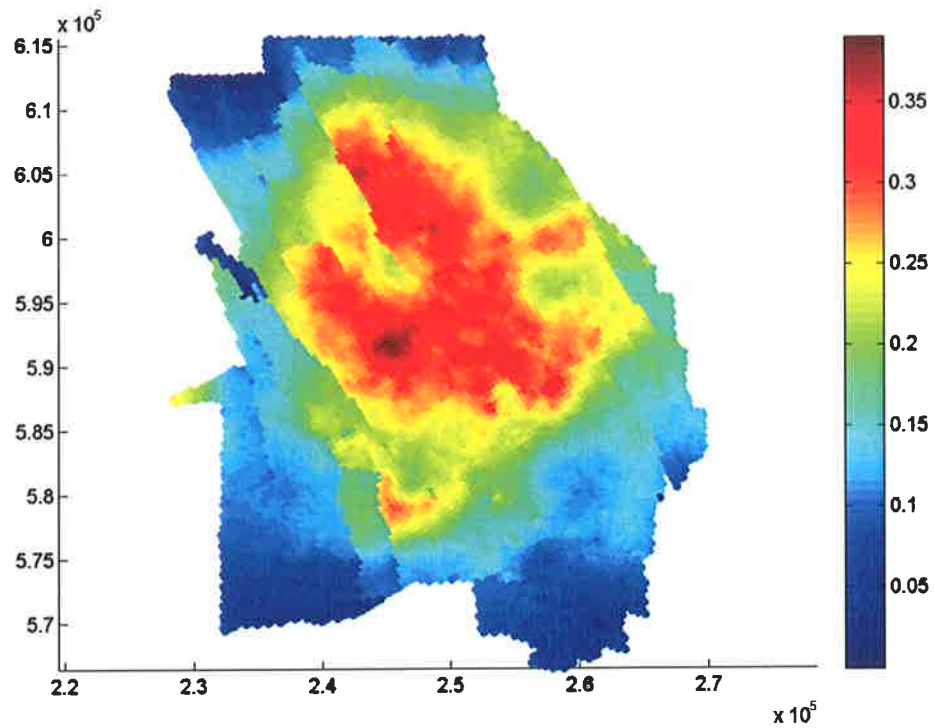


Figuur D.5.5 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 met het RTCM model en het Time-Decay model.

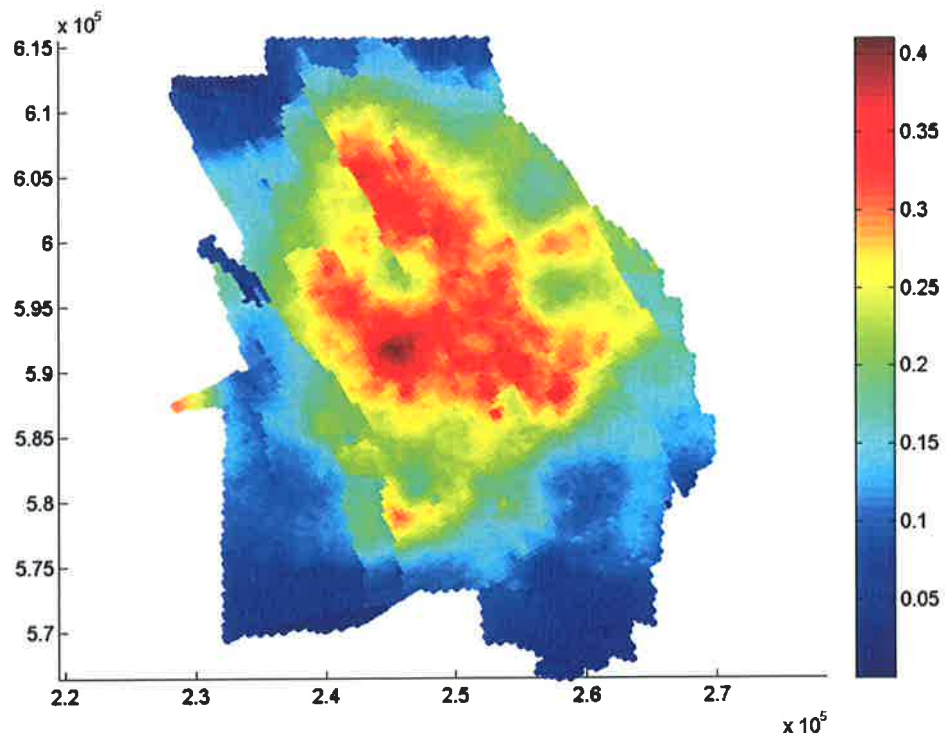


Figuur D.5.6 Cumulatieve compactie voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model en het Time-Decay model.

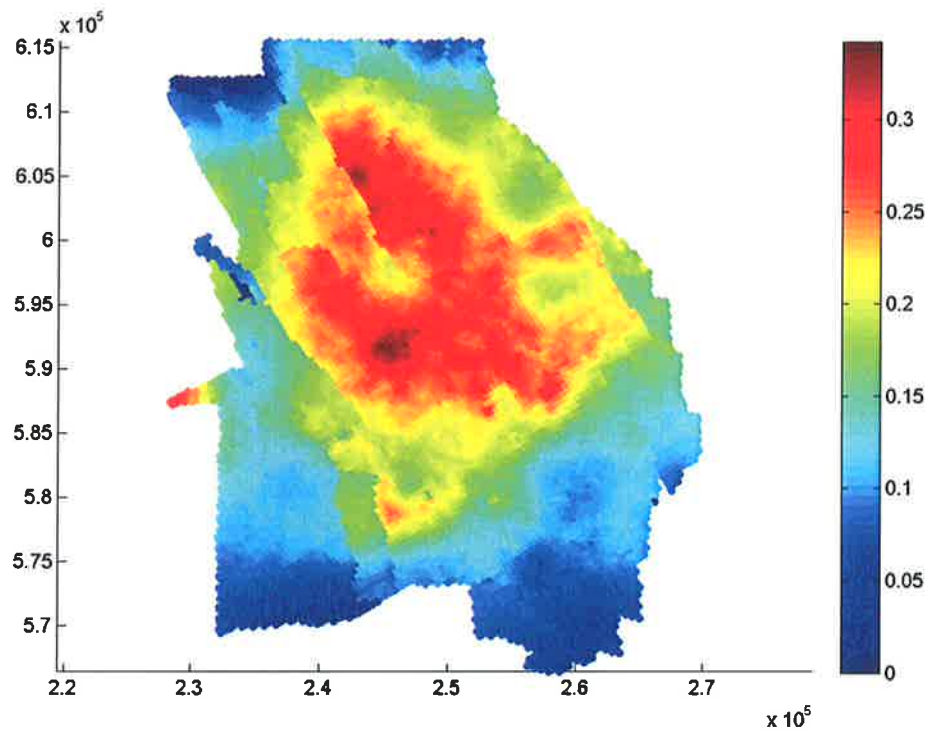
Appendix D.6: Cumulatieve compactiekaarten in 2013



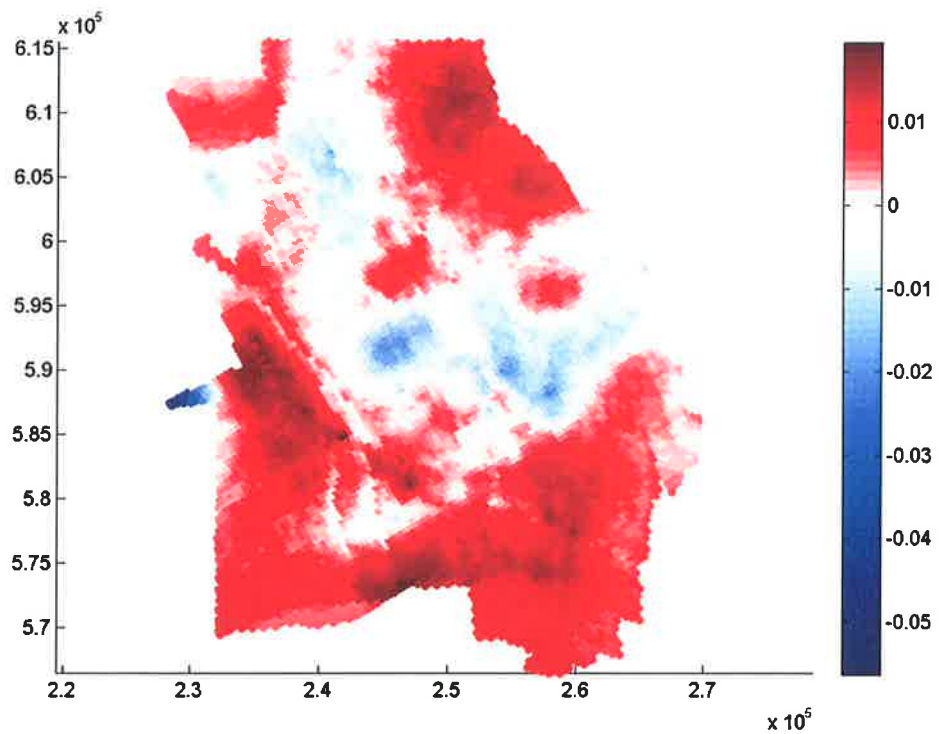
Figuur D.6.1 Cumulatieve compactie in meters eind 2013 met het RTCM model.



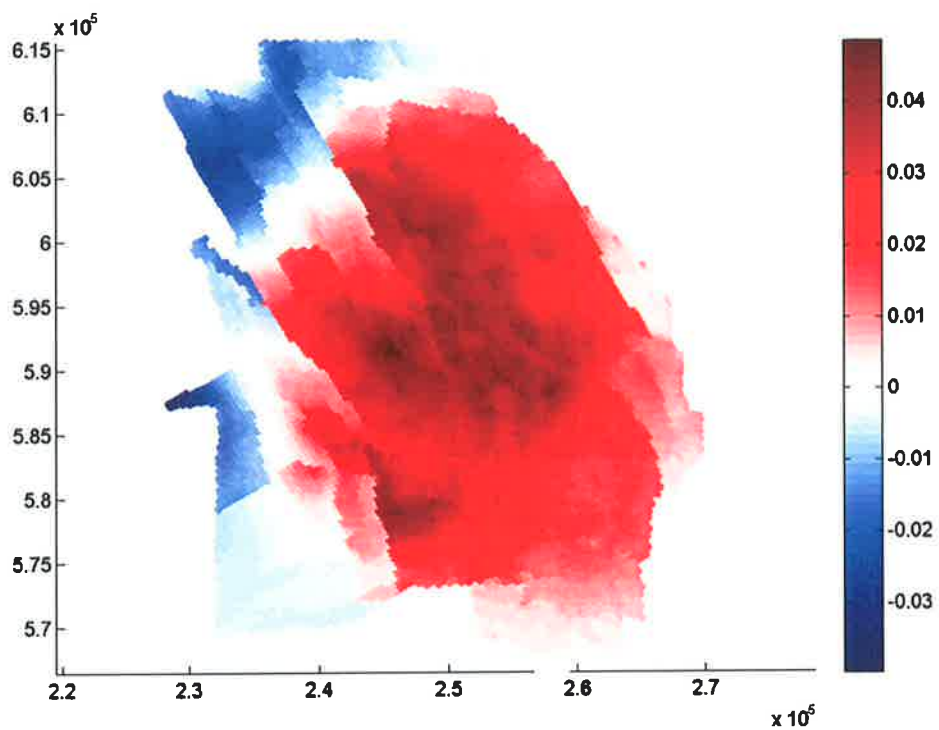
Figuur D.6.2 Cumulatieve compactie in meters eind 2013 met het lineair isotachen model.



Figuur D.6.3 Cumulatieve compactie in meters eind 2013 met het Time-Decay model.

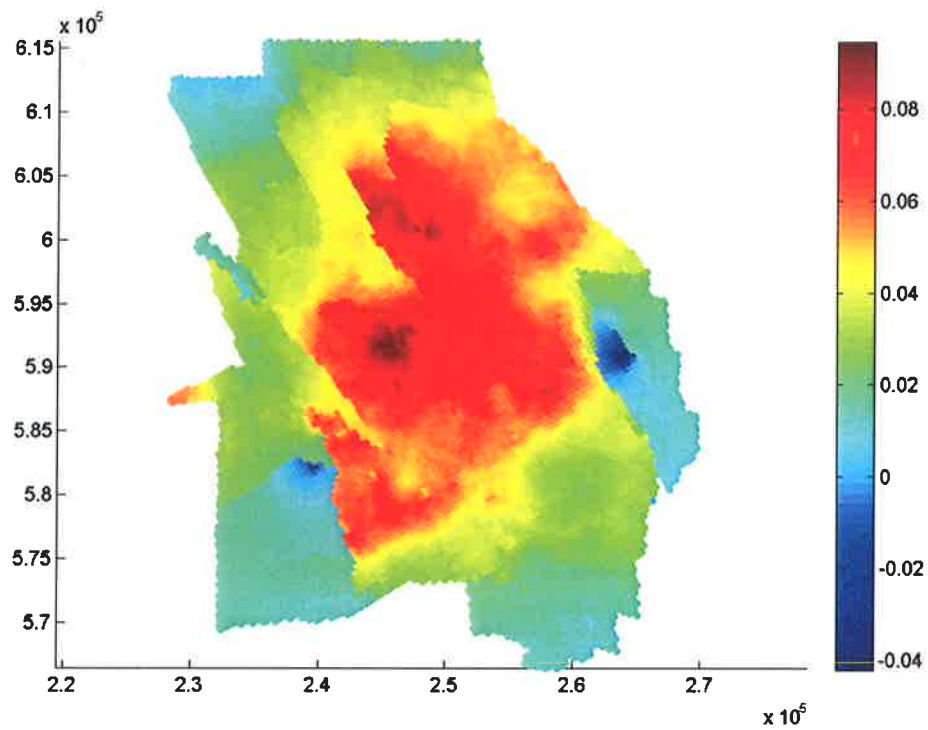


Figuur D.6.4 Verschil in compactie in 2013, in meters, tussen het RTCM model en het lineair isotachen model in meters. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

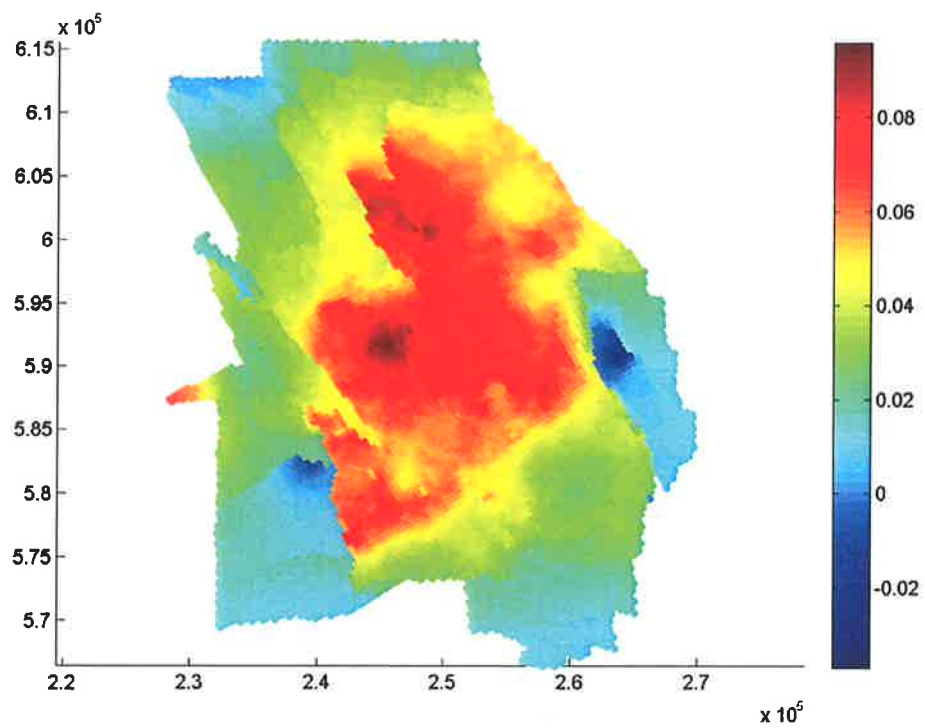


Figuur D.6.5 Verschil in compactie in 2013, in meters, tussen het RTCM model en het Time-Decay model in meters. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

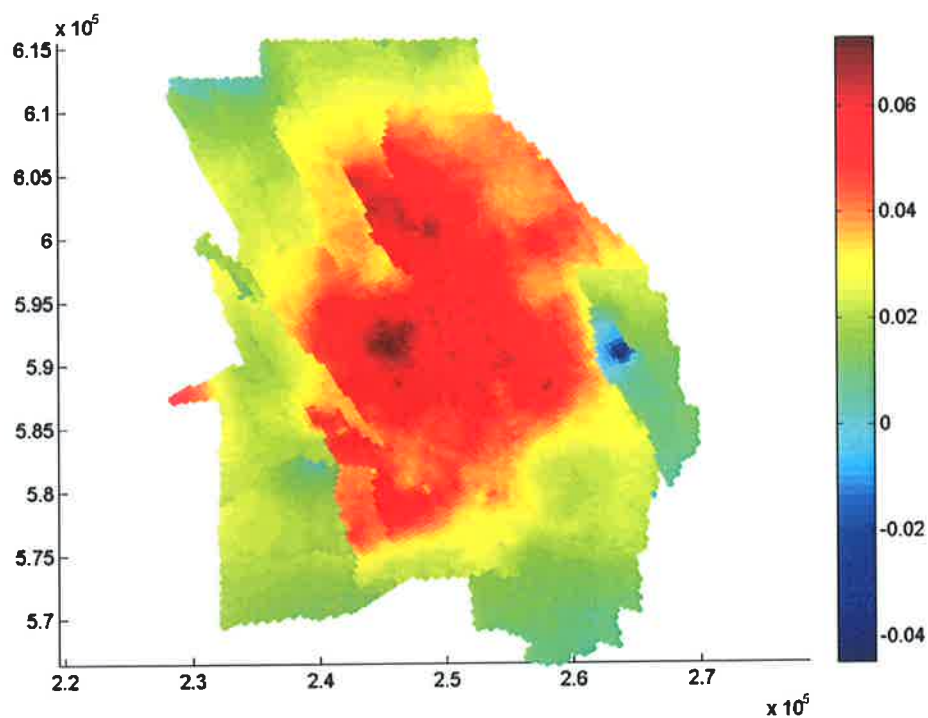
Appendix D.7: Compactiekaarten, prognose 2013-2023 voor het marktvaag scenario



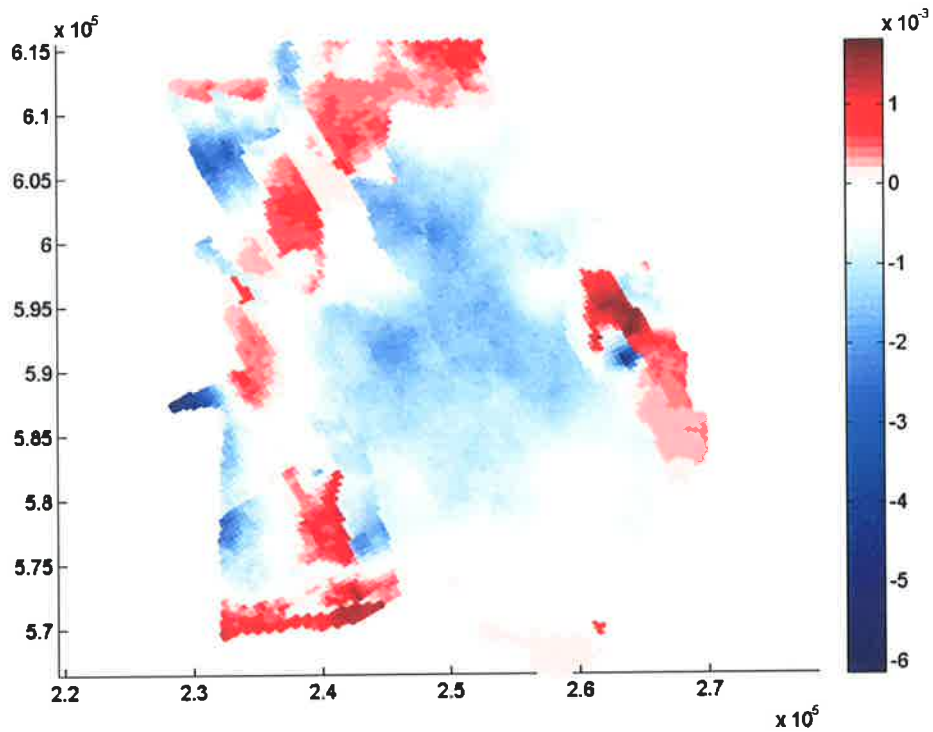
Figuur D.7.1 Cumulatieve compactie, in meters, vanaf 2013 tot en met 2023 berekend met het RTCM model voor het marktvaag scenario.



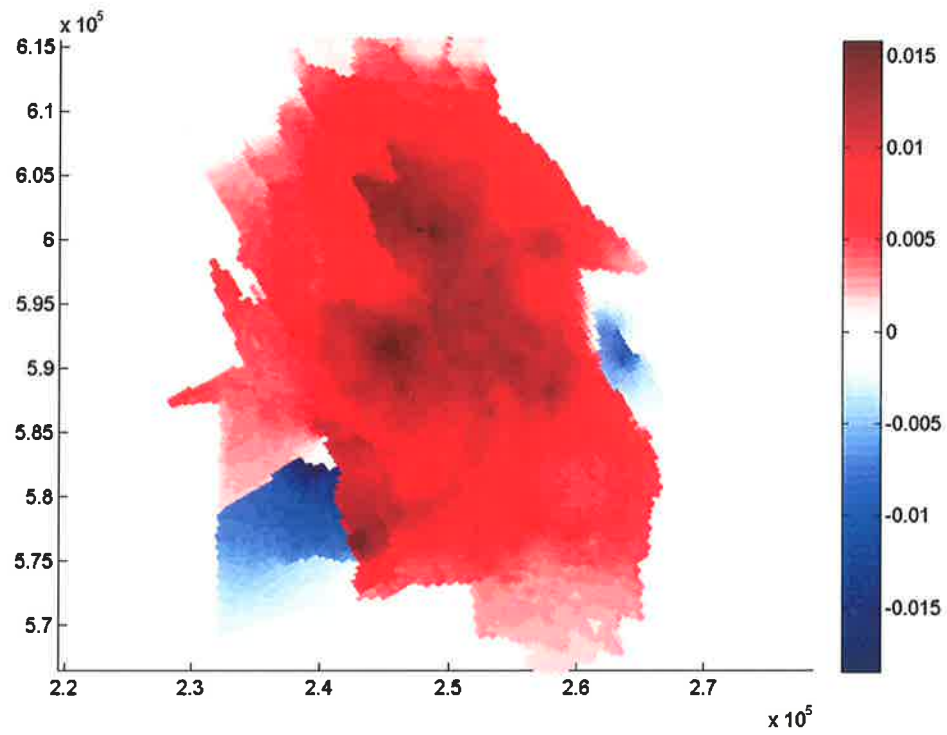
Figuur D.7.2 Cumulatieve compactie, in meters, vanaf 2013 tot en met 2023 berekend met het lineair isotachen model voor het marktvaag scenario.



Figuur D.7.3 Cumulatieve compactie, in meters, vanaf 2013 tot en met 2023 berekend met het Time-Decay model voor het marktvaag scenario.

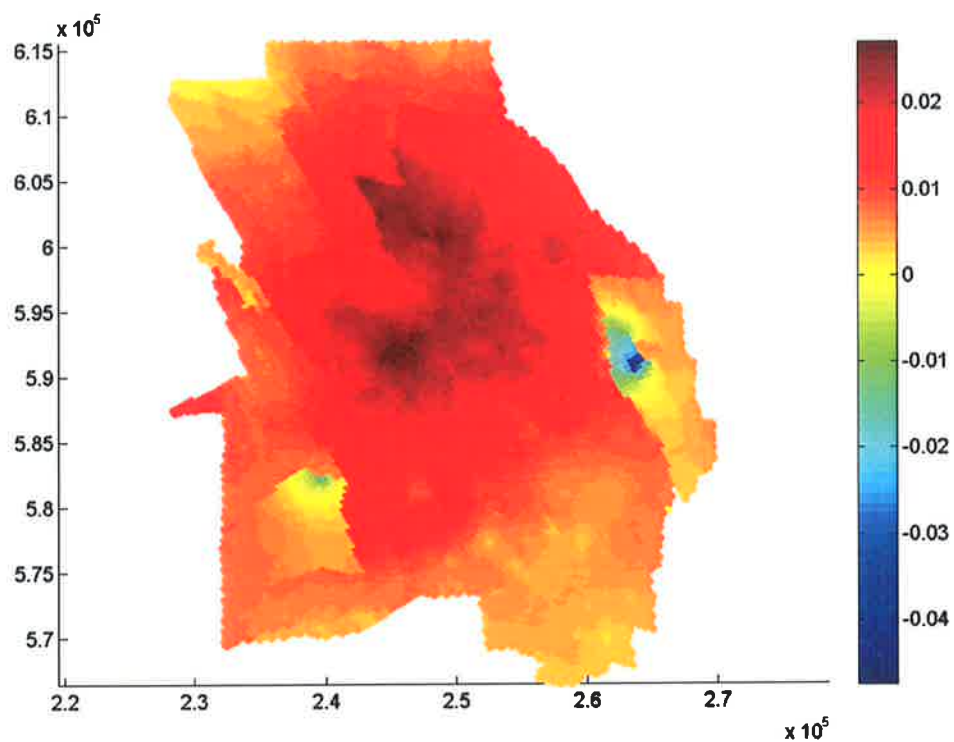


Figuur D.7.4 Verschil in compactie voor de periode 2013-2023 tussen het RTCM model en het lineair isotachen model, in meters, voor het marktvaag scenario. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

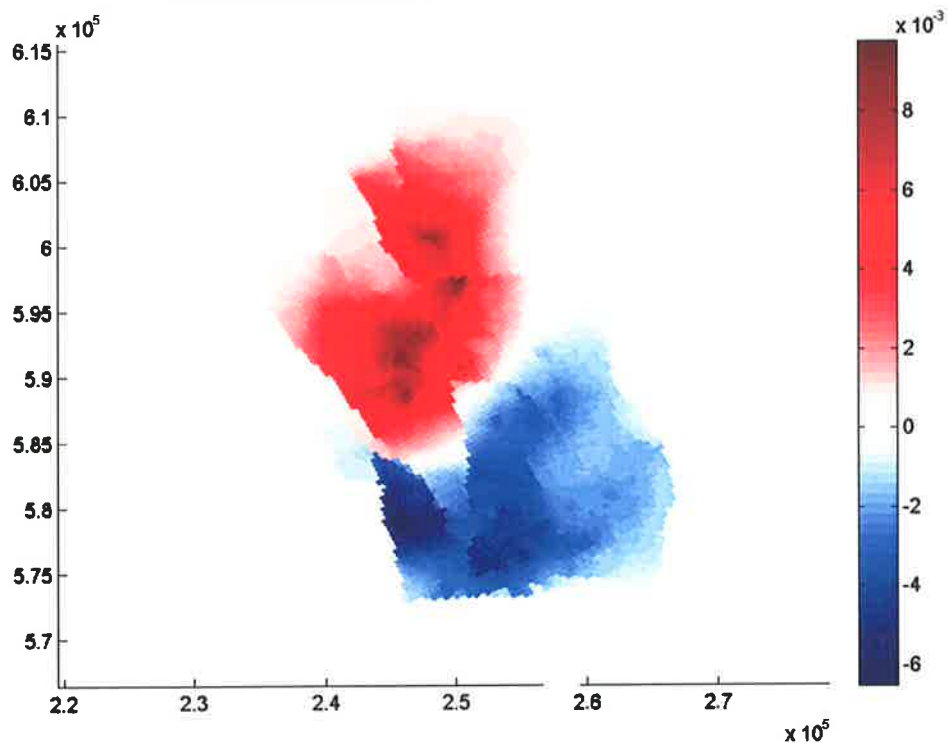


Figuur D.7.5 Verschil in compactie voor de periode 2013-2023 tussen het RTCM model en het Time-Decay model, in meters, voor het marktvraag scenario. Positief (rood) is grotere compactie met het RTCM model.

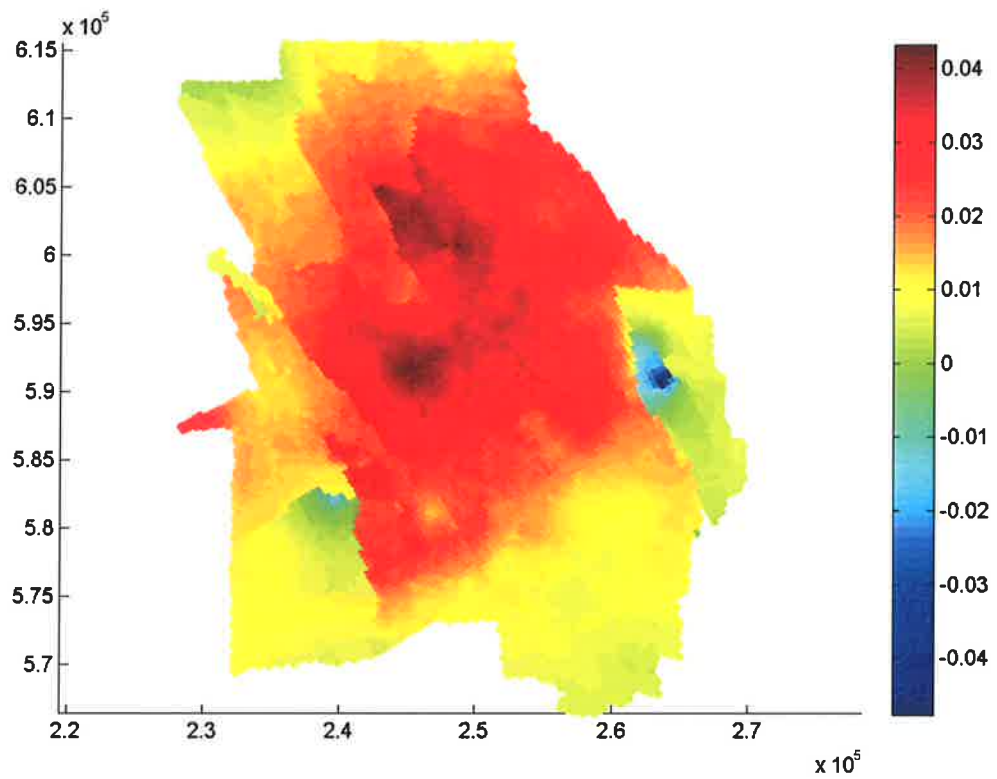
Appendix D.8: Compactiekaarten voor het 30bcm scenario en verschillen tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario voor de periodes 2013-2016, 2013-2018 en 2013-2023.



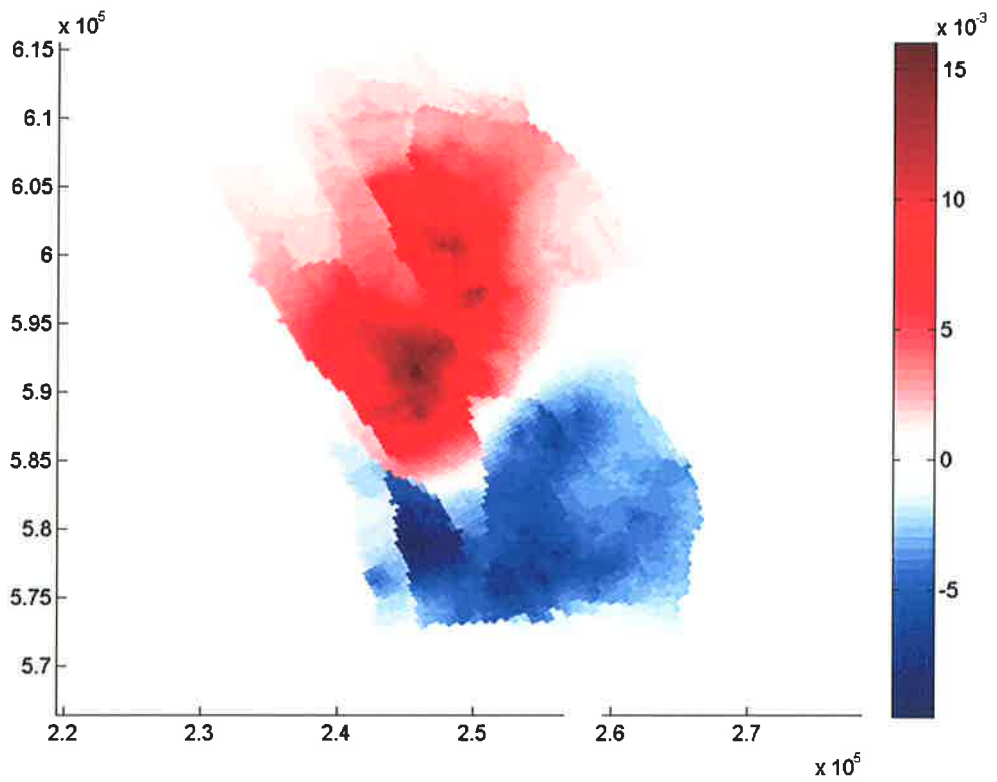
Figuur D.8.1 Compactie, in meters, voor het 30bcm scenario voor de periode vanaf 2013 tot 2016 met het RTCM model.



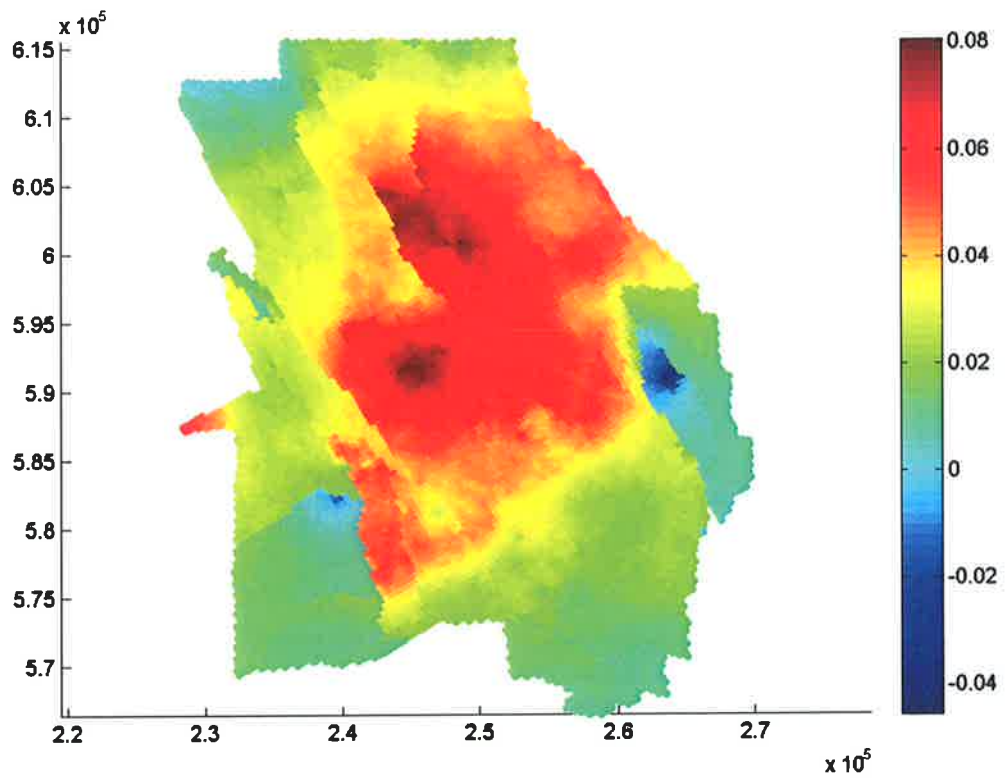
Figuur D.8.2 Compactieverschil, in meters, tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2016 met het RTCM model.



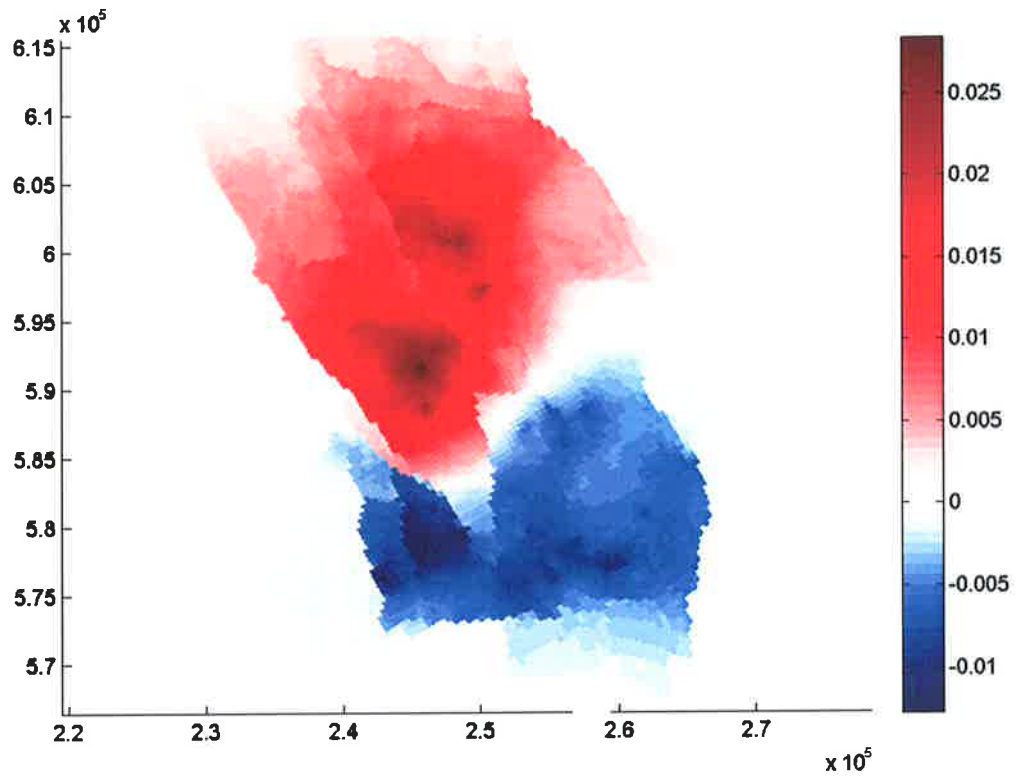
Figuur D.8.3 Compactie, in meters, voor het 30bcm scenario voor de periode vanaf 2013 tot 2018 met het RTCM model.



Figuur D.8.4 Compactieverschil, in meters, tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2018 met het RTCM model.



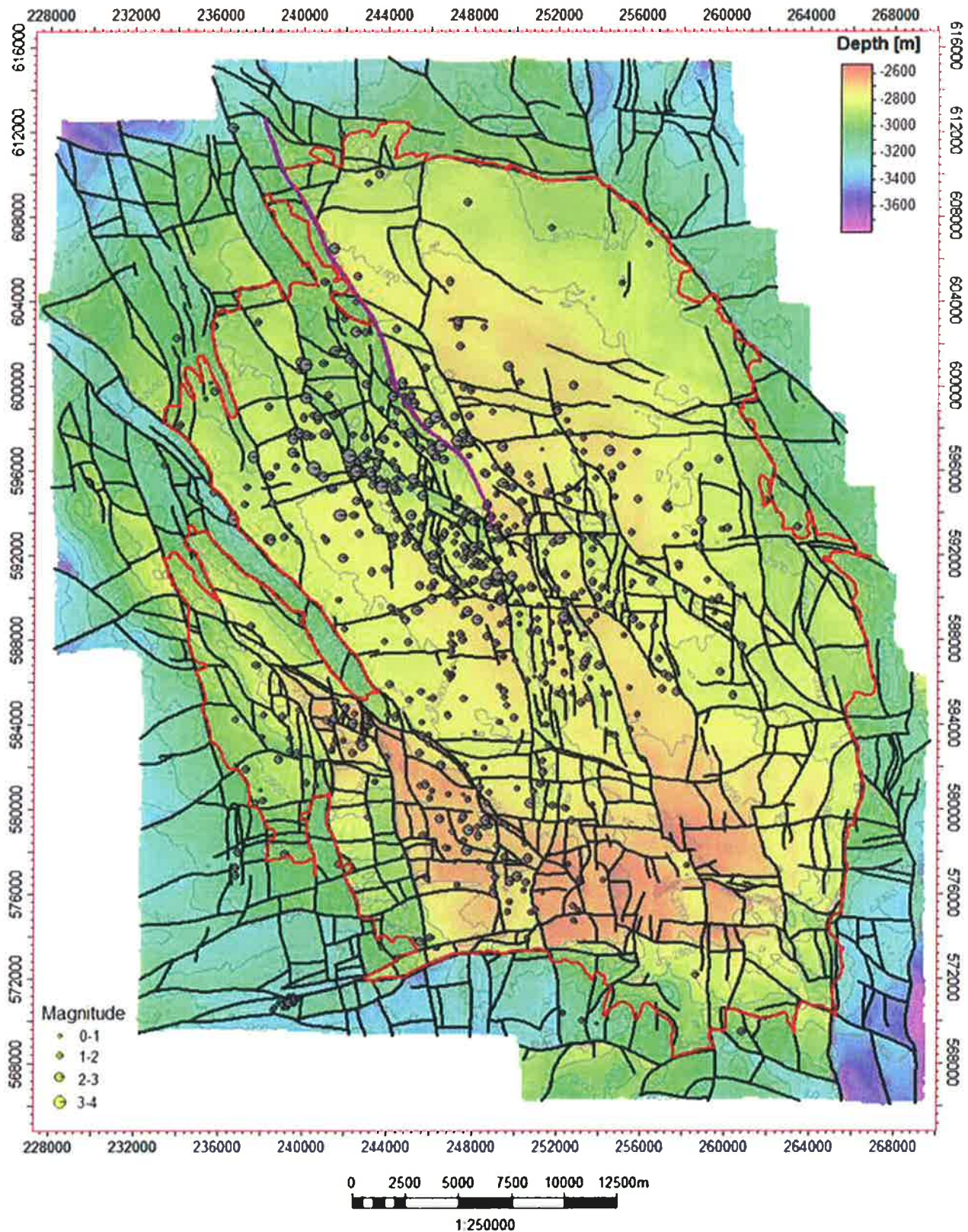
Figuur D.8.5 Compactie, in meters, voor het 30bcm scenario voor de periode vanaf 2013 tot 2023 met het RTCM model.



Figuur D.8.6 Compactieverschil, in meters, tussen het 30bcm en 30bcmA4 scenario in 2023 met het RTCM model.

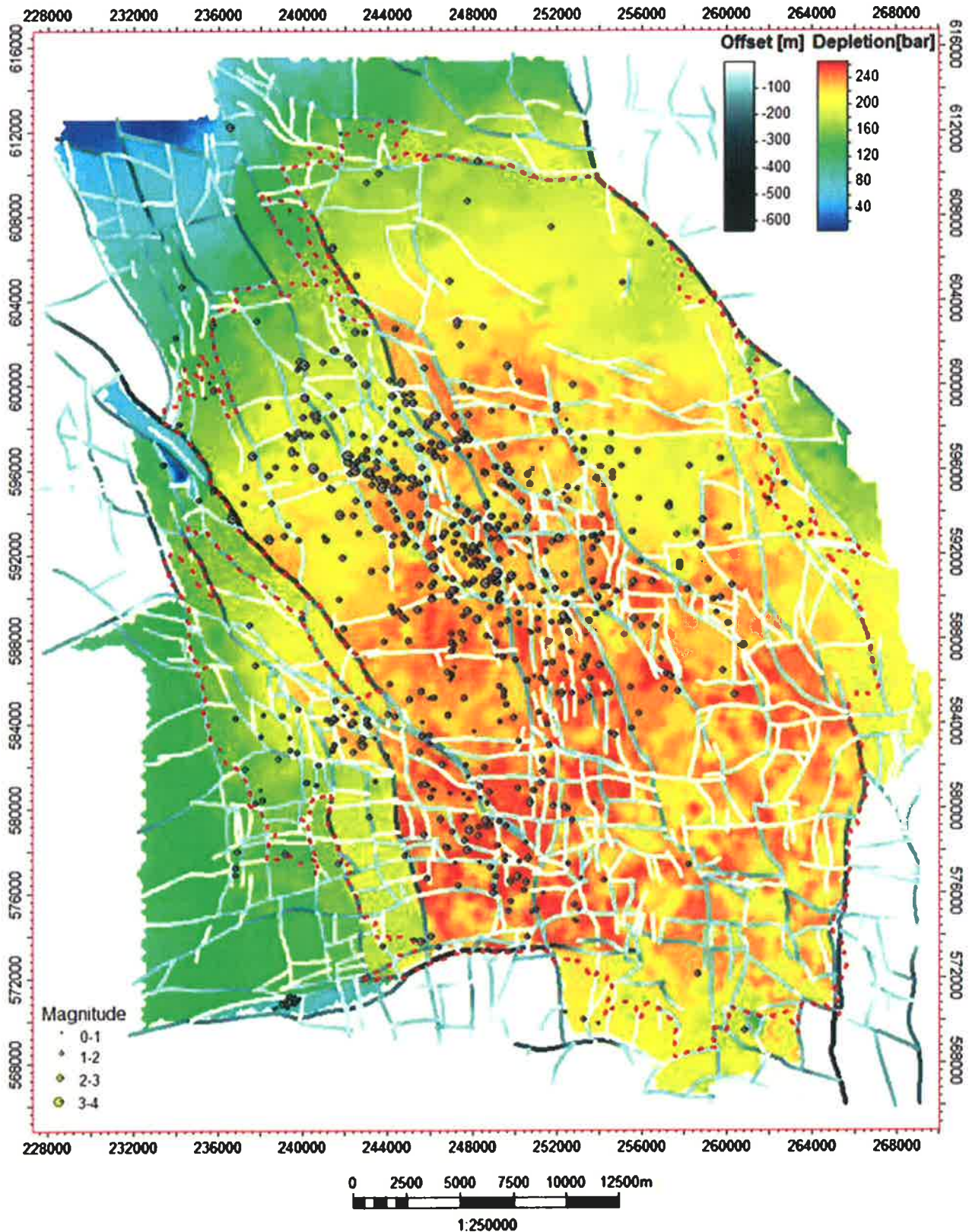
Appendix E

Appendix E.1: Overzicht van breuken in het 3D Petrel model



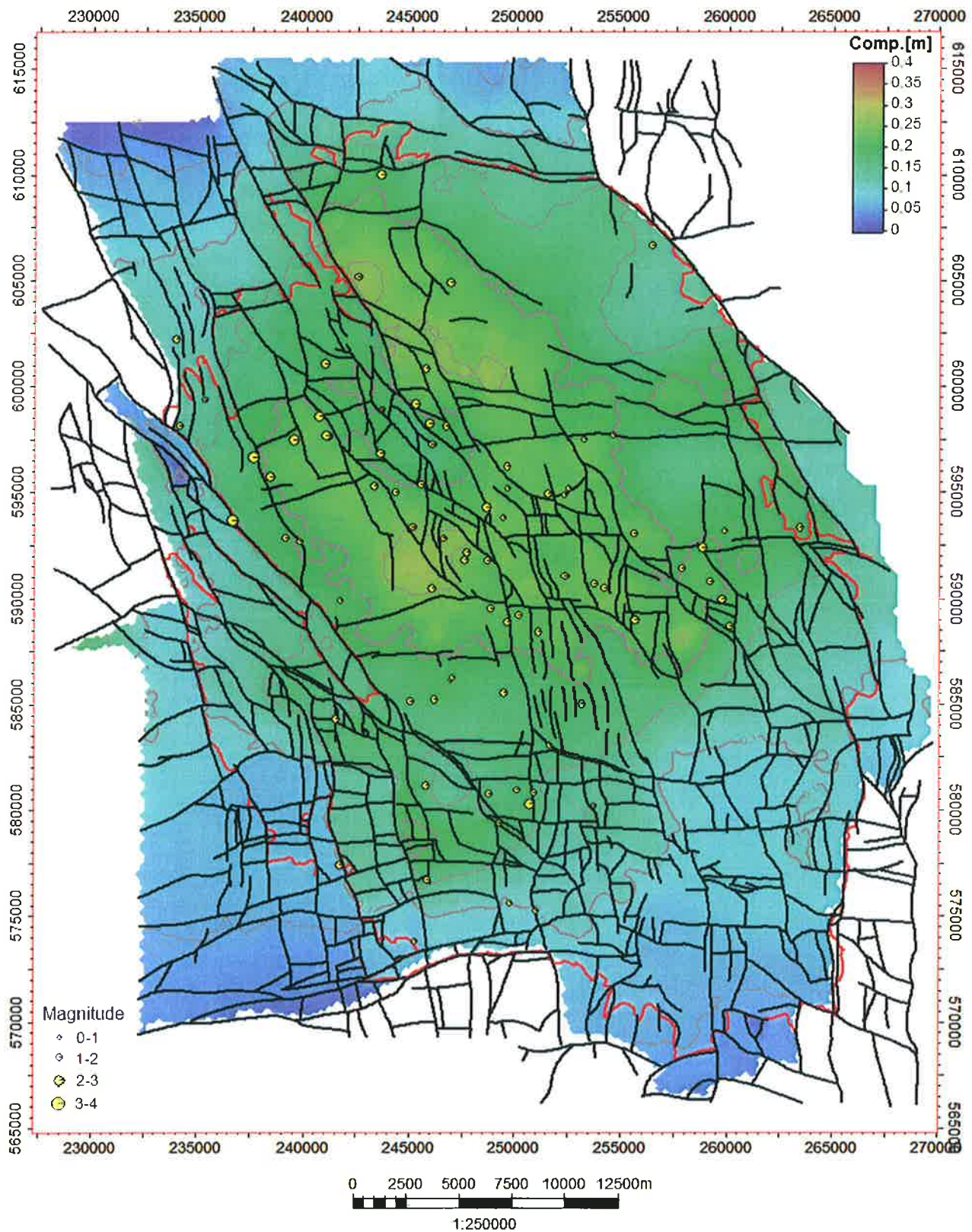
Figuur E.1.1: Overzicht van de breuken in het 3D Petrel model. Het langst aaneengesloten breuksegment is in roze gemarkeerd. In de figuur wordt tevens de diepte van de top van het Rotliegend getoond. Verder geeft de figuur de locatie en magnitude, in grootte van de cirkels, van alle aardbevingen binnen het Groningen gasveld weer.

Appendix E.2: Offset van breuken en gemiddelde drukdepletie in het Groningen veld

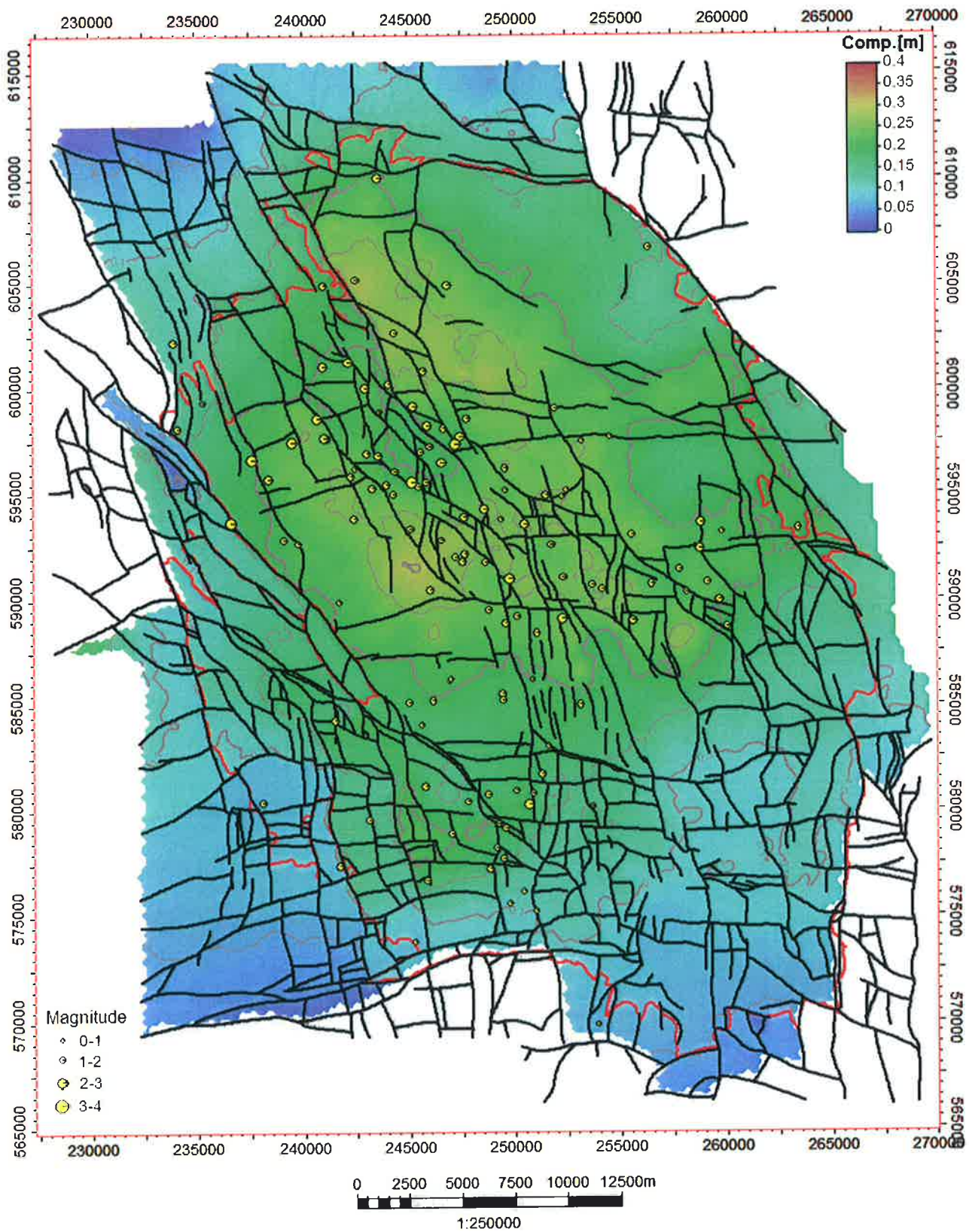


Figuur E.2.1: Verticaal gemiddelde drukdepletie in het Groningen veld voor het jaar 2013. Verder zijn de belangrijkste breuken in het reservoir weergegeven (op diepte top Rotliegend) en de geregistreerde seismiciteit (bevingen geregistreerd van 1991 tot 2013). De kleurschaal van de breuken geeft het 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.

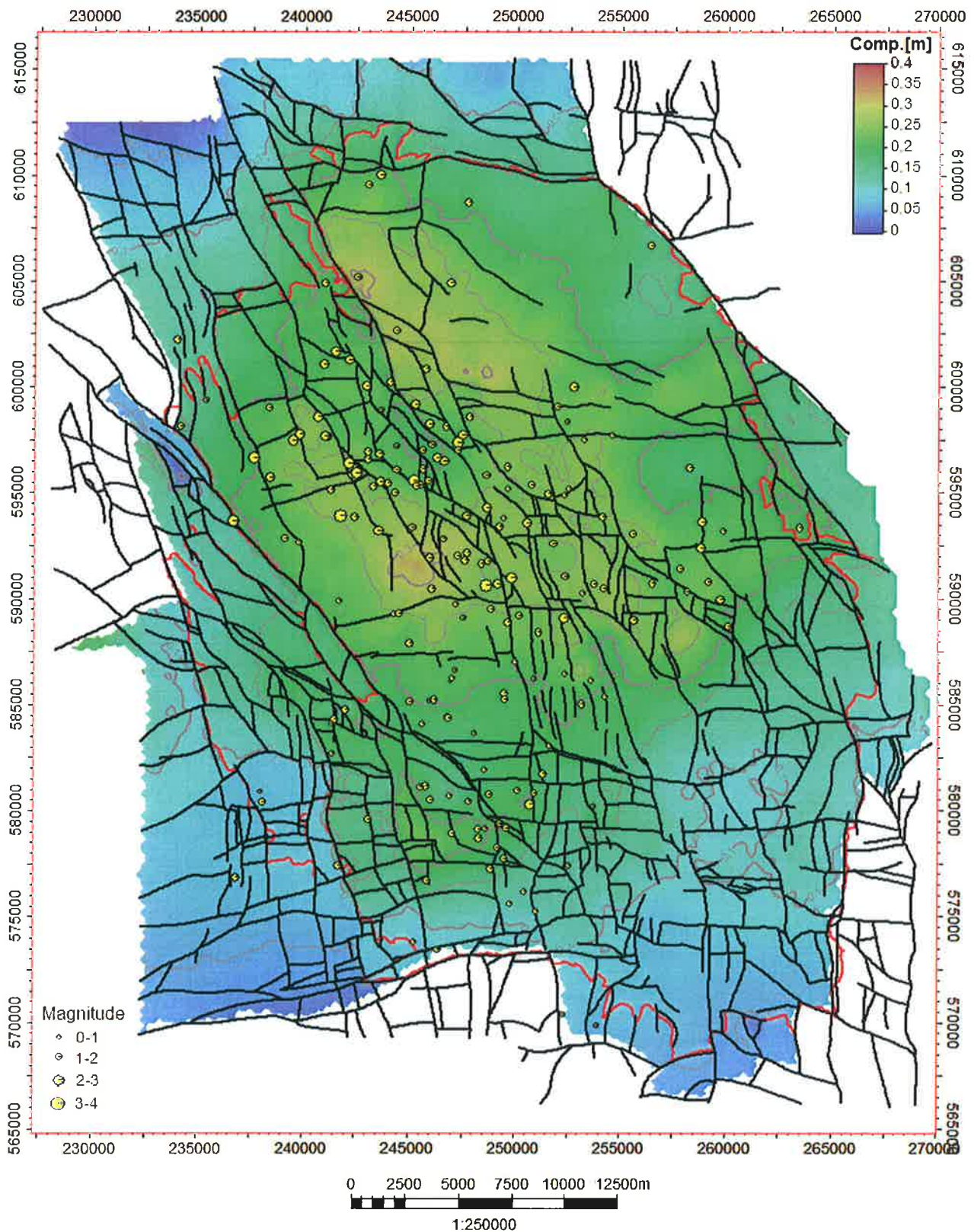
Appendix E.3: Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiciteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model.



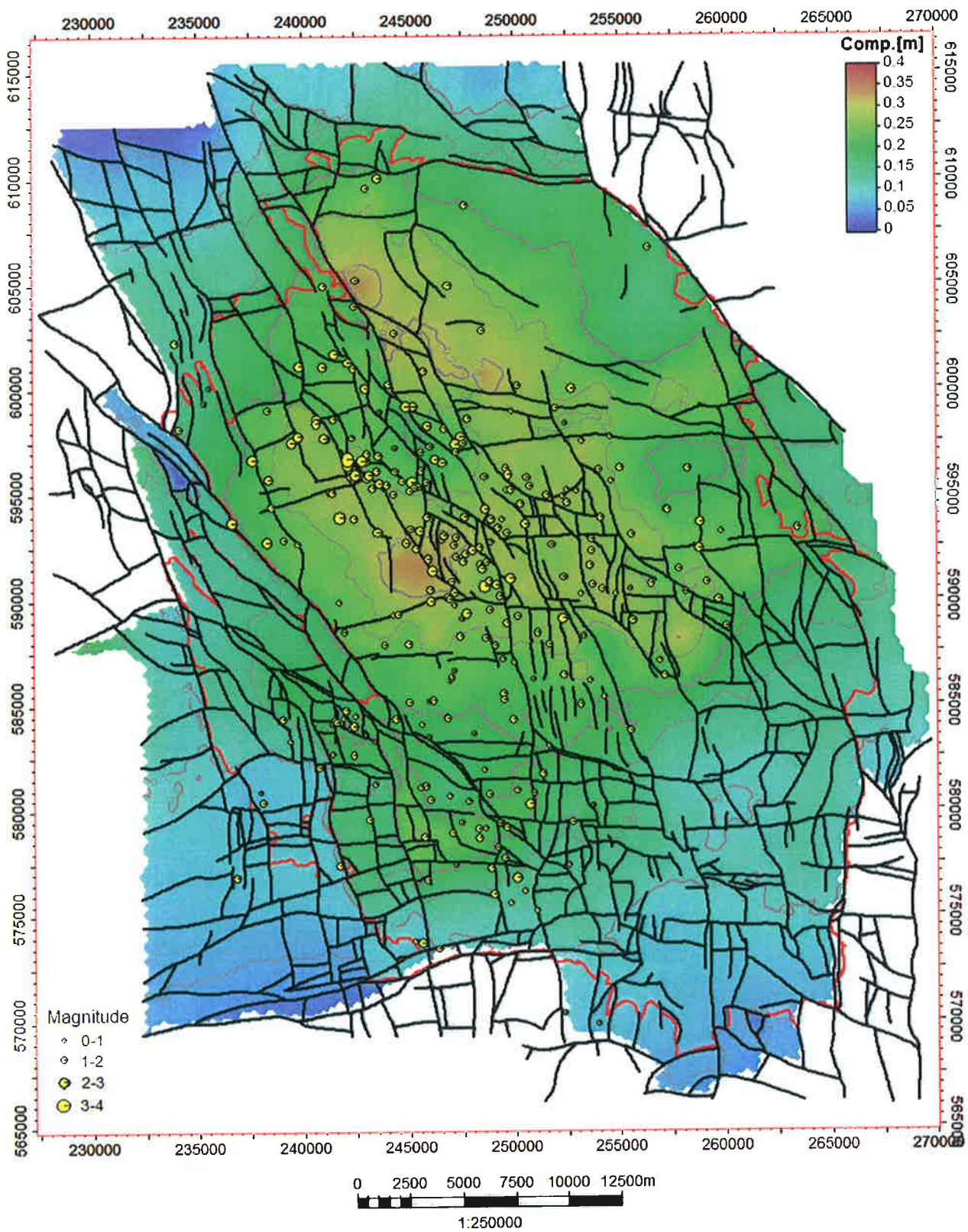
Figuur E.3.1 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiciteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 1997. Seismiciteit: vanaf 1991 tot 1997.



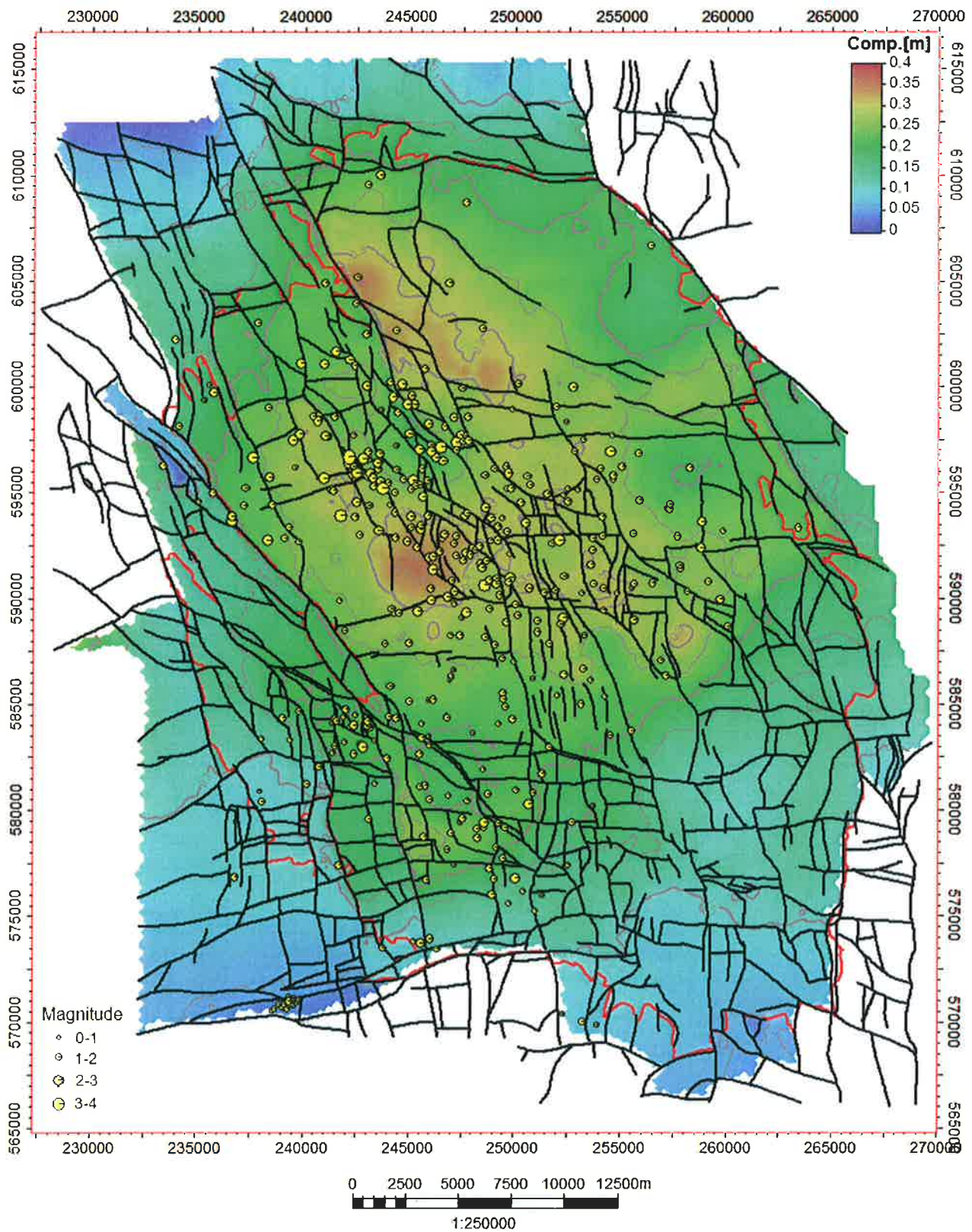
Figuur E.3.2 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2000. Seismiteit: vanaf 1991 tot 2000.



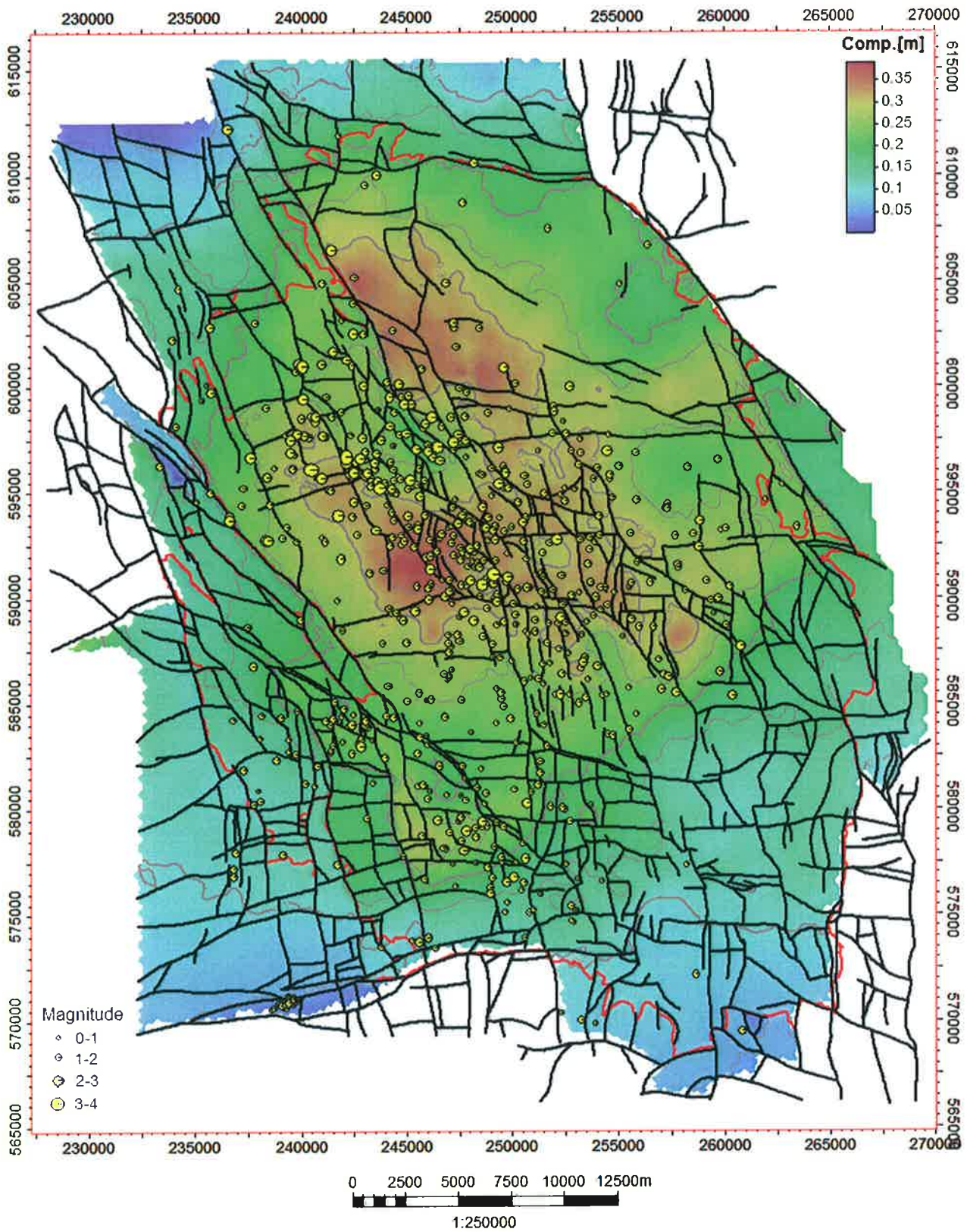
Figuur E.3.3 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiciteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2003. Seismiciteit: vanaf 1991 tot 2003.



Figuur E.3.4 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2006. Seismiciteit: vanaf 1991 tot 2006.

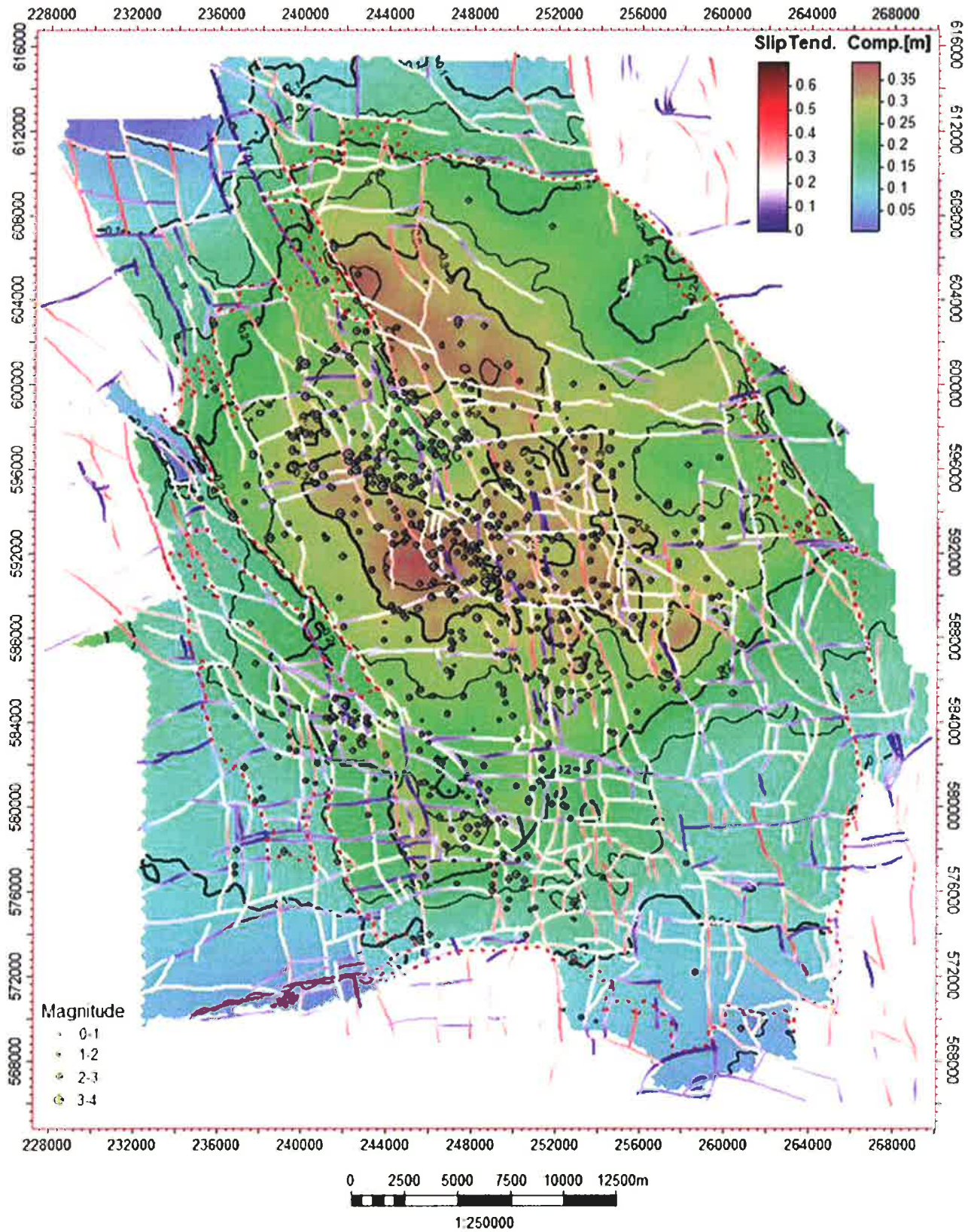


Figuur E.3.5 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiciteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2009. Seismiciteit: vanaf 1991 tot 2009.



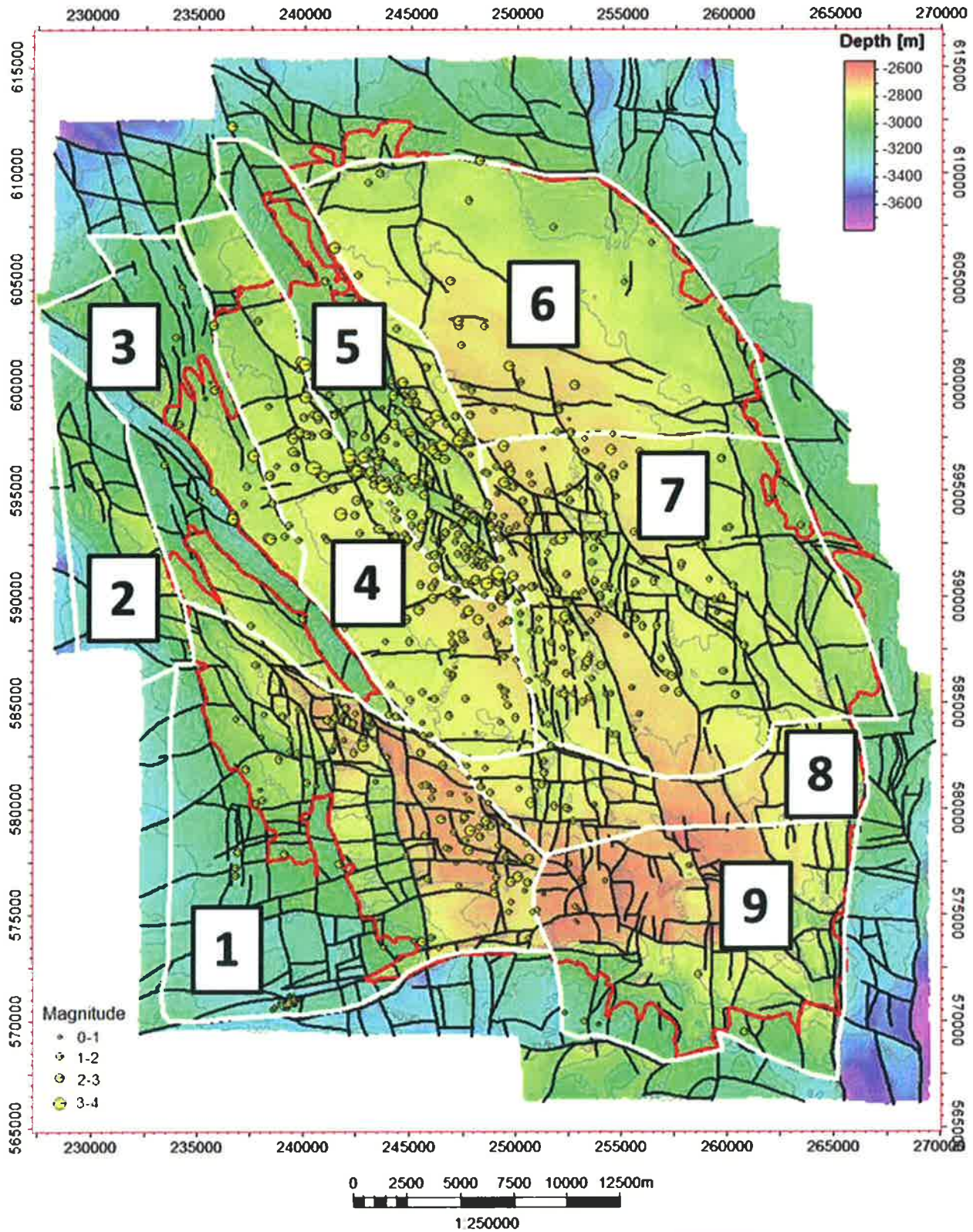
Figuur E.3.6 Ruimtelijke ontwikkeling van geïnduceerde seismiteit en cumulatieve compactie berekend met het RTCM model (Hoofdstuk 5) weergegeven voor het jaar 2012. Seismiteit: vanaf 1991 tot 2012.

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 ([redacted]).

