

TNO-rapport

TNO-060-UT-2011-02035/C | Eindrapport
Toetsing van de belasting op de
gebruiksruimte in de kombergingsgebieden
Pinkegat en Zoutkamperlaag door
bodemdaling ten gevolge van gaswinning
onder de Waddenzee

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

Datum 16 maart 2012

Auteur(s) Annemarie Muntendam-Bos, Jaap Breunese, Karin van Thienen-Visser, Lies Peters en Joaquim Juez-Larré

Exemplaarnummer
Oplage
Aantal pagina's 106 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen 0
Opdrachtgever Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie
Projectnaam Ondergrondse modellering Waddenzee
Projectnummer 034.24589/01.04.02

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 belanghebbenden is toegestaan.

© 2012 TNO

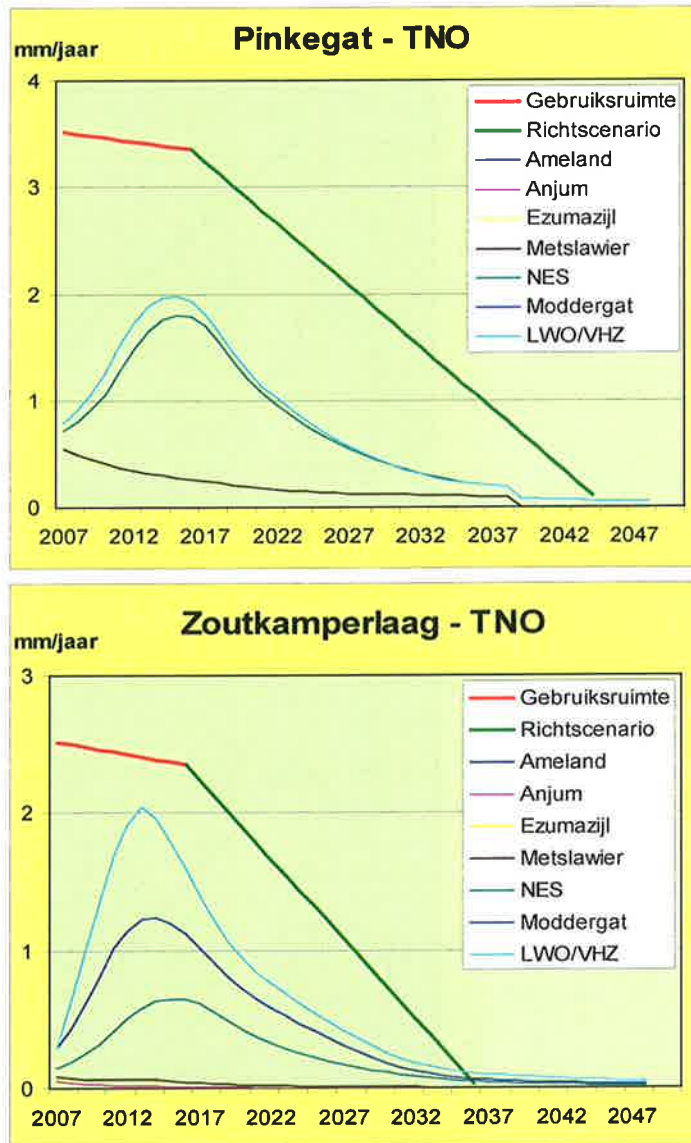
Samenvatting

In het waddengebied staat de beheersing van het effect van bodemdaling door gaswinning in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag centraal. De NAM heeft voor haar verzoek tot wijziging van de winningsplannen "Ameland", "Anjum" en "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" prognoses gemaakt van de oppervlakte-gemiddelde dalingssnelheid S (en het 6 jaarlijkse gemiddelde, de belasting B) als gevolg van de gaswinning uit de velden uit deze winningsplannen in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag (zie wijziging winningsplan 'Ameland 2011 rev. 30-09-2011', 'Anjum 2011 rev. 30-09-2011' en 'Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011 rev. 30-09-2011').

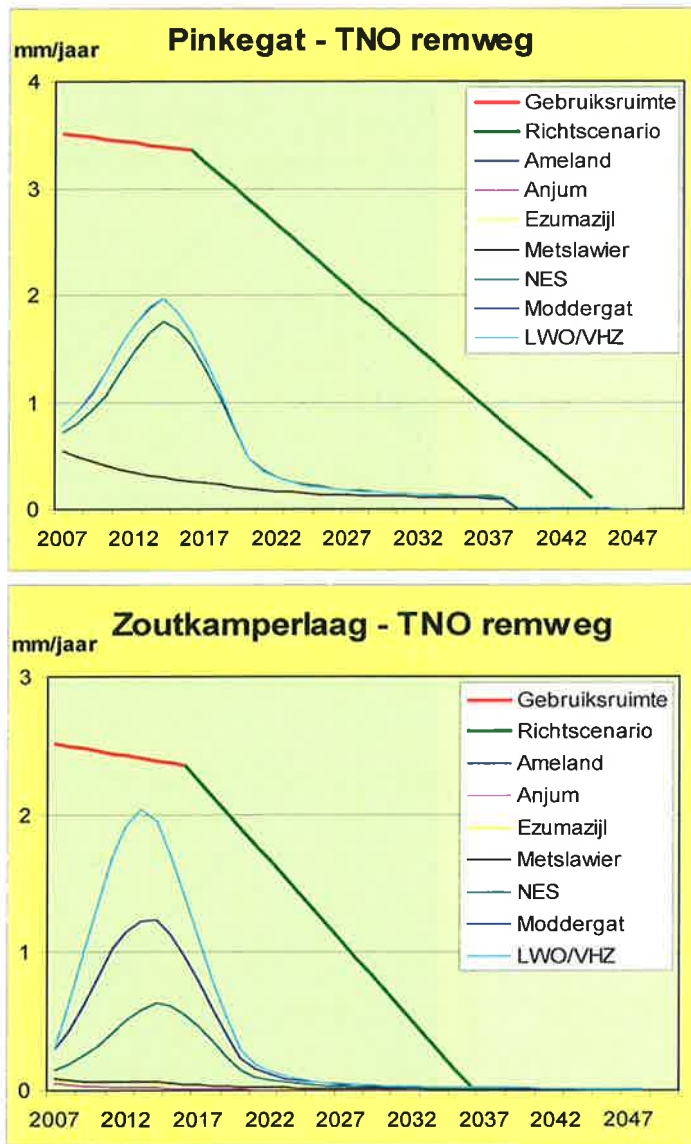
Op verzoek van het Ministerie van EL&I en het Staatstoezicht op de Mijnen heeft TNO onafhankelijke controleprognoses gemaakt van de dalingssnelheid, uitgaande van de door de NAM voorgestelde productieprofielen per veld. Dit rapport bevat de resultaten van deze controleberekeningen en de onafhankelijke toetsing van de bodemdaling ten gevolge van de door de NAM voorgenomen productie aan de voorwaarden, die aan de bodemdaling zijn gesteld.

Het resultaat van de toets is dat gedurende de nu volgende periode voor toekenning van Gebruiksruimte (1.1.2011 tot 1.1.2016) in beide kombergingen voldaan wordt aan de randvoorwaarde dat de Belasting binnen de Gebruiksruimte blijft ($B < G$, zie Figuur S-1).

Voor de periode vanaf 1.1.2016 geldt een richtscenario voor de zeespiegelstijging, dat rekening houdt met versnelde zeespiegelstijging. De 'remweg' scenario's, waarin de productie in de Waddenzeevelden Nes, Moddergat, Vierhuizen, Lauwersoog-West, -Centraal en -Oost op 1.1. 2016 wordt stil gelegd, laten een duidelijke afname van de Belasting zien (zie Figuur S-2). TNO concludeert op basis van haar berekeningen, dat het reduceren van de productie (het hand-aan-de-kraan principe) een effectief middel is om de bodemdaling te beheersen.



Figuur S-1 Resultaat van de Gebruiksruimtetoeets voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.



Figuur S-2 Resultaat van de 'remweg' toets voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Samenvatting | 2 |
| 1 | Inleiding | 15 |
| 2 | Dynamische reservoirmodellen van de NAM | 17 |
| 2.1 | Inleiding | 17 |
| 2.2 | Ameland..... | 17 |
| 2.3 | Anjum, Ezumazijl en Metslawier..... | 18 |
| 3 | Mogelijke bijdrage Ameland aquifers aan compactie en bodemdaling | 21 |
| 3.1 | Inleiding | 21 |
| 3.2 | Waarnemingen | 21 |
| 3.3 | Analyse aquifer..... | 22 |
| 3.4 | Conclusies en discussie | 26 |
| 4 | Dynamische reservoirmodellen van TNO | 27 |
| 4.1 | Modelcalibratie..... | 27 |
| 4.2 | Implementatie van de GIIP scenario's..... | 29 |
| 4.3 | Nes..... | 29 |
| 4.4 | Moddergat..... | 31 |
| 4.5 | Lauwersoog-Oost, -West, -Centraal en Vierhuizen..... | 33 |
| 4.6 | Overzicht GIIP | 38 |
| 4.7 | Analyse van de voorgestelde productieprofielen..... | 38 |
| 5 | Geomechanische methodiek en calibratie..... | 42 |
| 5.1 | Methodiek | 42 |
| 5.2 | Ameland..... | 48 |
| 5.3 | Anjum, Ezumazijl en Metslawier..... | 54 |
| 6 | Onzekerheidsanalyse geomechanische modellering..... | 61 |
| 6.1 | Porositeit afhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt | 61 |
| 6.2 | Invloed van peilmerken met kleine bodemdaling op de relaxatietijden | 65 |
| 6.3 | Laterale translatie van de kom | 67 |
| 6.4 | Invloed van de aquifer | 76 |
| 6.5 | Vergelijking TNO psuedo-NAM model met modellen uit de NAM winningsplannen..... | 78 |
| 6.6 | Conclusies | 82 |
| 7 | Discussie en conclusies geomechanische calibratie..... | 83 |
| 7.1 | Discussie calibratieresultaten | 83 |
| 7.2 | Implicaties Belasting berekeningen..... | 83 |
| 7.3 | Ruimtelijke misfit tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling | 84 |
| 8 | Bodemdaling | 87 |
| 8.1 | Bodemdalinsprognose | 87 |
| 8.2 | Belasting op de gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van gaswinning uit de "bestaande" velden | 89 |
| 8.3 | Belasting op de gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van gaswinning uit de Wadden I velden..... | 93 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9 | Gebruiksruimte Pinkegat en Zoutkamperlaag..... | 101 |
| 9.1 | Pinkegat..... | 101 |
| 9.2 | Zoutkamperlaag..... | 101 |
| 9.3 | 'Remweg' scenario's..... | 103 |
| 10 | Referenties | 105 |
| 11 | Ondertekening | 106 |



Lijst van Figuren

| | |
|--|----|
| Figuur S-1 Resultaat van de Gebruiksruimtetoets voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag..... | 3 |
| Figuur S-2 Resultaat van de 'remweg' toets voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag..... | 4 |
| Figuur 2-1. Drukdepletie (in bar) in het Ameland gasveld vanaf 1990 tot eind 2009 voor het deel dat geijkt is aan de productiegeschiedenis van het veld, en vanaf 2010 tot 2040 voor het voorspellende deel. Dit model bevat geen depletie in de westelijke aquifer en gedeeltelijke depletie van de aquifer ten zuiden van Ameland..... | 18 |
| Figuur 2-2. Drukdepletie (in bar) in de Anjum, Ezumazijl en Metslawier gasvelden vanaf 2000 tot eind 2009 voor het deel dat geijkt is aan de geschiedenis van het veld, en vanaf 2009 tot 2040 voor het voorspellende deel. Dit model bevat geen depletie in de aquifers van de velden. Let op de verschillende amplitudes van de depletie in de velden; In 2010 depleteerd Anjum maximaal 540 bar, Metslawier maximaal 460 bar en Ezumazijl maximaal 170 bar..... | 19 |
| Figuur 3-1 p/Z plot van blok E11-E15..... | 21 |
| Figuur 3-2 Water- en gasproductie van putten uit het Ameland gasveld..... | 23 |
| Figuur 3-3 (Links) Kaart van het Ameland gasveld met de locatie van de put AWG-102 (rood punt). Rood toont het mogelijke oppervlak van het reservoir. (Rechts) Schema van de twee mogelijke "angles of encroachment": 30 graden als breuken A, B en C afsluitend zijn; of 90 graden als breuken A, B en D afsluitend zijn. Locatie putten: (rood) AWG-102, (geel) AWG-104B; (blauw) AWG-106..... | 25 |
| Figuur 3-4 Percentage aquifer-depletie voor permeabiliteiten van 1, 5 en 10 mD en een <i>encroachment angle</i> van 90°..... | 26 |
| Figuur 4-1 Porositeits- en permeabiliteitsmetingen uit de kernen (blauw) met de geknikte regressielijn (roze) voor TU1..... | 30 |
| Figuur 4-2 Porositeits en permeabiliteitsmetingen uit de kernen (blauw) met de geknikte regressielijn (roze) voor TU2-6 (links voor de gaszone en rechts voor de waterzone)..... | 30 |
| Figuur 4-3 Uiteindelijk gebruikte basis permeabiliteit (k_{base}) voor Nes samen weergegeven met de kern permeabiliteit. De ellipsen geven aan waar handmatig de permeabiliteit is aangepast..... | 31 |
| Figuur 4-4 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Nes..... | 33 |
| Figuur 4-5 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Moddergat (legenda zie Figuur 4-4)..... | 34 |
| Figuur 4-6 Swcr schaling afgeleid uit de saturatie- hoogte curves. LWO-West curve is gebruikt voor alle vier de velden..... | 35 |
| Figuur 4-7 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Lauwersoog-oost..... | 36 |
| Figuur 4-8 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Lauwersoog-west..... | 37 |
| Figuur 4-9 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Vierhuizen..... | 38 |
| Figuur 4-10 Water productie voor scenario's 1, 2 en 5..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figuur 5-1 Porositeits afhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt. De rode punten geven de niet gecorrigeerde waardes en de zwarte de gecorrigeerde punten. De rode lijn is de beste fit van de niet gecorrigeerde waardes (vergelijking 4), de zwarte lijn is de beste fit van de gecorrigeerde waardes (vergelijking 5)..... | 44 |
| Figuur 5-2. De berekende komvormen van het GeoMec model voor een West-Oost doorsnede over het eiland Ameland..... | 46 |
| Figuur 5-3. Nucleus of strain relatie tussen de diepte van het rigide fundament (k) en de diepte van het reservoir (c). De Geerstema oplossing is gegeven door u.47 | |
| Figuur 5-4. Locaties van de peilmerkpunten van Figuur 5-5..... | 48 |
| Figuur 5-5. Bodemdaling (m) voor acht peilmerkpunten in de tijd boven het eiland Ameland en voor vier clusters van 3 wadpunten. De locaties van de punten staan in Figuur 5-4..... | 49 |
| Figuur 5-6. Vergelijking tussen de twee beste modellen van scenario 9 van Ameland (Tabel 5-3), het beste model van scenario 10 en het TNO pseudo-NAM model voor de geselecteerde peilmerken van Figuur 5-5. De rode punten met foutenmarge geven de peilmerkdata aan..... | 52 |
| Figuur 5-7. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van en Tabel 5-3. Peilmerkdata die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn. | 53 |
| Figuur 5-8. Compactie in het reservoir in 2010 in het GEOMEK model van de NAM (links) en het TNO pseudo-NAM model (rechts). | 54 |
| Figuur 5-9 Locaties van de peilmerkpunten van Figuur 5-10..... | 55 |
| Figuur 5-10. Bodemdaling (m) voor 14 peilmerken boven het Anjum gasveld, 2 peilmerken boven Metslawier en 2 peilmerken naast Ezumazijl in de tijd. De locaties van de punten staan in Figuur 5-9. | 56 |
| Figuur 5-11. Vergelijking tussen twee beste modellen van Anjum (Tabel 5-6), het Anjum model ('ANJ'), het Ameland model (aangepast voor andere c/k) ('AME') en het pseudo-NAM model voor de geselecteerde peilmerken van Figuur 5-9. De rode punten met foutenmarge geven de peilmerkdata aan. Het aangeleverde model van Ezumazijl laat een sprong zien in 2009 (zichtbaar in 002G0079 en 002H0070). Dit markeert de overgang van het 'history match' gedeelte naar het voorspellende gedeelte van het reservoir model van Ezumazijl. | 59 |
| Figuur 5-12. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van Tabel 5-6. Peilmerkdata die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn. | 60 |
| Figuur 6-1. De 67% en 95% betrouwbaarheidsgrenzen van de gecorrigeerde regressiefunctie (vergelijking 4)..... | 61 |
| Figuur 6-2 Variatie in bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9) voor de 67% betrouwbaarheidsgrens van de regressiefunctie (donkerblauw) en de 95% betrouwbaarheidsgrens (lichtblauw)..... | 62 |
| Figuur 6-3. (Links) Porositeitsafhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt. De rode punten geven de niet gecorrigeerde waardes en de zwarte de gecorrigeerde punten. De rode lijn is de beste fit van de niet gecorrigeerde waardes (vergelijking 3), de zwarte lijn is de beste fit van de gecorrigeerde waardes (vergelijking 4), de blauwe lijn is de beste fit van de Ameland kernen (vergelijking 8), en de roze lijn is de benadering van de NAM vergelijking | |

| | |
|---|----|
| (vergelijking 9). De waarden voor de Ameland kernen zijn gegeven door de punten met een blauwe rand. De waarden voor de Anjum kernen zijn gegeven door de punten met een groene rand. (Rechts) de 95% betrouwbaarheidsgrenzen van de gecorrigeerde regressiefunctie (vergelijking 4, grijs vlak, meetpunten zijn zwart) en de gecorrigeerde regressiefunctie van de Ameland kernen (vergelijking 8, rood vlak en de meetpunten in rood). De roze lijn geeft de benadering van de NAM vergelijking (vergelijking 9)..... | 63 |
| Figuur 6-4 Bodemdaling voor drie verschillende compactiecoëfficiënt porositeit relaties. Groen is gemodelleerd op basis van de relatie die gecorrigeerd is voor laboratorium effecten (vergelijking 4), blauw is op basis van de niet gecorrigeerde relatie (vergelijking 3), rood is op basis van de relatie afgeleid voor de Ameland kernen (vergelijking 8) en blauw is op basis van een benadering van de NAM relatie (vergelijking 9). | 64 |
| Figuur 6-5. Variatie in bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9) voor de 67% betrouwbaarheidsgrens van de regressiefunctie (donkerblauw) en de 95% betrouwbaarheidsgrens (lichtblauw)..... | 66 |
| Figuur 6-6. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor de zoutkruip is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9..... | 68 |
| Figuur 6-7. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor de diffusie is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9. | 69 |
| Figuur 6-8. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor het rigide basement (c/k) in de Geerstema-Van Opstal relatie is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9..... | 70 |
| Figuur 6-9. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor de verandering van het rigide basement (dc/k) in de Geerstema-Van Opstal relatie is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9. | 71 |
| Figuur 6-10. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). Er is gekozen voor twee extreme variatie van de parameters [zoutkruip, diffusie, c/k , dc/k] die nog in de oplossingsruimte voorkomt (blauwe en rode lijnen) en de parameters van het beste model van scenario 9 (groene lijn). | 72 |
| Figuur 6-11. Bodemdaling berekend met en zonder een translatieafstand van het diepste punt. De gebruikte relatie voor de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt is de gecorrigeerde van alle Rotliegend kernen (vergelijking 4). | 73 |
| Figuur 6-12. Bodemdaling berekend met en zonder een translatieafstand van het diepste punt. De gebruikte relatie voor de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt is die van de Ameland kernen (vergelijking 8). | 74 |

| | |
|---|----|
| Figuur 6-13. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van Figuur 6-11. Peilmerkdatta die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn. | 75 |
| Figuur 6-14. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van Figuur 6-12. Peilmerkdatta die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn. | 75 |
| Figuur 6-15. Gemodelleerde bodemdaling van het peilmerkpunt 02D0079 en het GPS station op dezelfde locatie berekend met en zonder een translatieafstand van het diepste punt en de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt van de Ameland kernen (vergelijking 8). | 76 |
| Figuur 6-16. Bodemdaling berekend met de MORES modellen met aquifer (rood), gedeeltelijke aquifer (groen) en waar de depletie in de aquifer is weggelaten uit het model (blauw) ($T_{zout}=17.5$, $T_{res}=3.6$, $c/k=0.90$, $dc/k=0.20$). De knik in de gemodelleerde bodemdaling rond 2012 voor punt 02C0023 berekend met het MORES model (blauwe en rode curve) met aquifer depletie wordt veroorzaakt door de depletie van dit model. | 77 |
| Figuur 6-17. Bodemdaling berekend met de MORES model met gedeeltelijke aquifer depletie en de "TNO psuedo NAM" model zonder translatie, met 400 m translatie en met 800 m translatie. | 79 |
| Figuur 6-18. Bodemdaling volgens het model uit het voorgestelde wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011" bij de geselecteerde peilmerkpunten (van links naar rechts): C23, C30, C87; C34, C83, C82; D75, D70, D73; D52, D49, M2N. | 80 |
| Figuur 6-19. Bodemdaling berekend met de MORES model met gedeeltelijke aquifer depletie en het TNO model met 400 m translatie en het compactiemodel uit vergelijking 8 ("Ameland") in vergelijking met het "TNO psuedo NAM" model met 400 m translatie. | 81 |
| Figuur 7-1. Vergelijking tussen de gemeten bodemdaling en de gemodelleerde bodemdaling (Ameland relatie, vergelijking 8 en 400 m translatie) voor Ameland op de aangegeven tijdstippen. Positieve waarden geven een overschatting van de gemeten bodemdaling, negatieve waarden een onderschatting. | 85 |
| Figuur 7-2. Vergelijking tussen de gemeten bodemdaling en de gemodelleerde bodemdaling voor Anjum, Metslawier en Ezumaijl op de aangegeven tijdstippen. Positieve waarden geven een overschatting van de gemeten bodemdaling, negatieve waarden een onderschatting. | 86 |
| Figuur 8-1. Bodemdaling (cm) in 2011. In zwart de topografie van de Waddenzee, in grijs de contouren van de gasvelden en in groen de contouren van kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. | 87 |
| Figuur 8-2. Bodemdaling (cm) voorspelling in 2025 (boven) en 2050 (onder). In zwart de topografie van de Waddenzee, in grijs de contouren van de gasvelden en in groen de contouren van kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. | 88 |
| Figuur 8-3. De verwachtingswaarde (BE), het 'worst case' (WC) scenario en het TNO psuedo-NAM scenario (ps NAM; Tabel 7-1) voor de Belasting (mm/jaar) van het Ameland voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figuur 8-4. De verwachtingswaarde (BE), het 'worst case' (WC) scenario en het TNO psuedo-NAM scenario (ps NAM) voor de Belasting (mm/jaar) van het Anjum voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 90 |
| Figuur 8-5. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Ezumazijl. "ps NAM", "BE" en "WC" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 7-2. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 91 |
| Figuur 8-6. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Metslawier. "ps NAM", "BE" en "WC" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 7-2. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 92 |
| Figuur 8-7. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen NES. "ps NAM", "Anjum" en "Ameland" verwijzen naar de drie geomechanische scenario's uit Tabel 8-1. Sc2 en sc5 verwijzen naar de reservoir-dynamische scenario's. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 94 |
| Figuur 8-8. De verwachtingswaarde (BE) en het 'worst case' (WC) scenario voor de Belasting (mm/jaar) van het NES voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 95 |
| Figuur 8-9. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Moddergat. "ps NAM", "Anjum" en "Ameland" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 8-1. Sc1 en sc2 verwijzen naar de dynamische scenario's. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 96 |
| Figuur 8-10. De verwachtingswaarde (BE) en het 'worst case' (WC) scenario voor de Belasting (mm/jaar) van het Moddergat voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 98 |
| Figuur 8-11. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit de voorkomens Lauwersoog-West, -Oost, -Centraal en Vierhuizen. "ps NAM", "Anjum" en "Ameland" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 8-1. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 99 |
| Figuur 8-12. De verwachtingswaarde (BE) en het 'worst case' (WC) scenario voor de Belasting (mm/jaar) van de voorkomens Lauwersoog-West, -Oost, -Centraal en Vierhuizen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend. | 100 |
| Figuur 9-1. Gebruiksruimte met daarbij de Belasting voor komberging Pinkegat ten gevolge van de gaswinning uit de velden Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Lauwersoog-Oost, -Centraal, -West en Vierhuizen. In de onderste figuren zijn de zogenaamde "remweg" – scenario's te zien, waarbij op 1.1.2016 de gaswinning uit de Waddenzee velden is stilgelegd. | 102 |
| Figuur 9-2. Gebruiksruimte met daarbij de Belasting voor komberging Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit de velden Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Lauwersoog-Oost, -Centraal, - | |



West en Vierhuizen. In de onderste figuren zijn de zogenaamde "remweg" –
scenario' s te zien, waarbij op 1.1.2016 de gaswinning uit de Waddenzee
velden is stilgelegd.103



Lijst van Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 3-1 Input parameters voor de schatting van de waterinflux | 24 |
| Tabel 4-1. Overzicht van de dynamische scenario's | 28 |
| Tabel 4-2. Overzicht van de benodigde aanpassingen ten opzichte van het basis model voor Nes om de scenario's te matchen met de historische data. | 32 |
| Tabel 4-3 Overzicht van de benodigde aanpassingen ten opzichte van het basis model om het scenario te matchen met de historische data (k_{pp} is de permeabiliteit zoals die is afgeleid uit de poro-perm relatie). | 32 |
| Tabel 4-4. Compositie en PVT eigenschappen van het gas, monster datum 06-mar-1994, in put VHN-1 (oppervlakte monster) | 35 |
| Tabel 4-5 Overzicht van de benodigde aanpassingen ten opzichte van het basis model om het scenario te matchen met de historische data. | 36 |
| Tabel 4-6 Overzicht GIIP waarden van de base case per veld | 38 |
| Tabel 4-7 Overzicht van de gerealiseerde productie per scenario voor Nes. | 39 |
| Tabel 4-8 Overzicht van de gerealiseerde productie per scenario voor Lauwersoog en Vierhuizen. | 41 |
| Tabel 5-1. Gemiddelden en standaard deviaties, alsook minimum en maximum waarden voor de parameter zoektocht | 51 |
| Tabel 5-2. Verschillende geomechanische scenario's voor de parameter zoektocht boven het Ameland veld | 51 |
| Tabel 5-3. De beste twee modellen van scenario 9, het beste model van scenario 10 en het TNO pseudo-NAM model met de bijbehorende waarden voor de relaxatietijden van het zout en het reservoir. RMS is, conform de RMS-toets van SodM, gedefinieerd als de 'root-mean-squared' van het verschil van de peilmerkdata (d) en de gemodelleerde daling (m): $RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (d_i - m_i)^2}$ | 53 |
| Tabel 5-4. Verschillende geomechanische scenario's voor de Anjum, Ezumazijl en Metslawier voorkomens. | 57 |
| Tabel 5-5. Gemiddelden en standaard deviaties, alsook minimum en maximum waarden voor de parameter zoektocht binnen de kleinere modelruimte. | 57 |
| Tabel 5-6. De beste twee modellen van scenario 3, het Anjum (ANJ), Ameland (AME) en psuedo NAM scenario (ps NAM) met de bijbehorende waarden voor de relaxatietijden van het zout en het reservoir en de parameters voor het rigide basement. | 57 |
| Tabel 6-1. Gemiddelde van de vijf beste modellen van RedFlag (kleine modelruimte) waarbij als input de data met een uiteindelijke bodemdaling van meer dan 5, 10 en 15 cm. | 67 |
| Tabel 7-1. Parameterwaarden van drie scenario's voor Ameland voor de bodemdalingsanalyses. Het TNO pseudo- NAM scenario volgt de parameterwaarden van de NAM uit het wijziging winningsplan "Ameland 2011 2011 rev.30-09-2011". | 84 |
| Tabel 7-2. Parameterwaarden van drie scenario's voor Anjum, Ezumazijl en Metslawier, die in het volgende hoofdstuk zullen worden gebruikt voor de bodemdalingsanalyses. 'Worst case' gebruikt de relaxatietijden gevonden voor Ameland. 'Best case' gebruikt de relaxatietijden gevonden in de analyse van het gebied met de Anjum, Ezumazijl en Metslawier voorkomens en 'TNO psuedo-NAM' gebruikt de relaxatietijden van het zout en reservoirgesteente conform de voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011". | 84 |

Tabel 8-1. Parameterwaarden voor drie geomechanische scenario's voor de bodemdalingsanalyses. 'Ameland' gebruikt de relaxatietijden gevonden voor Ameland. 'Anjum' gebruikt de relaxatietijden gevonden in de analyse van het gebied met de voorkomens Anjum, Ezumazijl en Metslawier en 'TNO psuedo-NAM' gebruikt de relaxatietijden van het zout en reservoirgesteente conform de voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011".93

1 Inleiding

In het waddengebied wordt gaswinning in en rond de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag uitgevoerd volgens het Rijksprojectbesluit "Gaswinning Waddenzee". Als operationele afgeleide daarvan is bij de instemming met het winningsplan "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" de voorwaarde opgenomen, dat de Belasting (B) op de gebruikruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de bodemdaling door gaswinning uit de Waddenzee velden moet blijven binnen de vastgestelde Gebruikruimte (G) van deze kombergingsgebieden. De Belasting (B) is de verwachtingswaarde van de bodemdalingssnelheid gemiddeld over een tijdvak van 6 jaren.

Op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie en het Staatstoezicht op de Mijnen heeft TNO in 2008/2009 onafhankelijke prognoses van de bodemdalingssnelheid (S) in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag gemaakt op basis van de prognoses van NAM voor de "bestaande" velden Ameland, Anjum, Ezumazijl en Metslawier, en TNO's eigen modelinstrumentarium, op basis van de voorgestelde productieprofielen, voor de gasvelden Nes, Moddergat, Lauwersoog-West, -Centraal, -Oost en Vierhuizen (Muntendam-Bos et al, 2010). In het kader van het verzoek van de NAM tot wijziging van de winningsplannen "Ameland", "Anjum" en "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" (NAM, 2011 a-c) zijn deze onafhankelijk opgestelde modellen geijkt aan de productiegeschiedenis van de velden ('History Match') en zijn nieuwe prognoses voor de bodemdalingssnelheid gemaakt op basis van de laatste geomechanische inzichten. Daarnaast zijn nieuwe prognoses van de bodemdalingssnelheid gemaakt voor de genoemde "bestaande" velden. Voor deze gasvelden (Ameland, Anjum, Ezumazijl en Metslawier) is gebruik gemaakt van – aan de productie-historie geijkte - dynamische reservoir modellen, die door de NAM beschikbaar zijn gesteld. TNO heeft de beschrijving van die modellen geverifieerd en in orde bevonden.

De lange reeksen bodemdalingmetingen bij Ameland en Anjum, Ezumazijl en Metslawier zijn door TNO gebruikt om op basis van de laatste geomechanische inzichten een fysisch onderbouwde methodiek te ontwikkelen, waarbij de gemodelleerde bodemdaling goed overeenkomt met de gemeten bodemdaling boven deze velden. Deze methodiek is vervolgens gebruikt om prognoses voor de bodemdaling(snelheid) te berekenen voor de velden Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Lauwersoog-Centraal, -Oost, -West en Vierhuizen. Ten slotte is de belasting van deze velden op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag bepaald.

Indeling rapport

In dit rapport worden de gevolgde werkwijze en het ontwikkelde modelinstrumentarium beschreven, evenals de toepassing daarvan op de voorkomens Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Lauwersoog-Centraal, -Oost, -West en Vierhuizen.

In Hoofdstuk 2 worden de dynamische reservoir modellen voor de voorkomens Ameland, Anjum, Ezumazijl en Metslawier beschreven zoals deze beschikbaar zijn gesteld door de NAM. Hoofdstuk 3 gaat in op de mogelijke bijdrage van de Ameland aquifers aan de compactie en bodemdaling. Hoofdstuk 4 beschrijft de

onafhankelijke, door TNO ontwikkelde dynamische modellen voor de voorkomens Nes, Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen en de ijking van deze modellen aan de productiegeschiedenissen. In hoofdstuk 5 volgt de ontwikkeling van het modelinstrumentarium waarbij de geomechanische parameters bepaald worden door middel van ijking van de gemodelleerde bodemdaling bij Ameland en Anjum, Ezumazijl en Metslawier aan de aldaar gemeten bodemdaling. In hoofdstuk 6 worden de onzekerheden in de geomechanische modellering in kaart gebracht, welke in Hoofdstuk 7 nader worden besproken waarna conclusies over de geomechanische calibratie worden getrokken. In Hoofdstuk 8 wordt de bodemdaling en de Belasting per veld tot ~2050 bepaald en in hoofdstuk 9 wordt tenslotte de daaruit berekende Belasting getoetst aan de beschikbare Gebruiksruimte in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.

2 Dynamische reservoirmodellen van de NAM

2.1 Inleiding

Het ontwikkelen van dynamische reservoirmodellen is bijzonder tijdsintensief. In 2008/2009 (Muntendam-Bos et al, 2010) heeft TNO-AGE op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie en het Staatstoezicht op de Mijnen voor de onder het Rijksprojectbesluit vallende Waddenzeevelden dergelijke reservoirmodellen ontwikkeld voor het maken van onafhankelijke controleberekeningen van de bodemdalingssnelheid (S) in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Aangezien de "bestaande" velden (Ameland, Anjum, Ezumazijl en Metslawier) niet onder het Rijksprojectbesluit vallen zijn deze velden destijds buiten beschouwing gelaten en is in de prognoses van de bodemdalingssnelheid gebruikt gemaakt van de door de NAM aangeleverde waarden voor deze velden, welke gebaseerd waren op de door de NAM ontwikkelde reservoirmodellen.

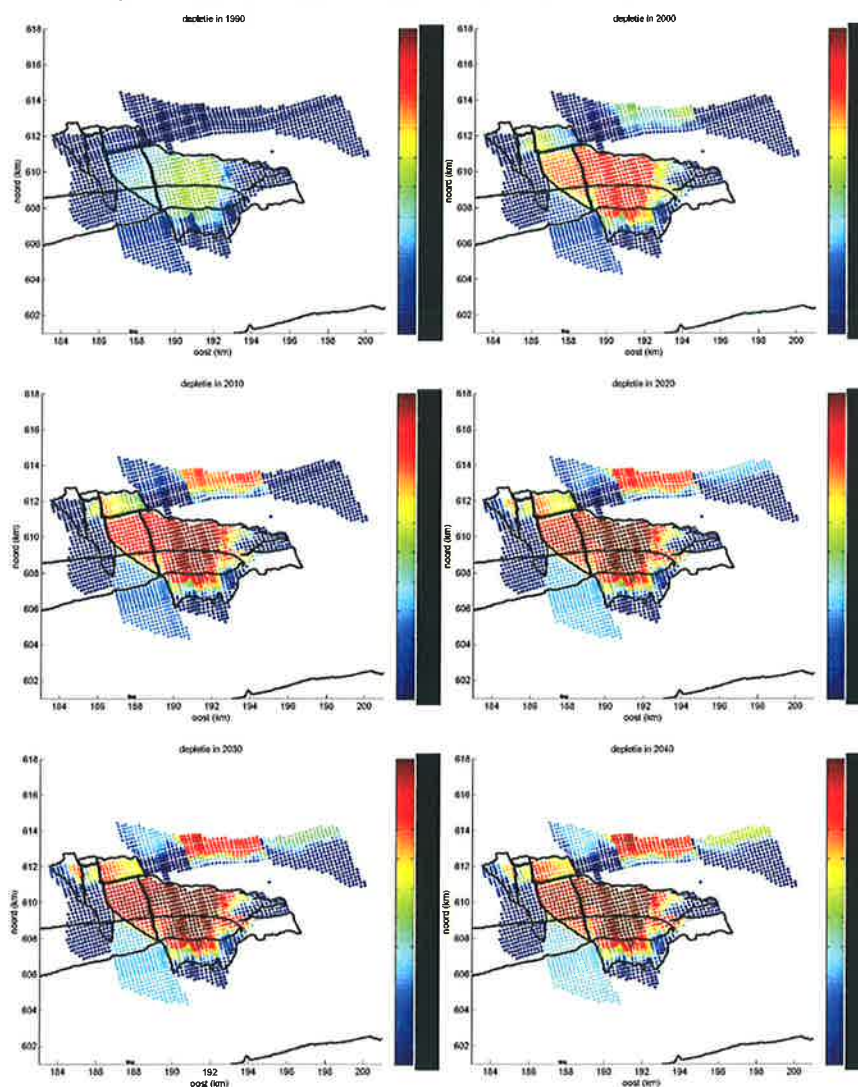
In het traject voorafgaande aan het verzoek tot wijziging winningplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011" en wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011" zijn door de NAM, in nauw overleg met het Staatstoezicht op de Mijnen en TNO-AGE, deze reservoirmodellen aangepast aan de nieuwste inzichten en gekalibreerd aan de recentste productiegeschiedenissen. Derhalve heeft TNO-AGE samen met het Staatstoezicht op de Mijnen besloten om de nadruk van de in dit rapport gepresenteerde controleberekeningen te leggen op de Waddenzeevelden en het geomechanische modelinstrumentarium dat op basis van de bodemdalingsgeschiedenis van de bestaande velden is ontwikkeld. Wel heeft TNO-AGE de reservoirmodellen van de NAM uitvoerig geverifieerd.

2.2 Ameland

Het dynamische reservoirmodel van de NAM voor Ameland bevat het gasveld Ameland en de aanliggende aquifers (Figuur 2-1). De modelresultaten betreffen de drukdaling (drukdepletie) en bestaan uit een deel dat geijkt is aan de depletiegeschiedenis ('History Match' tot 2010) en een deel met de voorspelling van de reservoirdrukken ten gevolge van het productieprofiel uit het voorgestelde wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011".

Het model laat een snelle depletie van het centrale deel van het veld zien. De bodemaquifers depleren volledig mee met de gasvoerende delen. Gebaseerd op ervaring met de ijking van de gemodelleerde bodemdaling ten gevolge van andere dynamische modellen aan de gemeten bodemdaling is er bij het basis model voor gekozen om de zuidelijke aquifer in mindere mate dan het gasvoerende gedeelte van het veld te laten depletieren (ongeveer 1/3 van de depletie van het gasvoerende deel). In Hoofdstuk 3 wordt de waarschijnlijkheid van deze gedeeltelijke depletie getoetst.

In de overige aanliggende aquifers is geen depletie gemodelleerd.



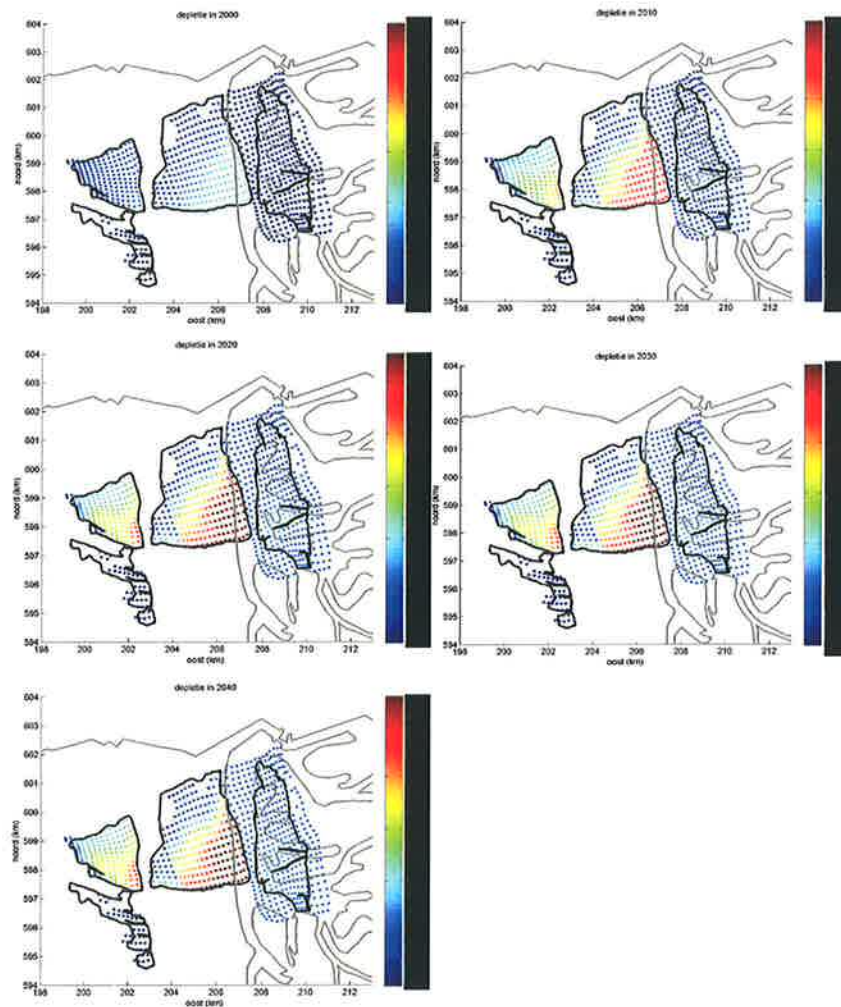
Figuur 2-1. Drukdepletie (in bar) in het Ameland gasveld vanaf 1990 tot eind 2009 voor het deel dat geijkt is aan de productiegeschiedenis van het veld, en vanaf 2010 tot 2040 voor het voorspellende deel. Dit model bevat geen depletie in de westelijke aquifer en gedeeltelijke depletie van de aquifer ten zuiden van Ameland.

2.3 Anjum, Ezumazijl en Metslawier

2.3.1 Anjum

Het dynamisch model van Anjum bevat het gasveld Anjum en de aanliggende aquifers. Het veld diept naar het noordwesten en heeft een GWC op 3867 m. De history matching procedure (Das, 2011) en de zeer kleine hoeveelheid water welke wordt meegeproduceerd geeft aanleiding tot de veronderstelling dat er bij het Anjum veld geen aquiferdepletie is. De logische verklaring voor een inactieve aquifer is de combinatie van een zone met lage permeabiliteiten rond het Gas-

Water-Contact (GWC), water gebonden aan de reservoirkorrels en de aanwezigheid van Gas onder het GWC. Hierdoor vindt alleen drukdaling in het zuidoostelijke deel van het veld plaats (Figuur 2-2).



Figuur 2-2. Drukdepletie (in bar) in de Anjum, Ezumazijl en Metslawier gasvelden vanaf 2000 tot eind 2009 voor het deel dat geijkt is aan de geschiedenis van het veld, en vanaf 2009 tot 2040 voor het voorspellende deel. Dit model bevat geen depletie in de aquifers van de velden.

Ook dit model bestaat uit een deel dat geijkt is aan de depletiegeschiedenis (van 1997 tot halverwege 2009) en een deel dat de voorspelling op basis van het productieprofiel in het voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011" bevat voor de jaren vanaf halverwege 2009 tot 2041.

2.3.2 *Ezumazijl*

Het dynamische model van Ezumazijl bevat het gasveld Ezumazijl en de aanliggende aquifers (Figuur 2-2). Evenals Anjum bevat het model geen depletie in de aanliggende aquifers (voor verklaring zie paragraaf 2.3.1). Het modelresultaat bestaat uit een deel dat geijkt is aan de depletiegeschiedenis (vanaf 1999 tot halverwege 2009) en een deel dat de voorspelling op basis van het productieprofiel in het voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011" bevat voor de jaren vanaf halverwege 2009 tot 2051. De depletie in 2005 is vooral geconcentreerd in het midden van het veld. Vanaf 2010 tot en met 2050 wordt volgens het NAM-model vooral het zuiden van het veld gedepleteerd.

2.3.3 *Metslawier*

Het dynamische model van Metslawier bevat het gasveld Metslawier en de aanliggende aquifers (Figuur 2-2). Het model bevat evenals Anjum en Ezumazijl geen depletie van de aanliggende aquifers (zie paragraaf 2.3.1). Het modelresultaat bevat een deel dat geijkt is aan de depletiegeschiedenis (vanaf 1997 tot halverwege 2009) en een deel dat de voorspelling op basis van het productieprofiel in het voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011" bevat voor de jaren halverwege 2009 tot 2051. De depletie in 2005 is vooral geconcentreerd in het midden van het veld. In 2010 en tot en met 2050 word vooral het zuiden van het veld gedepleteerd.

3 Mogelijke bijdrage Ameland aquifers aan compactie en bodemdaling

3.1 Inleiding

Het gasveld Ameland veld staat mogelijk in verbinding met relatief grote aquifers, met name in zuidelijke richting. De vraag is in hoeverre deze aquifers zijn meegedaald met de drukdaling in het gasvoerende reservoir gedurende de productieperiode van 1986 tot nu. Een schatting daarvan is belangrijk om te bepalen, of er ook een bijdrage aan de bodemdaling geleverd kan zijn.

TNO heeft voor Ameland geen eigen numeriek dynamisch reservoirmodel gebouwd. De vraag is daarom onderzocht met behulp van analytische functies uit de reservoir engineering literatuur [Hagoort, 1988]. Het doel was om de plausibiliteit van een bijdrage vanuit de aquifers na te gaan en niet om die echt te kwantificeren. Daarvoor zou een numeriek model nodig zijn, zoals de NAM heeft gebruikt in haar studie.

3.2 Waarnemingen

3.2.1 Drukmetingen

Figuur 3-1 toont de materiaalbalans grafiek voor de blokken E11 en E15 van het Ameland veld, die samen het leeuwendeel van het gasvoerende reservoirvolume bevatten.

Er is vanuit de drukmetingen en de materiaalbalans geen aanwijzing te vinden voor een sterke aquifer activiteit (althans niet gekoppeld aan deze beide blokken).



Figuur 3-1 p/Z plot van blok E11-E15

3.2.2 Productie gas en water

Figuur 3-2 toont de in de diverse Ameland putten gemeten hoeveelheden geproduceerd gas en water. In alle gevallen is er sprake van in de tijd afnemende

waterproductie, meestal proportioneel met de afnemende gasproductie. De conclusie moet zijn, dat de waargenomen waterproductie het gevolg is van condensatie van waterdamp uit de gasstroom, en niet van water dat vanuit de aquifer de productieputten bereikt heeft (noch via stijging van de watertafel, noch via 'doorschieten' van water via preferentiële paden (high perm streaks) vanuit de aquifer richting productieputten).

3.2.3 Conclusie uit waarnemingen

De conclusie uit de gemeten drukken en de productiehoeveelheden gas en water is, dat er geen aanwijzingen zijn voor sterke aquiferactiviteit, d.w.z. een dermate snelle stijging van de watertafel, dat door de 'zuigerwerking' daarvan de druk in het gasveld merkbaar ondersteund is. Zelfs waterdoorbraak in individuele putten is niet waargenomen.

Echter, vanwege de lage compressibiliteit van water kan een geringe expansie van het watervolume in een aquifer al een grote drukdaling veroorzaken. De vraag blijft dus of het mogelijk is dat de Ameland aquifer toch significant in druk is gedaald, waarbij de waterexpansie dermate beperkt is gebleven dat die niet te detecteren is geweest in het druk verloop in het gasvoerende volume.

3.3 Analyse aquifer

3.3.1 Tijdconstante

In een lineaire aquifer met lengte L , die aan een zijde in open verbinding staat met een snelle 'pressure sink' (in casu depleterend gasveld), ontstaat een drukgolf die zich voortplant tot aan de buitengrens van de aquifer op afstand L . Vanaf dat moment ontstaat er een zgn. *semi steady state* situatie, waarin de druk in de aquifer uniform daalt volgens een e -macht. De tijdschaal t_{sss} van de transitie naar semi-steady state ('sss') wordt gegeven door (Hagoort, p. 136):

$$t_{\text{sss}} = 0,2 L^2 \phi \mu c / k \quad (1)$$

met:

L lengte lineaire aquifer [m]

ϕ porositeit [-]

μ viscositeit formatiewater [Pa.s]

c compressibiliteit aquifer, gesteente + water [Pa⁻¹]

k permeabiliteit aquifer [m²]

Voor de volgende parameter set :

| | | | |
|---------|---------------------|------------------|-------------------------|
| L | 5000 | m | |
| ϕ | 0,15 | | |
| μ | $0,4 \cdot 10^{-3}$ | Pa.s | |
| c | $3 \cdot 10^{-10}$ | Pa ⁻¹ | gesteente (2)+water (1) |
| k (1) | 10^{-14} | m ² | (10 mD) |
| k (2) | 10^{-15} | m ² | (1 mD) |

geldt :

voor $k = 10 \text{ mD}$: $t_{\text{sss}} = 225$ dagen, ofwel 0,6 jaar,

voor $k = 1 \text{ mD}$: $t_{\text{sss}} = 2250$ dagen, ofwel ca. 6 jaar.

De aan boorkernen gemeten permeabiliteit in het Ameland veld beweegt zich tussen 1 en 10 mD. Zoals het rekenvoorbeeld laat zien, introduceert dit al een aanzienlijke spreiding in de mogelijke uitkomsten voor t_{sss} . Het 'op gang komen' van een aquifer van 5 km lengte kan volgens deze analytische berekening een tijdschaal hebben ergens tussen 1 en 10 jaar.

3.3.2 Waterinflux in gasveld

Naast de tijdconstante kan met een analytisch model ook een schatting worden gemaakt van de hoeveelheid water, die gedurende de gasproductie vanuit de aquifer het gasveld binnengestroomd kan zijn. In Hagoort (p. 105) wordt daarvoor de volgende uitdrukking gegeven:

$$W_e(t_n) = U \sum_{j=0}^{n-1} \Delta p_j W_{eD} [t_D(t_n) - t_D(t_j)] \quad (2)$$

U is de aquifer constante die afhankelijk is van het type aquifer; Δp druk daling op elke tijd stap; t_D dimensieloze tijd, gedefinieerd door de aquifer functie. In dit model wordt de dimensieloze functie voor stroming in poreuze media gebruikt. De niet constante drukdaling in het Ameland veld is met gebruik van een "staircase" functie berekend. Elke stap stelt een quasi-instantane daling van de druk voor en berekent de bijbehorende water influx. De totale waterinflux is de som van de water influx uit alle individuele stappen tot aan het moment waarop de influx W wordt berekend.

Tabel 3-1 Input parameters voor de schatting van de waterinflux

| | Parameter | | Waarde |
|----|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1. | Morfologie reservoir/aquifer | <i>Angle of enchoachment</i> | 30 en 90 graden |
| | | Straal reservoir | 4000 m |
| | | Straal aquifer | 5000 tot 20000m |
| | Druk profiel | Uit put AWG-102 | (zie drukprofiel) |
| 2. | Compactie coëfficiënt | | |
| | | Comp. coëff (pore vol.) | 7.50e-5 bar ⁻¹ |
| | | Comp. coëff. (water) | 3.00e-5 bar ⁻¹ |
| | | Comp. coëff. (Total) | 1.05e-4 bar ⁻¹ |
| 3. | Porositeit | | 0,14 |
| 4. | Permeabiliteit | | 1, 5 en 10 mD |
| 5. | Dikte | | 110 m |

3.3.3 Morfologie reservoir/aquifer in blok E11-E15

De oorzaak van het drukverschil blijkt de structurele compartimentalisatie en de variërende reservoirkwaliteit van de Rotliegend zandsteen. Die twee factoren bepalen aanzienlijk het gebied van invloed en de effectieve radiaal (*angle of*



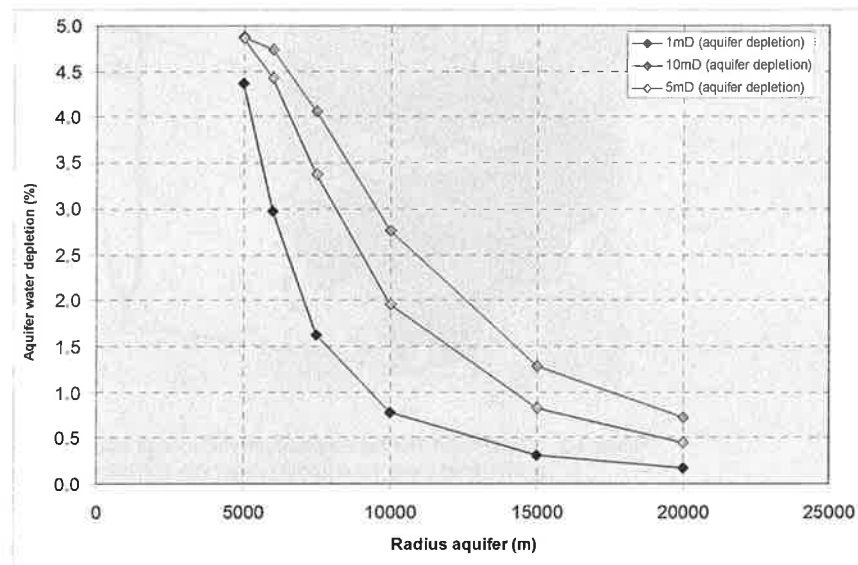
Figuur 3-2 Water- en gasproductie van putten uit het Ameland gasveld.

3.4 Conclusies en discussie

Uit een afschatting met behulp van analytische functies blijkt, dat de tijdconstante voor het op gang komen van drukdaling in de Ameland aquifer in de orde van 1 tot 10 jaar kan liggen. Dit is ook de tijdschaal, waarop compactie zal gaan optreden en een bijdrage kan leveren aan de gemeten bodemdaling.

De hoeveelheid water, die vanuit de aquifer het gasveld ingestroomd kan zijn is geschat op tussen de 0,2 en 4,9% van het oorspronkelijke watervolume in de aquifer. De meest waarschijnlijke uitkomst ligt dicht bij de genoemde ondergrens. In dat geval is het niet opmerkelijk, dat de p/Z plot geen significante drukondersteuning vanuit de aquifer laat zien.

Als slotopmerking: de gebruikte analytische modellen hebben een belangrijke beperking: zij beschouwen de overgang aquifer – gasveld als een scherpe overgang zonder overgangsweerstand voor stroming. In werkelijkheid bevindt zich daar een overgangszone (groter naar mate de permeabiliteit lager is). Een dergelijke overgangszone levert een extra stromingsweerstand voor waterinflux vanuit de aquifer [Hower & Jones, 1991]. In dat licht bezien moeten de analytisch berekende resultaten als 'worst cases' worden gezien.

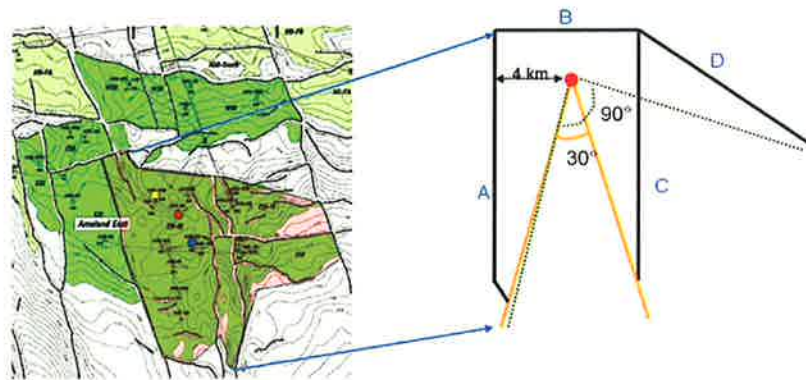


Figuur 3-4 Percentage aquifer-depletie voor permeabiliteiten van 1, 5 en 10 mD en een *enchrachment angle* van 90°.

encroachment, 0 tot 360°), waar het water uit de aquifer en in het reservoir kan stromen.

Het Ameland veld wordt door twee systemen van breuken doorsneden (Oost-West en Noordnoordwest-Zuidzuidoost oriëntatie). Stroming van gas tussen blokken is in principe mogelijk wanneer de afscheidende breuk niet-afsluitend is, en het breukverzet kleiner is dan de dikte van het reservoir (~95 m). Op basis van de geologie en de drukmetingen in Ameland-Oost zijn twee scenario's voor blok E11-15 in beschouwing genomen. Het eerste beschouwt A, B en C als afsluitende breuken, met een bijbehorende *angle of encroachment* van 30°, terwijl het tweede scenario de breuken A, B en D als afsluitend beschouwt met een *encroachment angle* van 90° (Figuur 3-3).

Ondanks deze mogelijkheid simuleert het hierbij behorende waterinflux model gewoon de regionale morfologie van een Rotliggend reservoir van 4 km straal, en een aquifer met straal van 5 tot 20 km. Het feit dat de water influx direct proportioneel is aan de *angle of encroachment*, maakt de berekening van andere scenario's mogelijk.



Figuur 3-3 (Links) Kaart van het Ameland gasveld met de locatie van de put AWG-102 (rood punt). Rood toont het mogelijke oppervlak van het reservoir. (Rechts) Schema van de twee mogelijke "angles of encroachment": 30 graden als breuken A, B en C afsluitend zijn; of 90 graden als breuken A, B en D afsluitend zijn. Locatie putten: (rood) AWG-102, (geel) AWG-104B; (blauw) AWG-106.

3.3.4 Resultaten

Figuur 3-4 toont de resultaten van de berekening van de waterinflux, uitgedrukt als percentage van het watervolume in de aquifer. In de figuur is te zien dat naarmate de permeabiliteit lager wordt, de relatieve aquifer depletie versus straal aquifer steiler is, omdat de beperkte doorlatendheid van het aquifer een kleiner en trager volume water treft. In het geval van blok E11-15, met een reservoir met een straal van 4 km, en een aquifer met een straal tussen 5 en 20 km, is een water influx van 4.7 tot 33.2 mln m³ (tussen 0,2% en 4,9% van het watervolume in de aquifer) met een bijbehorende aquifer- depletie te verwachten.

4 Dynamische reservoirmodellen van TNO

De initiële modellering van de Waddenzee velden is door TNO uitgevoerd in 2008 en 2009 en beschreven in (Muntendam-Bos et al, 2010). Gezien de zeer korte productiegeschiedenis van deze velden (minder dan 1 jaar ten tijde van modellering) is in deze modellering geen calibratie aan de historische productie-data gedaan, maar alleen een voorspelling aan de hand van het productieprofiel uit het vingerende winningsplan "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" gemaakt. Voor de Waddenzeevelden worden de volgende afkortingen gebruikt: Nes (NES), Moddergat (MGT), Lauwersoog-Oost, -West en -Centraal (LWO-O, LWO-W, LWO-C) en Vierhuizen (VHN). Naar het veld Vierhuizen wordt soms ook verwezen als Vierhuizen-Oost. In dit rapport wordt ook altijd het oostelijk deel van het Vierhuizen veld bedoeld

In dit hoofdstuk zal de calibratie worden beschreven van de dynamische reservoirmodellen van deze velden aan de historische produktie-data en de voorspelling van de verwachte drukken met de door NAM geplande productieprofielen uit het gewijzigde winningsplan "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011 rev.30-09-2011".

Ten tijde van modellering was voor de calibratie historische data beschikbaar tot en met 30 april 2010, met uitzondering van VHN (put VHN-1) en LWO-C (put LWO-2). Voor VHN waren de data beschikbaar tot en met 31 juli 2010. Het model van het voorkomen LWO-C (put LWO-2) is niet gekalibreerd aangezien dit veld op dat moment nog niet in productie was genomen. De historische data bestaan uit: productie data van gas op dagbasis en een beperkt aantal metingen van de (statische) druk in de put ('*bottom hole pressure*', BHP).

De hoeveelheid geproduceerd water is niet groter dan de hoeveelheid water die verwacht kan worden bij een met waterdamp verzadigd gasmengsel. Dit is meegenomen in de calibratie.

Op basis van de onzekerheden in de dynamische modellen en de impact van deze onzekerheden op de bodemdalingvoorspellingen zijn verschillende scenario's gedefinieerd. Hierbij is de voorspelling van de bodemdaling leidend geweest bij de keuze van deze scenario's.

De belangrijkste onzekerheid met een grote impact op de bodemdalingvoorspellingen is de mogelijke depletie van de aquifers. Daarom zijn de uitersten (geenreactie van de aquifer, resp. het instantaan reageren van de aquifer of 'water leg' op drukdalingen in het gasvoerende deel) als mogelijke scenario's gedefinieerd. Daarnaast speelt voor NES en MGT de onzekerheid in de GIIP nog een belangrijke rol. Tenslotte bestaat er bij MGT nog onzekerheid over de doorlatendheid van de interne breuk. Tabel 4-1 geeft een overzicht van alle beschouwde scenario's.

4.1 Modelcalibratie

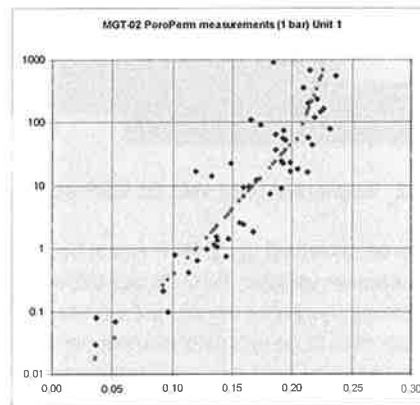
Als eerste stap is het basis model (base case) gekalibreerd. Dit is het scenario waarbij zo min mogelijk wordt afgeweken van de modellen zoals deze aan de hand van geologische data zijn opgesteld. Vervolgens zijn de verschillende scenario's gekalibreerd. Aangezien permeabiliteit de parameter met de grootste onzekerheid is, is vooral deze gebruikt om de modellen te matchen. Skin en rate-dependent skin

zijn niet gebruikt als calibratie parameters, hoewel die ook heel onzeker zijn. De reden hiervoor is dat alleen de statische reservoir druk gebruikt is voor de calibratie. De scenario's zijn in eerste instantie doorgerekend met de parameter-waarden van de base case en, waar nodig, aangepast om de match met de historische data te herstellen.

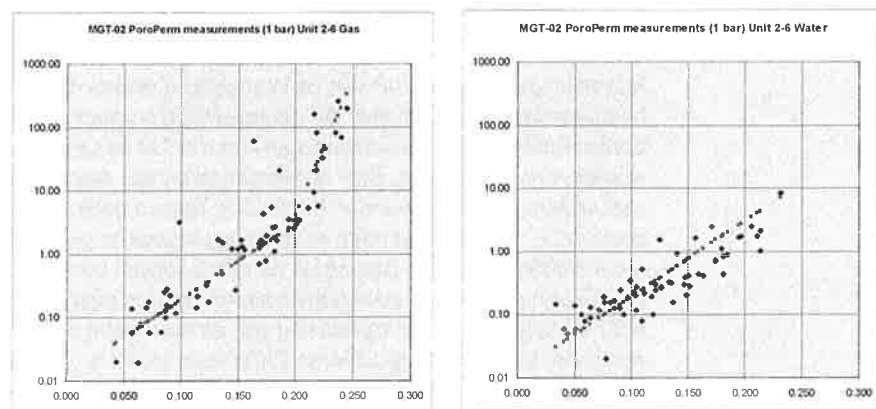
Tabel 4-1. Overzicht van de dynamische scenario's

| Voorkomen | Scenario | Naam scenario | Beschrijving |
|-----------|----------|------------------------------|---|
| NES | SC1 | Base Case | |
| | SC2 | Geen depletie in aquifer | Permeabiliteit in the aquifer = 0 om ervoor te zorgen dat er geen depletie (en compactie) in de aquifer optreedt. |
| | SC3 | Maximale depletie in aquifer | Maximum depletie in the aquifer en maximale water productie terwijl nog wel aan de huidige data voldaan wordt |
| | SC4 | Lage GIIP | Scenario met lage GIIP |
| | SC5 | Hoge GIIP | Scenario met hoge GIIP |
| MGT | SC1 | Base Case | Als bij Nes |
| | SC2 | Geen depletie in aquifer | Als bij Nes |
| | SC3 | Maximale depletie in aquifer | Als bij Nes |
| | SC4 | Lage GIIP | Als bij Nes |
| | SC5 | Hoge GIIP | Als bij Nes |
| | SC6 | F21 dicht | Interne breuk is uitgebreid en dichtgezet voor stroming zodat het MGT veld in 2 delen wordt opgesplitst |
| LWO-O | SC1 | Base Case | Als bij Nes |
| | SC2 | Geen depletie in aquifer | Als bij Nes |
| | SC3 | Maximale depletie in aquifer | Als bij Nes |
| LWO-W | SC1 | Base Case | Als bij Nes |
| | SC2 | Geen depletie in aquifer | Als bij Nes |
| | SC3 | Maximale depletie in aquifer | Als bij Nes |
| VHN | SC1 | Base Case | Als bij Nes |
| | SC2 | Geen depletie in aquifer | Als bij Nes |
| | SC3 | Maximale depletie in aquifer | Als bij Nes |

De uiteindelijke permeabiliteit (k_{base}) in de put en de gemeten permeabiliteiten uit de kernmetingen zijn weergegeven in Figuur 4-3.



Figuur 4-1 Porositeits- en permeabiliteitsmetingen uit de kernen (blauw) met de geknikte regressielijn (roze) voor TU1.



Figuur 4-2 Porositeits en permeabiliteitsmetingen uit de kernen (blauw) met de geknikte regressielijn (roze) voor TU2-6 (links voor de gaszone en rechts voor de waterzone).

Tabel 4-2 geeft een overzicht van de aanpassingen per scenario. Figuur 4-4 geeft de gesimuleerde en gemeten BHP voor de gekalibreerde modellen. Voor het matchen van de scenario's 2 en 4 zijn meer veranderingen nodig ten opzicht van het initiële model dan voor de andere scenario's. Met name bij scenario 2 is het moeilijk om voldoende support te krijgen om de druk op peil te houden. Een reden hiervoor is dat het zuidelijk deel van het gas beneden TUClay nauwelijks verbonden is met het deel van het veld waar de put staat (Figuur 4-3), doordat het veld daar beneden het gas-water contact (GWC) ligt waar de permeabiliteit nul is voor dit scenario (SC2). Er is een kleine verbindingzone, maar die heeft toevallig een lage permeabiliteit in de base case. Daarom is voor dit scenario de permeabiliteit vlak onder TUClay verhoogd tot een minimum van 100 mD.

4.2 Implementatie van de GIIP scenario's

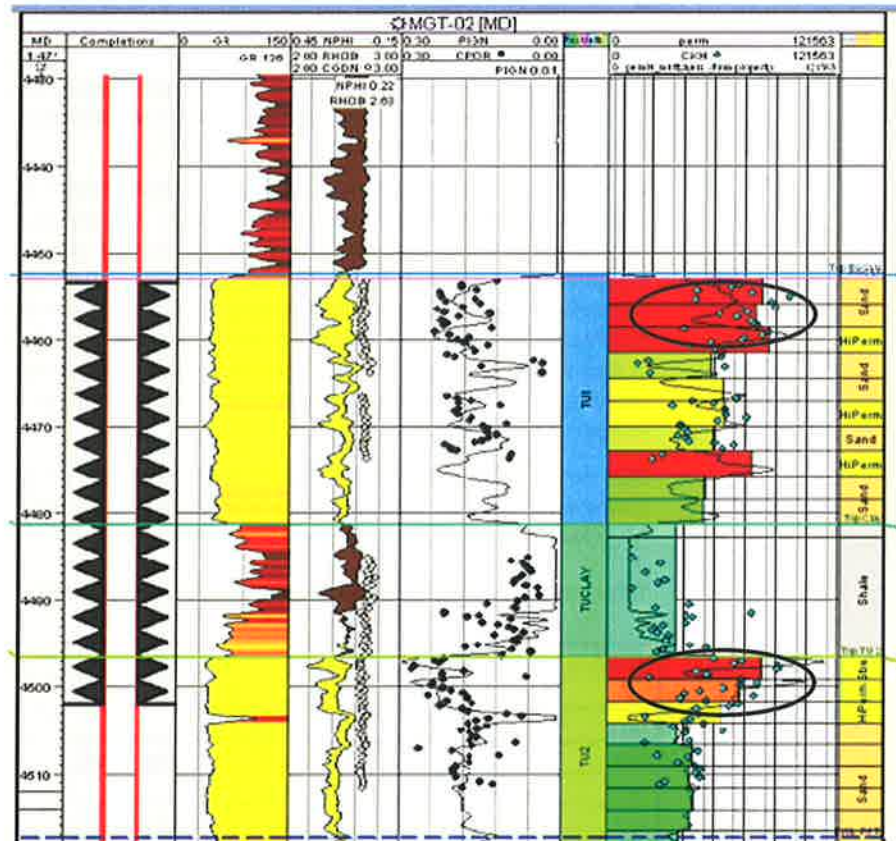
De onzekerheid in de GIIP wordt bepaald door onzekerheden in het bruto gesteente volume, NTG, porositeit en gassaturatie. De GIIP scenario's zijn geïmplementeerd via de netto-bruto verhouding (NTG).

Voor Nes is de grootste onzekerheid afkomstig van het gebruikte snelheidsmodel en daarmee het bruto gesteente volume. Voor Moddergat is er minder duidelijk sprake van één dominante onzekerheidsbron, maar wordt er ook van uitgegaan dat het bruto gesteente volume de belangrijkste onzekerheid is. Implementatie via het porie volume is niet toegepast omdat in dat geval de transmissibiliteit niet mee aangepast wordt. Indien de grootste verandering in het bruto gesteente volume is, dan is dat wel nodig.

4.3 Nes

Nes heeft de hoogste GIIP van de Waddenzee velden. De put in dit veld (MGT-2) heeft een hoge productiviteit. De gerealiseerde productie is hoger dan de oorspronkelijk geplande productie en kan met het basis model niet nagebootst worden. Om de gemeten BHP te reproduceren zou de permeabiliteit onrealistisch veel verhoogd moeten worden (factor 20). Een vergelijking van de permeabiliteit zoals deze in kernen gemeten is en de gesimuleerde permeabiliteit laat echter een grote discrepantie zien. Daarom is de relatie tussen porositeit en permeabiliteit (poro-perm relatie) opnieuw geanalyseerd. Daaruit blijkt dat, net als eerder voor MGT-01 is gebeurd, een opsplitsing van de poro-perm relatie voor de verschillende eenheden in de Boven Slochteren Zandsteen zinvol is. De Boven Slochteren Zandsteen bestaat uit de eenheden TU1, TUClay en TU2 tot en met TU6 (Muntendam-Bos et al., 2010). De splitsing is gemaakt tussen TU1 versus TU2-6. TUClay is geen gasvoerend reservoirgesteente. Figuur 4-1 en Figuur 4-2 tonen de nieuwe poro-perm relaties. Voor TU1 is geen opsplitsing in de waterzone versus de gaszone gemaakt zoals voor TU2-6, omdat er geen kernen in de waterzone in TU1 zijn genomen.

Ondanks deze aanpassingen is de gesimuleerde permeabiliteit niet in overeenstemming met de permeabiliteit (onder in situ stress condities) uit de kernen, met name vlak onder kleilagen. De kernpermeabiliteit was een orde van grootte hoger dan de permeabiliteit volgens de gemodelleerde permeabiliteit. Een mogelijke verklaring voor deze extreem hoge permeabiliteit ligt in de vorming van secundaire permeabiliteit als gevolg van uitloging (Muntendam-Bos et al, 2010). Bovendien was uit PLT (Production Logging Tool) metingen van juni 1998 gebleken dat 80% van de productie vanuit TU1 de put instroomt, met name uit het bovenste deel van TU1. Daarom is de permeabiliteit van deze lagen aangepast ten opzichte van de permeabiliteit zoals deze uit de (nieuwe) poro-perm relaties was afgeleid.



Figuur 4-3 Uiteindelijk gebruikte basis permeabiliteit (k_{base}) voor Nes samen weergegeven met de kern permeabiliteit. De ellipsen geven aan waar handmatig de permeabiliteit is aangepast.

4.4 Moddergat

Bij het simuleren van SC1, blijken met het basis model de gemeten drücken behoorlijk goed gereproduceerd te kunnen worden.

Opmerkingen:

- Vergeliken met de oorspronkelijke simulatie in 2008 is de GIIP veranderd omdat er gebruik gemaakt is van nieuwe saturatie-hoogte functies.

- De eerste vier drukmetingen zijn niet meegenomen in de model calibratie, omdat de NAM heeft aangegeven dat deze punten niet betrouwbaar zijn.
- De poro-perm relatie voor Moddergat was al aangepast en opgesplitst in 2008. De gebruikte relatie voor TU1 was anders dan voor TU2-6. In de documentatie (Muntendam-Bos et al, 2010) wordt dit overigens alleen vermeld bij het hoofdstuk over reservoir engineering en niet bij de petrofysische evaluatie.

Voor Moddergat is een van de belangrijkste onzekerheden de breuk in het midden van het veld (SC6). Twee zaken zijn onduidelijk. Ten eerste, loopt de breuk door tot de rand van het veld zoals NAM aanneemt of stopt de breuk zoals ons model aangeeft. Ten tweede, is de breuk *sealing* (doorlatend) of niet. NAM heeft uit model calibratie afgeleid dat de breuk waarschijnlijk niet doorlatend is. Uit onze model calibratie kan niet worden afgeleid of de breuk al dan niet doorlatend is. Openen of sluiten van de breuk gaf wel een verschil in gesimuleerde resultaten, maar voor beide gevallen kan een acceptabele match met de gemeten data verkregen worden.

SC4 (lage GIIP) lijkt de beste match te geven voor MGT in de snelheid van de opbouw van de druk. Dit zou erop kunnen wijzen dat de base case GIIP aan de hoge kant is.

Tabel 4-2. Overzicht van de benodigde aanpassingen ten opzichte van het basis model voor Nes om de scenario's te matchen met de historische data.

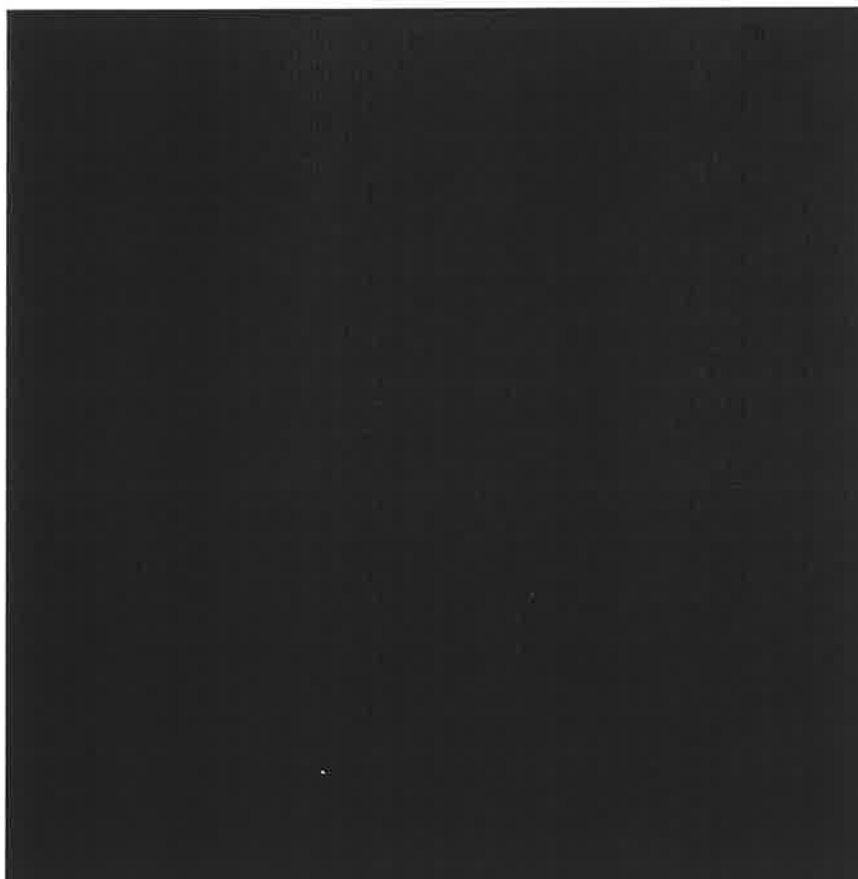
| Scenario | Belangrijkste aanpassingen | | Opmerkingen |
|----------|----------------------------|-------------------|---|
| | k_h/k_{base} | k_z/k_{base} | |
| SC1 | $1.2 * k_{base}$ | $0.01 * k_{base}$ | |
| SC2 | $2 * k_{base}$ | $0.01 * k_{base}$ | als diepte < GWC: $k_h = k_z = 0$ |
| SC3 | $0.8 * k_{base}$ | $0.8 * k_{base}$ | |
| SC4 | $4 * k_{base}$ | $0.1 * k_{base}$ | $GIIP = 0.8 * 19.73 = 15.78 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3 = 14.9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ (NAM scenario met lage GIIP: $15.9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ †) |
| SC5 | $0.8 * k_{base}$ | $0.01 * k_{base}$ | $GIIP = 1.2 * 19.73 = 23.677 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3 = 22.4 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ (NAM scenario met hoge GIIP: $25 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ †) |

† Mondelinge communicatie NAM 4-11-2010.

Tabel 4-3 Overzicht van de benodigde aanpassingen ten opzichte van het basis model om het scenario te matchen met de historische data (k_{pp} is de permeabiliteit zoals die is afgeleid uit de poro-perm relatie).

| Scenario | Belangrijkste aanpassingen | | Opmerkingen |
|----------|----------------------------|-----------------|--|
| | k_h/k_{pp} | k_z/k_{pp} | |
| SC1 | $0.6 * k_{pp}$ | $0.01 * k_{pp}$ | |
| SC2 | $0.6 * k_{pp}$ | $0.01 * k_{pp}$ | als diepte < GWC: $k_h = k_z = 0$ |
| SC3 | $0.6 * k_{pp}$ | $0.1 * k_{pp}$ | |
| SC4 | $1.2 * k_{pp}$ | $0.01 * k_{pp}$ | $GIIP = 0.8 * 12.25 = 9.8 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3 = 9.3 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ (NAM scenario met lage GIIP: $6.3 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ †) |
| SC5 | $0.4 * k_{pp}$ | $0.01 * k_{pp}$ | $GIIP = 1.2 * 12.25 = 14.7 \cdot 10^9 \text{ Sm}^3 = 13.9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ (NAM scenario met hoge GIIP: $13.2 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ †) |
| SC6 | $0.7 * k_{pp}$ | $0.01 * k_{pp}$ | |

† Mondelinge communicatie NAM 4-11-2010.



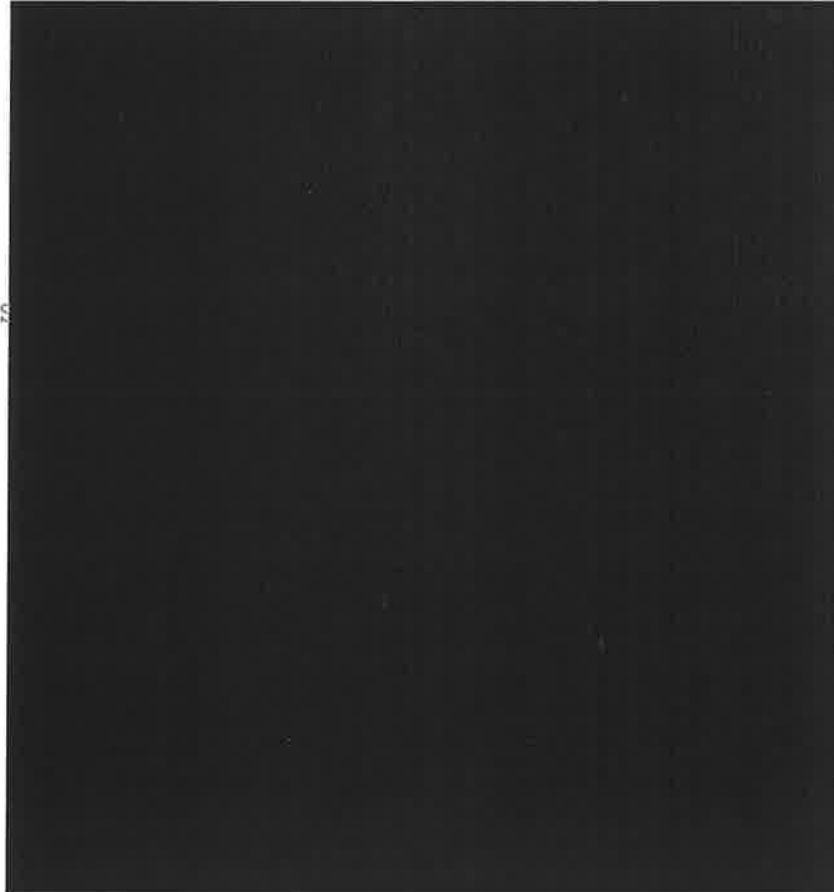
Figuur 4-4 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Nes.

4.5 Lauwersoog-Oost, -West, -Centraal en Vierhuizen

Ook voor deze velden is het aannemelijk dat de poro-perm relaties niet direct toepasbaar zijn, omdat deze voor alle kernen van TU1-TU6 samen zijn afgeleid (net als oorspronkelijk voor NES en MGT). Echter omdat het aantal kernen veel beperkter is voor LWO en VHN dan voor MGT of NES, zijn geen nieuwe relaties afgeleid, en bestond er meer vrijheid in het aanpassen van de permeabiliteit, ook wat betreft variatie over de diepte.

Voor de drie LWO voorkomens is de permeabiliteit onder het gas-water contact (GWC) met een factor 10 verlaagd ten opzichte van de permeabiliteit boven het GWC om de waterproductie bij de putten binnen het bereik van de gemeten waterproductie te brengen. Voor de LWO putten is deze verlaging in de permeabiliteit niet waargenomen in de kernen, omdat er bijna geen kernen beneden het GWC zijn. Echter, naar analogie van NES en MGT waar dit wel uit de kernen blijkt, is het redelijk om aan te nemen dat ook hier de permeabiliteit in de waterzone kleiner is dan in de gaszone.

Voor VHN was de analyse van een gas monster beschikbaar. De gas compositie is weergegeven in Tabel 4-4. Deze data is gebruikt om voor VHN een nieuwe set PVT data te berekenen.



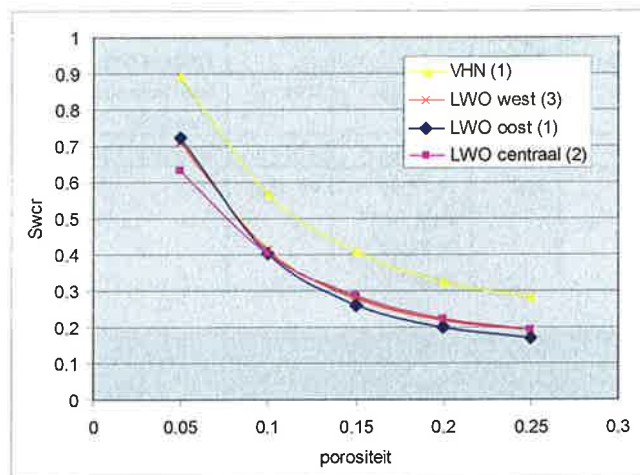
Figuur 4-5 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Moddergat (legenda zie Figuur 4-4).

De relatieve permeabiliteit, capillaire druk en Swcr (kritische watersaturatie) schaling zijn voor deze velden aangepast ten opzichte van de modellering in 2010. Voor elk veld is een eigen Swcr curve afgeleid. Deze curves zijn gebaseerd op de saturatie logs en verschillende residuele gas saturaties beneden GWC, maar per veld aangepast. Aangezien de gerealiseerde productie afwijkt van de geplande productie, is er voor gekozen om terug te gaan naar de Swcr curves zoals deze uit de originele data waren afgeleid. Deze zijn weergegeven in Figuur 4-6. Uiteindelijk is voor de consistentie besloten om met één enkele Swcr schalingscurve te werken voor alle vier de velden, namelijk die van LWO-W. Dit heeft tot gevolg dat voor VHN de GIIP hoger wordt. Met name beneden TUClay wordt de gas saturatie overschat. Deze verandering maakt het echter mogelijk om de historische data te matchen. Zonder verhoging van de GIIP was het voor VHN niet goed mogelijk om de gemeten drukken te reproduceren.

Tabel 4-4. Compositie en PVT eigenschappen van het gas, monster datum 06-mar-1994, in put VHN-1 (oppervlakte monster)

| Gascompositie (mol fracties, %) | | Overige parameters | | | |
|------------------------------------|---------|--------------------|--|--|--|
| C1 | 91,097 | | | | |
| C2 | 4,210 | | | | |
| C3 | 0,627 | | | | |
| i-C4 | 0,113 | | | | |
| n-C4 | 0,044 | | | | |
| i-C5 | 0,028 | | | | |
| n-C6 | 0,007 | | | | |
| C7+ | 1,651 | | | | |
| N2 | 2,186 | | | | |
| He | 0,037* | | | | |
| Totaal | 100,000 | | | | |

* Aangezien He niet in Petrel kan worden ingevoerd is dit getal bij N2 opgeteld.



Figuur 4-6 Swcr schaling afgeleid uit de saturatie- hoogte curves. LWO-West curve is gebruikt voor alle vier de velden.

De residuele gas saturatie is uniform op 0.15 gezet. Daarbij is er vanuit gegaan dat de geschatte S_g beneden GWC niet representatief is voor de S_{gr} . Voor K_{rw} @ S_{gr} is 0.2 gekozen om de mobiliteit van water laag te houden om voortijdige waterdoorbraak te voorkomen.

4.5.1 Lauwersoog-Oost

Om de drukken voor LWO-O te matchen zijn weinig aanpassingen nodig. De voornaamste veranderingen hebben te maken met het verlagen van de water productie, want die was aanvankelijk te hoog. Ook voor deze put bleek uit de PLT data (1997) dat het merendeel van de productie (80%) uit 2 hoog-permeabele stroombanen in TU-1 gehaald wordt.

SC3 is niet verder meegenomen, omdat in SC1 de aquifer al maximale drukverlaging laat zien.

Tabel 4-5 Overzicht van de benodigde aanpassingen ten opzichte van het basis model om het scenario te matchen met de historische data.

| Voor-komen | Sce-nario | Aanpassingen | | Opmerkingen |
|------------|-----------|--|---------------|--|
| | | k_h | k_z | |
| LWO-O | SC1 | 3 * k_{pp} als $\varphi < 0,14$ 9 * k_{pp} als $\varphi > 0,14$ | 0.01 * k_h | k_{pp} afhankelijk van porositeit (φ) $k < GWC = 0,1 * k > GWC$ (zowel in horizontale als verticale richting) |
| | SC2 | 1 * k_{pp} | 0.01 * k_h | als diepte < GWC: $k_h = k_z = 0$ |
| | SC3 | | | Niet verder meegenomen |
| LWO-W | SC1 | 1 * k_{pp} voor TU1 0,1 * k_{pp} voor TU2-6 | 0,001 * k_h | $k < GWC = 0,1 * k > GWC$ (zowel in horizontale als verticale richting) |
| | SC2 | 1 * k_{pp} | 0.01 * k_h | als diepte < GWC: $k_h = k_z = 0$ |
| | SC3 | | | Niet verder meegenomen |
| LWO-C | SC1 | | | Zelfde settings als LWO-O |
| VHN | SC1 | 10 * k_{pp} | 0.01 * k_h | GIIP verhoogd via initialisatie voor alle scenario's |
| | SC2 | 12 * k_{pp} | 0.01 * k_h | als diepte < GWC: $k_h = k_z = 0$ |
| | SC3 | 10 * k_{pp} als $\varphi < 0,14$ 20 * k_{pp} als $\varphi > 0,14$ | 0,1 * k_h | |



Figuur 4-7 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Lauwersoog-oost.

4.5.2 Lauwersoog-West

De calibratie voor Lauwersoog-West (LWO-3) blijkt lastig te zijn.

[Redacted]

[REDACTED]

In het oorspronkelijke model was de hoog-permeabele stroombaan in TU1 niet duidelijk gemodelleerd. Aan de andere kant waren porositeit en permeabiliteit van TU2 (onder de TU-clay) veel hoger dan uit de PLT test blijkt. Voor LWO-03 zijn er geen kernen in dit deel van de put, maar naar analogie met de andere putten is het redelijk om aan te nemen dat de poro-perm relatie in deze laag anders is en een lagere permeabiliteit geeft. Op basis daarvan zijn de permeabiliteiten aangepast zoals weergegeven in Tabel 4-5.

[REDACTED]

4.5.1 Lauwersoog-Oost

Om de drukken voor LWO-O te matchen zijn weinig aanpassingen nodig. De voornaamste veranderingen hebben te maken met het verlagen van de water productie, want die was aanvankelijk te hoog. Ook voor deze put bleek uit de PLT data (1997) dat het merendeel van de productie (80%) uit 2 hoog-permeabele stroombanen in TU-1 gehaald wordt.

SC3 is niet verder meegenomen, omdat in SC1 de aquifer al maximale drukverlaging laat zien.



Figuur 4-8 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Lauwersoog-west.

4.5.2 Lauwersoog-centraal

Dit veld is nog niet in productie genomen en dus zijn er geen productiedata om het model te verbeteren.

4.5.3 Vierhuizen

In de initiële run is de gesimuleerde daling in de statische druk groter dan de gemeten daling. Zelfs bij een toename van de permeabiliteit met een factor 10 kunnen de statische drukken niet worden gereproduceerd. Daarom is ervoor gekozen om de GIIP te verhogen via de Swcr schaling.



Figuur 4-9 Gemeten en gesimuleerde BHP en water productie voor de scenario's voor Vierhuizen.

4.6 Overzicht GIIP

Tabel 4-6 geeft een overzicht van alle GIIP's voor de Wadden I voorkomens.

Tabel 4-6 Overzicht GIIP waarden van de base case per veld

| Voor-komen | Put | TNO Eclipse Nov 2010 (10 ⁹ Nm3) | | |
|------------------|-------|--|--|--|
| NES | MGT-2 | 18.6 | | |
| MGT ¹ | MGT-1 | 11.6 | | |
| LWO-O | LWO-1 | 2.39 + 0.32 = 2.71 | | |
| LWO-C | LWO-2 | - | | |
| LWO-W | LWO-3 | 2.64 | | |
| VHN | VHN-1 | 1.74 + 1.92 = 3.66 | | |

¹ Niet gesplitst in noord en zuid deel van het veld.

² Aangezien de *shut-in* tijden verschillend zijn en er niet getracht is om uit de build-up de echte statische druk te schatten, hebben deze waarden een beperkte betrouwbaarheid.

³ Mondelinge communicatie NAM 4-Nov-2011.

4.7 Analyse van de voorgestelde productieprofielen

Niet alle gecalibreerde scenario's zijn gebruikt voor het analyseren van productieprofielen zoals geprognosticeerd in de voorgestelde "wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011 ver. 30-09-2011". Voor sommige scenario's wordt de productie niet gehaald. Voor andere scenario's treedt

voortijdig waterdoorbraak op. Per veld is vermeld welke scenario's wel en niet zijn meegenomen.

Remweg scenario's

Om te kunnen beoordelen hoe de drukken en de bodemdaling zich ontwikkelen in geval van ingrijpen zijn de zogenaamde 'remweg scenario's' doorgerekend. Dit houdt in dat per 1-1-2016 de productie wordt stopgezet in alle Wadden I velden. Deze variant is doorgerekend voor het scenario met de meeste en de minste bodemdaling.

4.7.1 Nes

Voor Nes wordt in geen van de gedraaide scenario's de geprognosticeerde productie gerealiseerd (Tabel 4-7). De GIIP in scenario's 1 t/m 4 is lager dan de geprognosticeerde productie. Alleen bij scenario 5 is de GIIP voldoende hoog om de beoogde productie daadwerkelijk te kunnen halen, maar ook in dat geval wordt de productie niet gerealiseerd omdat niet alle gas produceerbaar is. Een deel van het gas zit in pockets beneden TUClay. Voor scenario's 3 en 4 zijn de resultaten niet gebruikt voor de bodemdalingberekening omdat de gerealiseerde productie te laag is om relevant te zijn. Bovendien lijken scenario's 3 en 4 niet realistisch aangezien deze scenario's water doorbraak voorspellen in de loop van 2011.

Waterproductie

Om een realistische voorspelling van de bodemdaling te krijgen is het nodig voor die scenario's waar waterdoorbraak optreedt, maatregelen te nemen. Aangezien waterdoorbraak altijd plaatsvindt beneden de kleilaag TUClay in TU2, worden de perforaties daar afgesloten in geval van waterdoorbraak. Dit is geïmplementeerd door bij een vloeistof-gas ratio van 0.00003 sm³/sm³ de onderste perforaties af te sluiten.

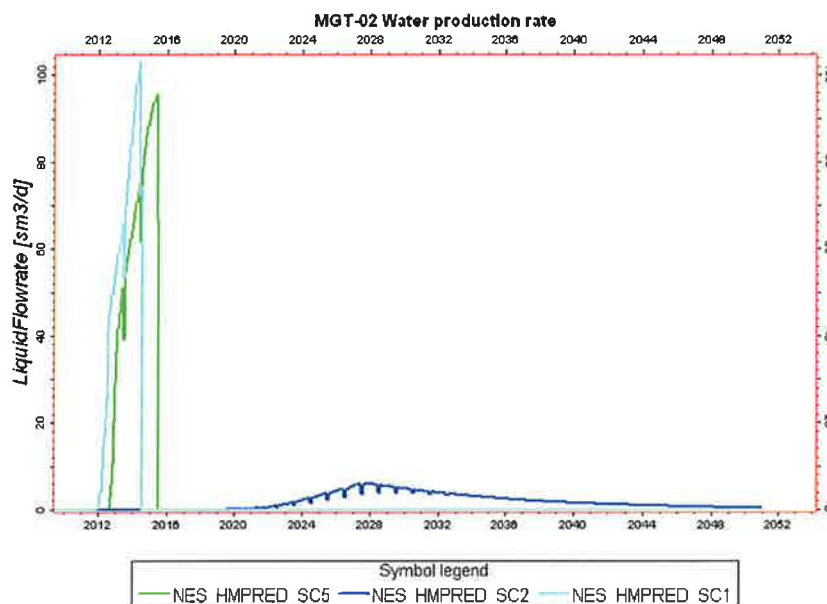
Tabel 4-7 Overzicht van de gerealiseerde productie per scenario voor Nes.

| Scenario | Gerealiseerde productie | | Opmerkingen |
|----------|---------------------------------|--------------------------------------|---|
| | 10 ⁹ sm ³ | % van de geprognosticeerde productie | |
| SC1 | 15.85 | 80 | Waterdoorbraak voorspeld begin 2012. Dit lijkt niet realistisch. |
| SC2 | 19.06 | 96 | |
| SC5 | 18.67 | 94 | |
| SC5A | 18.82 | 95 | Als scenario 5, maar met een extra put vanaf 2012 zoals voorgesteld in het winningsplan van 2011. |

Put MGT-03(SC5A)

In het gewijzigde winningsplan waarvoor instemming van de minister wordt gevraagd, is in het voorkomen Nes een extra put geïntroduceerd. Over het traject en de perforaties is geen informatie gegeven. Aangezien de details van de put weinig invloed zullen hebben op de uiteindelijke bodemdaling, zijn de volgende aannames gedaan. MGT-03 is ongeveer geplaatst zoals weergegeven in het voorgestelde "wijziging winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011

ver. 30-09-2011" en er is aangenomen dat de gehele eenheid TU1 is geperforeerd. De verdeling van productie over de beide putten is volgens het potentiële debiet. Verder is aangenomen dat MGT-03 medio 2012 in gebruik genomen wordt.



Figuur 4-10 Water productie voor scenario's 1, 2 en 5.

4.7.2 Moddergat

Voor Moddergat wordt in alle scenario's de geprognosticeerde productie gehaald en komt de bottom hole pressure niet in de buurt van de minimum BHP. In geen van de scenario's wordt meer dan 30 sm³/d water geproduceerd. Scenario 3 is onwaarschijnlijk omdat er water doorbraak plaatsvindt eind 2010/begin 2011, terwijl dit niet is waargenomen.

4.7.3 Lauwersoog en Vierhuizen

Voor de Lauwersoog en Vierhuizen voorkomens zijn alleen scenario 1 en 2 berekend, aangezien scenario 3 of identiek is aan scenario 1 of een onrealistisch snelle en grote waterdoorbraak geeft. Voor geen van de scenario's wordt de geprognosticeerde gas productie gerealiseerd (Tabel 4-8). De geproduceerde hoeveelheid gas is duidelijk lager dan de statische GIIPs, maar is dicht in de buurt van de GIIPs zoals deze was afgeleid uit de p/Z curves door de NAM (Tabel 4-6). De waterproductie is gecontroleerd op dezelfde wijze als voor Nes. Vanwege het relatief kleine belang voor de bodemdaling, zijn voor deze voorkomens geen pogingen gedaan om de modellen zo aan te passen dat de productie gehaald wordt.

Alleen de resultaten van scenario 2 zijn gebruikt voor de berekening van de bodemdaling omdat de productie daar het meest in de buurt komt van de geprognosticeerde productie.

Tabel 4-8 Overzicht van de gerealiseerde productie per scenario voor Lauwersoog en Vierhuizen.

| Reservoir | Scenario | Gerealiseerde productie | | Opmerkingen |
|-----------|----------|---------------------------------|--|--|
| | | 10 ⁹ sm ³ | % van de geprognosticeerde productie | |
| LWO-O | 1 | 1.98 | 68.8 | Dit scenario is niet waarschijnlijk omdat er in 2011 al water doorbraak zou moeten zijn. |
| | 2 | 2.15 | 74.6 | |
| LWO-W | 1 | 0.85 | 34.9 | |
| | 2 | 2.20 | 90.7 | |
| LWO-C | 1 | 0.14 | 81.5 | |
| | 2 | 0.17 | 99.6 | |
| VHN | 1 | 1.28 | 54.2 | |
| | 2 | 1.69 | 71.7 | |

5 Geomechanische methodiek en calibratie

In dit hoofdstuk wordt de geomechanische methodiek en de resultaten van de calibratie aan de bodemdalingmetingen beschreven.

5.1 Methodiek

5.1.1 Achtergrond

In de standaard geomechanische ((semi-)analytische) modelleermethoden wordt uitgegaan van een instantane vertaling van compactie in een reservoir ten gevolge van drukdaling door gasproductie naar bodemdaling aan het aardoppervlak. De vorm van de optredende bodemdalingssom 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 en Metslawier. De uit de gemeten hoogten afgeleide daling bij de peilmerken laten in de beginfase van de productie een zekere vertraging van de bodemdaling ten opzichte van de drukdaling zien. Dit gedrag is tot nu toe door de NAM gemodelleerd met een bilineair compactiemodel voor het reservoirgesteente (NAM, 2010). De meest recente peilmerkmetingen laten daarnaast een doorgaande trend in de bodemdaling zien terwijl een duidelijke vermindering van de productie heeft plaatsgevonden. Er lijkt sprake te zijn van een continuering van de bodemdalingssnelheid (zie ook Figuur 5-5 en Figuur 5-10). Aangezien het bilineaire compactiemodel strikt genomen geen tijdsrelatie tussen bodemdaling en drukdaling in het reservoir geeft, maar slechts een drukafhankelijke vermenigvuldigingsfactor is, kan dit model de recente waargenomen doorgaande trend niet goed modelleren.

Ook de vorm van de bodemdalingssom wordt met de standaard analytische geomechanische modelleermethoden niet goed gerepresenteerd. De waargenomen bodemdalingssom is in de tijd steeds smaller en dieper dan de geomechanische modellen voorspellen (NAM, 2010). De numerieke geomechanische modellen modelleren de vorm van de bodemdalingssom beter. In deze modellen kan het tijdsafhankelijke gedrag van het zoutpakket boven de gasvelden worden meegenomen. Nadeel van deze numerieke modellen is dat ze erg tijdsintensief zijn en er zeer veel mogelijke vrijheidsgraden zijn (onzekere parameters en aannamen).

5.1.2 Geomechanische modelinstrumentarium

In het hier ontwikkelde modelinstrumentarium wordt het waargenomen gedrag van de bodemdaling beschreven d.m.v. een convolutie van drie tijdsafhankelijke processen:

1. de respons van de drukverdeling in het reservoir ten gevolge van de gasproductie,
2. de respons van de compactie van het reservoirgesteente ten gevolge van de drukdaling in het gasreservoir, en
3. De respons van de bodemdaling ten gevolge van de compactie van het reservoirgesteente.

Proces 1 is gemodelleerd via de dynamische reservoirmodellen (zie de hoofdstukken 2 en 4). 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. Opgemerkt zij, dat het dynamische reservoirmodel een ruimtelijke mate van detail heeft ter grootte van de gebruikte gridcellen.

De met het gasvoerende reservoir verbonden watervoerende lagen (aquifer) behoren strikt genomen ook tot het dynamische reservoirmodel. Echter, de modelcalibratie is weinig tot niet gevoelig gebleken voor drukdaling in die watervoerende lagen. Metingen van de bodemdaling zijn waarschijnlijk de enige bron van informatie hierover.

Proces 2 kent twee varianten: In de eerste variant treedt een vertraging op tussen de drukdaling op porie-schaal en de compactie van de korrels, waarbij de mechanica op de schaal van korrelcontacten een rol speelt. Deze variant komt voort uit het feit dat het reservoir bij aanvang van productie een grotere dan hydrostatische druk bevatte (een overdruk).

In de tweede variant treedt een vertraging op tussen de gemiddelde drukdaling op het schaalniveau van grid cellen in het dynamische reservoirmodel en de drukdaling op porie-schaal. Dit is een proces met een diffusief karakter, waarvan de tijdschaal wordt bepaald door de details van het porie-systeem.

Beide proces-varianten spelen zich af binnen het reservoirgesteente. Op grond van de beschikbare meetgegevens is het niet mogelijk de beide processen te onderscheiden. Mogelijke treden ze beide op, waarbij hun gecombineerde respons weer de vorm van een convolutie aanneemt. In deze studie is er voor gekozen Proces 2 zo eenvoudig mogelijk, dwz. met een enkelvoudige tijdconstante, te modelleren. Dit wordt nader uitgewerkt in paragraaf 5.1.3.

Proces 3 heeft betrekking op alle vormen van tijdsafhankelijke gedrag buiten het reservoirgesteente. De enige kandidaat, waarvan het bekend is dat er tijdsafhankelijk geomechanisch gedrag optreedt, is steenzout. Proces 3 betreft het onder differentiële belasting langzaam stromen (kruipen) van de overliggende steenzout laag in respons op de compactie van het gasreservoir en de aquifer. Dit wordt nader uitgewerkt in paragraaf 5.1.4.

5.1.3 Diffusieve compactie van het reservoir gesteente

Compactie in een reservoir wordt bepaald door de dikte (volume) van het reservoir, de drukdaling in het reservoir en de compactiecoëfficiënt van het reservoirgesteente, welke een maat is voor de stijfheid van het reservoir.

Compactiecoëfficiënt

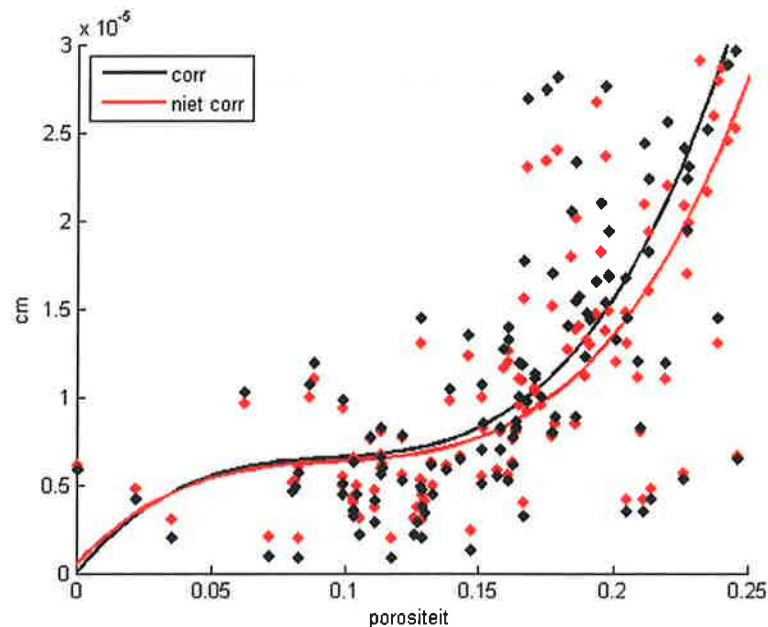
De compactiecoëfficiënt c_m is bepaald uit compactie-experimenten op Rotliegend kernmonsters van gasvelden in Noord Nederland. Deze zijn door de NAM beschikbaar gesteld. Deze compactiecoëfficiënten laten een duidelijke afhankelijkheid van de porositeit van het gesteente zien (Figuur 5-1). Het compactiemodel gebruikt in de geomechanische modellering wordt bepaald door middel van een regressiefunctie aan de laboratoriummetingen. Uitgaande van de pure metingen volgt de volgende relatie tussen de compactiecoëfficiënt (c_m) en de porositeit (ϕ):

$$c_m = 0.0056\phi^3 - 0.001615\phi^2 + 0.000165\phi + 5 \cdot 10^{-7} \text{ bar}^{-1} \quad (3)$$

Echter, uit eerdere onderzoeken is bekend dat de zuivere laboratoriummetingen niet representatief zijn voor veldcondities en gecorrigeerd zouden moeten worden voor de effecten van korrelcompressibiliteit (Geertsema, 1973) en belastingsnelheid (de Waal et al., 1988). Na toepassing van deze correcties volgt de regressiefunctie:

$$c_m = 0.00675\varphi^3 - 0.002075\varphi^2 + 0.00023\varphi \text{ bar}^{-1} \quad (4)$$

In de hier gerapporteerde controleberekeningen is uit gegaan van vergelijking (4). In haar voorstel wijziging winningsplan "Ameland ver. 30-9-2011", wijziging winningsplan "Anjum ver. 30-9-2011" en wijziging winningsplan "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011 rev.30-09-2011" geeft de NAM aan de ongecorrigeerde laboratoriummetingen als uitgangspunt voor het compactiemodel te nemen. Derhalve wordt in dit rapport vergelijking (3) gebruikt om de resultaten van de NAM uit deze voorstellen te reproduceren.



Figuur 5-1 Porositeits afhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt. De rode punten geven de niet gecorrigeerde waarden en de zwarte de gecorrigeerde punten. De rode lijn is de beste fit van de niet gecorrigeerde waarden (vergelijking 4), de zwarte lijn is de beste fit van de gecorrigeerde waarden (vergelijking 5).

Tijdsafhankelijk compactiegedrag

In een diffusiebenadering voor het compactiegedrag kan het compacterende volume van het gasreservoir (V_c) per grid cel worden gedefinieerd als:

$$V_c^i(t) = c_m^i \cdot V_b^i \cdot \Delta p^i(t_0^i) \cdot (1 - e^{-\frac{(t-t_0^i)}{\tau_{res}}}) \quad (5)$$

Waarbij c_m^i de compactiecoëfficiënt van de grid cell is, V_b^i het bulkvolume van de grid cel en Δp^i de drukdepletie in grid cell i op tijdstip t_0^i . De term $(1 - e^{-\frac{(t-t_0^i)}{\tau_{res}}})$ geeft de diffusie van de compactie in het reservoir waarbij τ_{res} de relaxatietijd van dit proces is. Voor elke tijdstap, werkt de drukdepletie van die tijdstap (t_0^i) door in de

volgende tijdstappen waarbij uiteindelijk met een vertraging met relaxatietijd τ_{res} de volledige compactie $c_m^l * V_b^l * \Delta p(t_0^l)$ ten gevolge van de druk puls op t_0^l in gridcell i optreedt.

Tijdsafhankelijkheid op reservoirniveau

Er zijn verschillende redenen denkbaar waardoor de compactie in een gasreservoir achter kan lopen op de drukkaling. Bijvoorbeeld: in een dynamisch reservoir model wordt de permeabiliteit over een reservoir grid blok gemiddeld waardoor zowel de hoge als de lage waarden verdwijnen. Echter, gas uit de reservoirdelen met een lagere permeabiliteit zal langzamer toestromen dan gas uit de meer permeabele zones. Voor de laag permeabele lagen treedt hierdoor een overschatting van de gasdruk op (berekend op basis van de gemiddelde permeabiliteit) en voor de hoog permeabele zones een onderschatting. Hierdoor zal de schijnbare (berekende) compactie van het laag-permeabele gesteente (bij gebruik van de gemiddelde gasdruk) hoger zijn dan in werkelijkheid. Dit heeft tot gevolg dat het reservoir zich in de beginfase schijnbaar stijver kan gedragen dan wordt gemodelleerd, terwijl in de eindfase drukkaling juist doorgaat in de laag permeabele zones. Dit is feitelijk een artefact van de modelleringsaanpak en geen fysisch verschijnsel.

Daarnaast kan, afhankelijk van de geologische drukgeschiedenis, de overdruk waaronder een veld staat bij aanvang van de productie een belangrijke rol spelen. Doordat de initiële gasdruk in de velden in en rond de Waddenzee (~570 bar) veel hoger was dan de hydrostatische druk kan onder sommige omstandigheden in eerste instantie slechts zeer beperkt compactie optreden. De compactiecoëfficiënt neemt vervolgens geleidelijk toe naarmate de drukkaling voortzet, totdat deze de in het laboratorium gemeten waarden bereikt. Deze afhankelijkheid kan in eerste orde goed worden beschreven met een diffusievergelijking (Waal en Smits, 1988).

Ook is het mogelijk dat het reservoirgesteente vertraagd reageert door de hoge snelheid van de optredende drukveranderingen in vergelijking met de eraan voorafgaande zeer langzame veranderingen over geologische tijden (een versnelling met gemiddeld zes orden van grootte). Dergelijk gedrag is bekend voor ondiepere kleilagen zoals beschreven in diverse grondmechanische publicaties.

Nader onderzoek naar de achterliggende reden voor het optreden van tijdsafhankelijkheid op reservoirniveau zal moeten worden uitgevoerd om te proberen tussen de verschillende processen te differentiëren. Mogelijke treden meerdere tergelijktijd op, waarbij hun gecombineerde respons weer de vorm van een convolutie aanneemt. In deze studie is er voor gekozen dit proces zo eenvoudig mogelijk, dwz. met een enkelvoudige tijdconstante, te modelleren

5.1.4 Implementatie van zoutkruip in de 'nucleus of strain' oplossing

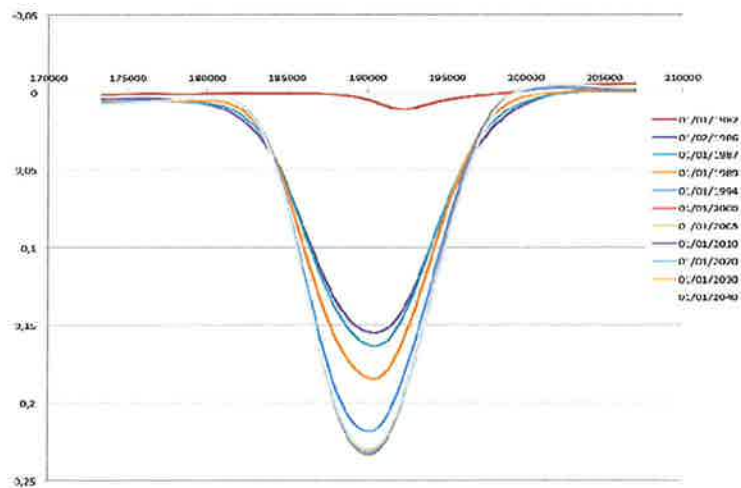
Boven de velden in Noord Nederland ligt een dik steenzout pakket, waarvan bekend is dat het onder differentiële belasting langzaam gaat stromen (kruipen). Het gedragsmodel voor kruip bestaat uit een lineaire en een niet-lineaire component:

$$\epsilon_{tot} = A_1 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) + A_2 \sigma \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \quad (6)$$

Voor bodemdaling ten gevolge van gaswinning is met name de lineaire component van belang. Dit is een direct gevolg van de lage differentiële spanningen die in het zout optreden. Bij hoge differentiële spanningen (zoals bv. rond cavernes bij zoutwinning) speelt met name de niet-lineaire component een belangrijke rol. Bij

gaswinning zijn de differentiële spanningen in het steenzout echter veel kleiner. Bij deze lage differentiële spanningen wordt de lineaire component dominant.

Doordat de gemiddelde stress buiten het reservoir niet verandert treden er alleen schuifspanningen op waardoor het kruipen van het zout geen *volume strain* veroorzaakt. Anders gezegd: het volume van de dalingskom blijft na de initiële elastische respons behouden, maar zal zich in de tijd herverdelen. Doordat de gaswinning onder de zoutlaag plaatsvindt, treedt er een synchrone verdieping in het centrum en versmalling aan de flanken van de bodemdalingskom op. Figuur 5-2 laat zien, hoe een bodemdalingskom, ontstaan door 500 bar depletie instantaan in 1986 aan het NAM numeriek model voor Ameland op te leggen, zich na de eerste elastische respons (paarse curve) verder ontwikkelt in de tijd. De herverdeling van het volume is duidelijk te zien aan het feit dat de kommen in opeenvolgende tijdstappen 'scharnieren' rond een vast punt (bij ca. 4 cm daling): binnen die straal daalt de kom verder door, maar buiten die straal stijgt de bodem. Volume-toename binnen de straal van het scharnierpunt en volume-afname buiten die straal compenseren elkaar.

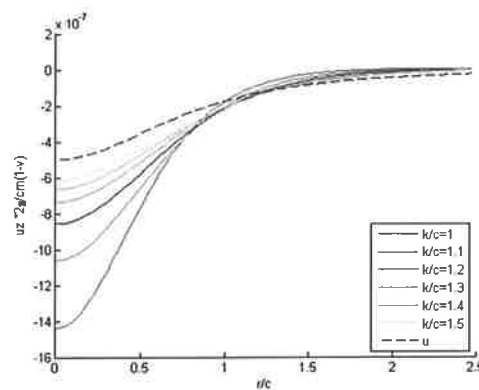


Figuur 5-2. De berekende komvormen van het GeoMec model voor een West-Oost doorsnede over het eiland Ameland

Het systeem relaxeert vanuit een metastabiele tussensituatie (direct na de elastische respons) naar een stabiele eindsituatie. Deze wordt niet bepaald door de sterkte van de (lineaire) zoutkruip, maar naast de elastische eigenschappen van de overliggende lagen door het hydrostatische evenwicht binnen het zout. De relaxatietijd (τ) waarmee de stabiele eindsituatie wordt bereikt is – binnen een gegeven elastisch model - omgekeerd evenredig met de sterkte van de lineaire kruip (de factor A_2 in verg. (6)), anders gezegd: hoe meer 'fluide' het zout wordt verondersteld, des te eerder wordt de stabiele eindsituatie bereikt.

Tot op heden kan zoutkruip alleen expliciet in numerieke modellen worden meegenomen in de berekening van bodemdaling. Er is geen simpele analytische oplossing voor het modelleren van zoutkruip. Dit is echter wel wenselijk aangezien numerieke methoden erg veel tijd kosten, waardoor een goede scenarioanalyse praktisch onmogelijk is.

Om tot een analytische benadering in een 'nucleus of strain' oplossing te komen is in dit onderzoek gebruik gemaakt van de Van Opstal (1974) methodiek. Van Opstal (1974) formuleert een nucleus oplossing door de verticale beweging van de bodem op te splitsen in een analytische oplossing voor een halfruimte (Geertsema, 1973) en een correctie daarop voor een rigide fundament op diepte.



Figuur 5-3. Nucleus of strain relatie tussen de diepte van het rigide fundament (k) en de diepte van het reservoir (c). De Geerstema oplossing is gegeven door u .

De diepte van het rigide fundament bepaald de vorm van de bodemdalingskom: des te ondieper het fundament ten opzichte van het reservoir, des te smaller en dieper wordt de bodemdalingskom (Figuur 5-3). Dit kenmerkende aspect van de Van Opstal (1974) oplossing kan worden gebruikt om het intrinsieke gedrag van zoutkruip in een analytische oplossing na te bootsen. Door de nucleus of strain oplossing van Van Opstal tijdsafhankelijk te maken, waarbij het fundament in de tijd steeds dichterbij het reservoir komt te liggen, ontstaat een zich in de tijd versmallende en verdiepende kom:

$$c/k(t) = c/k(0) + d(c/k) \cdot (1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{\text{zout}}}}) \quad (7)$$

waar c de diepte van het reservoir, k de diepte van het rigide fundament en τ_{zout} de relaxatietijd van het zout is. De beginwaarde van het fundament ($c/k(0)$) wordt bepaald door de elastische eigenschappen van alle over- en onderliggende gesteentelagen. De translatie van het fundament ($d(c/k)$) wordt bepaald door de elastische eigenschappen van alle over- en onderliggende gesteentelagen in de stabiele eindsituatie van het zout. De gekozen vorm van de tijdsafhankelijkheid is die van een relaxatieproces met een enkelvoudige tijdconstante. Fysisch is dit gerelateerd aan een visceus medium (i.c. steenzout), waarbinnen stress relaxatie optreedt. De respons in termen van bodemdaling wordt bepaald door dit relaxatieproces binnen een elastisch framework van overburden en underburden.

5.1.5 Red Flag methode

De "Red Flag" methode (Nepveu et al., 2010) is een statistische methode ontwikkeld om een groot aantal scenario's te confronteren met data en die scenario's te bepalen die de data het beste beschrijven. Hier is deze methode gebruikt om in combinatie met een Monte Carlo aanpak de parameterruimten voor de verschillende onzekere parameters integraal te onderzoeken. Uit de resultaten van de Red Flag methodiek kunnen de parameterwaarden waarmee de data het beste worden beschreven worden afgeleid. Op basis van deze parameterwaarden

en de variatie daarin kunnen prognoses voor de bodemdaling worden gemaakt voor zowel de gekalibreerde velden als voor de Wadden I velden (Nes, Moddergat, Lauwersoog-Oost, West, Centraal en Vierhuizen), inclusief hun betrouwbaarheid.

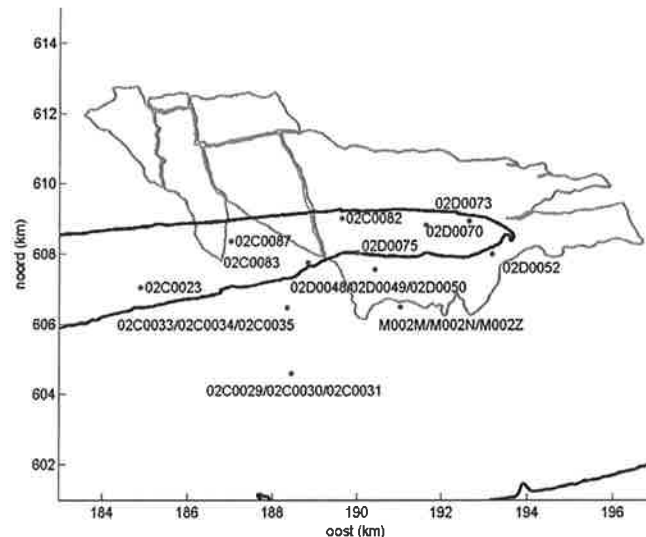
5.2 Ameland

In de volgende secties wordt eerst de bodemdaling van Ameland besproken. Daarna worden voor Ameland de geomechanische scenario's beschreven. Tot slot wordt het resultaat van de 'Red Flag' methode gepresenteerd in termen van de parameters, waarmee de bodemdaling van Ameland het beste te modelleren is.

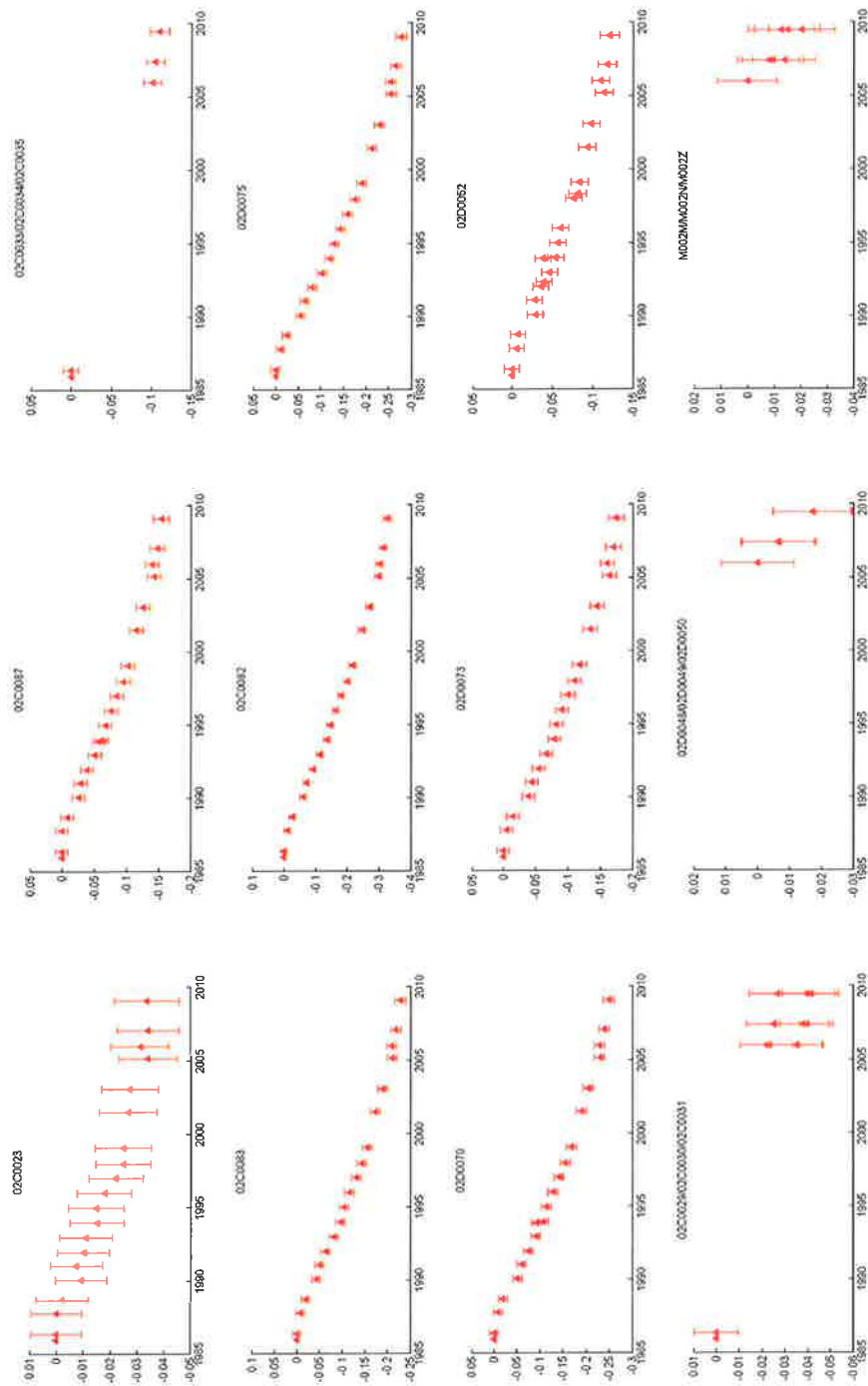
5.2.1 Bodemdaling Ameland

Het Ameland veld bestaat uit vier voorkomens: Ameland-Oost, Ameland-Westgat, Ameland-N7-FA en Ameland-Noord. Het Ameland veld is sinds 1986 in productie. Sinds de start van productie is er tot de meetcampagne van 2009 een maximale bodemdaling van ruim 32 cm op het eiland opgetreden. De bodemdaling neemt in de tijd toe tot ongeveer 33,5 cm voor het peilmerk 02C0082 in 2009. De meeste wadpunten zijn pas later, bij aanvang van de winning uit de Waddenzee velden, geïnstalleerd en laten een bodemdaling in de orde van enkele cm zien voor de periode 2006-2009. De meetgegevens binnen clusters van wadpunten zijn niet eenduidig. Dit wijst op initiële lokale zettingseffecten bij enkele van de wadpunten.

Figuur 5-5. laat de gemeten bodemdaling zien voor enkele peilmerken verdeeld over het eiland Ameland en voor twaalf wadpunten verspreid over vier locaties.



Figuur 5-4. Locaties van de peilmerkpunten van Figuur 5-5.



Figuur 5-5. Bodemdaling (m) voor acht peilmerkpunten in de tijd boven het eiland Ameland en voor vier clusters van 3 wadpunten. De locaties van de punten staan in Figuur 5-4.

Peilmerkonzekerheden

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 deviaties van de peilmerkbeweging. 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 differentie staat met peilmerkbewegingen door de NAM beschikbaar gesteld. Hierbij is geen informatie beschikbaar gekomen over de uit MOVE verkregen standaard deviaties, noch een volledige variantie-covariantie matrix. Derhalve is in de TNO-AGE analyse 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: $(\Delta_{ref})_t: \sigma_t = \sqrt{(\sigma_{ref}^2 + \sigma_{peil}^2 + ((t-t_0) * \Delta_{ref})^2)}$. Voor Ameland worden op basis van de meetregisters waarden aangenomen van $\sigma_{ref}=3\text{mm}$, $\sigma_{peil}=3\text{mm}$ en $\Delta_{ref}=0,25\text{mm}$. Voor de bepaling van de fit tussen model en gemeten daling is uitgegaan van de 90% betrouwbaarheidslimieten, hetgeen overeenkomt met een 2-sigma standaard deviatie. Dit resulteert in een onzekerheid in de daling van een peilmerk van 8,5 mm in 1986, toenemend tot 1,46 cm in 2009.

5.2.2 Geomechanische scenario's

De 'Red Flag' methode (Nepveu et al., 2010) is gebruikt om de waarden van de parameters van de zoutkruip, reservoir diffusie, c/k verhouding voor de elastische response en de translatie hiervan ten gevolge van zoutkruip te vinden, die de bodemdaling het beste modeleren voor alle epochen. Uitgangspunt hierbij zijn de onzekerheden in deze parameters. Door middel van de Monte Carlo methodiek worden willekeurige combinaties van parameterwaarden bepaald, waarbij elke parameter een normaal verdeling volgt, gedefinieerd door een gemiddelde en standaard afwijking. Deze combinaties van parameterwaarden worden gebruikt om de bodemdaling in de tijd te berekenen voor alle peilmerkpunten (75 in totaal) boven het Ameland veld. Deze scenario's worden vervolgens in de 'Red Flag' methode ten opzichte van elkaar gewogen op basis van de overeenkomst tussen de gemodelleerde en gemeten bodemdaling (χ^2). De scenario's die de gemeten bodemdaling in ruimte en tijd het beste beschrijven krijgen hierbij de hoogste waarschijnlijkheid mee, terwijl scenario's die de gemeten daling in ruimte en/of tijd slecht beschrijven een lage waarschijnlijkheid krijgen.

Om tot een adequate sampling van de 4D modelruimte te komen is ervoor gekozen om de parameters eerst te voorzien van een grote standaard deviatie, waarna in een tweede Red Flag analyse ingezoomd wordt op de modelruimte waar de modellen met een goede overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling zich bevinden (zie Tabel 5-1). Per analyse (het grote en kleine bereik) worden 1000 varianten met verschillende parametercombinaties doorgerekend.

De 'Red Flag' analyse is uitgevoerd voor tien geomechanische scenario's (Tabel 5-2). De eerste vier scenario's gebruiken het MORES reservoir model van de NAM met een volledig open verbinding naar de onder- en aanliggende aquifers. De volgende vier gebruiken hetzelfde NAM MORES model waarbij echter de depletie in

de de aquifers beneden het gas-water-contact buiten werking is gezet (de aquifers worden op initiële druk gehouden). De laatste twee scenario's gebruiken een alternatief NAM MORES model, waarbij de aquifer ten zuiden van het gasveld gedeeltelijk meedepleteert, terwijl de overige aquifers niet meedepleteren (Figuur 2-1). Deze scenario's zijn meegenomen aangezien depletie in de aquifers significante bodemdaling kan geven, maar differentiatie tussen deze scenario's in de dynamische modellering op basis van de calibratie aan de putgegevens niet mogelijk is. Verder worden de gecorrigeerde en niet gecorrigeerde compactiemodellen meegenomen (vergelijkingen 3 en 4). De laatste modelvariant is het aan en uit zetten van de lineaire zoutkruip.

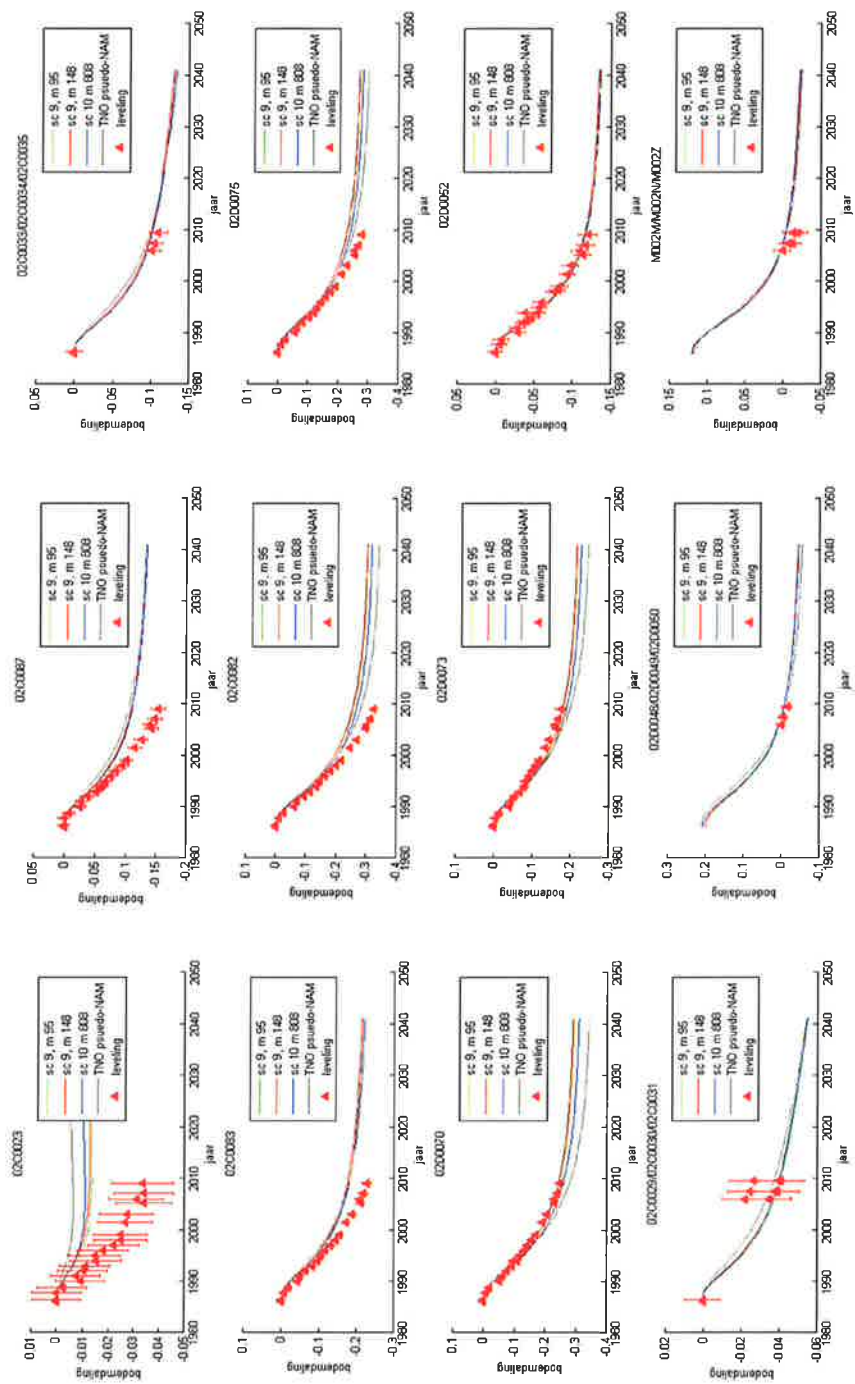
Tabel 5-1. Gemiddelden en standaard deviaties, alsook minimum en maximum waarden voor de parameter zoektocht

| | Gemiddelde | Standaard deviatie | Minimum | Maximum |
|-------------------------|------------|--------------------|-----------|-----------|
| Tijdconstante Zoutkruip | 17.5 jaar | 1.0 jaar | 14.5 jaar | 20.5 jaar |
| Tijdconstante Reservoir | 2.5 jaar | 1.5 jaar | 0 jaar | 7 jaar |
| c/k(0) | 0.90 | 0.08 | 0.66 | 1.14 |
| Dc/k | 0.175 | 0.025 | 0.1 | 0.25 |

Tabel 5-2. Verschillende geomechanische scenario's voor de parameter zoektocht boven het Ameland veld

| Scenario | compactiecurve | Lineaire kruip | Model drukverdeling |
|----------|-------------------------|----------------|-------------------------------|
| 1 | Ongecorrigeerde labdata | Uit | MORES |
| 2 | Ongecorrigeerde labdata | Aan | MORES |
| 3 | Gecorrigeerde labdata | Uit | MORES |
| 4 | Gecorrigeerde labdata | Aan | MORES |
| 5 | Gecorrigeerde labdata | Uit | MORES no-aquifer below 3500 m |
| 6 | Gecorrigeerde labdata | Aan | MORES no-aquifer below 3500 m |
| 7 | Ongecorrigeerde labdata | Uit | MORES no-aquifer below 3500 m |
| 8 | Ongecorrigeerde labdata | Aan | MORES no-aquifer below 3500 m |
| 9 | Gecorrigeerde labdata | Aan | MORES gedeeltelijke aquifer |
| 10 | Ongecorrigeerde labdata | Aan | MORES gedeeltelijke aquifer |

Tabel 5-1 geeft de waarden voor de relaxatietijden, de c/k(0) verhouding en de translatie daarvan voor de beste twee modellen van scenario 9, het beste model van scenario 10 en het "TNO pseudo-NAM model". Dit laatste model is zoveel mogelijk in overeenstemming met de parameters en kenmerken van het model zoals door de NAM gebruikt in het voorstel wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011". De waarde voor de relaxatietijd van de zoutkruip voor het "TNO pseudo-NAM model" is 18.7 jaar. De reservoir diffusie relaxatietijd is 5 jaar en de c/k verhouding is bepaald door de bodemdaling op verschillende punten te vergelijken met de NAM waarden. Hieruit bleek dat een initiële c/k verhouding van 1.00 de bodemdaling berekend door de NAM het beste benaderd. De translatie van de c/k verhouding is gelijk genomen aan de beste modellen van scenario 9. De modellen van scenario 9 geven de beste fit tussen de gemodelleerde en gemeten bodemdaling. De overige modellen binnen dit scenario krijgen een relatief lage waarschijnlijkheid, waardoor ze verder niet in beschouwing genomen hoeven te worden. Beide beste modellen geven vergelijkbare waarden voor de relaxatietijden.



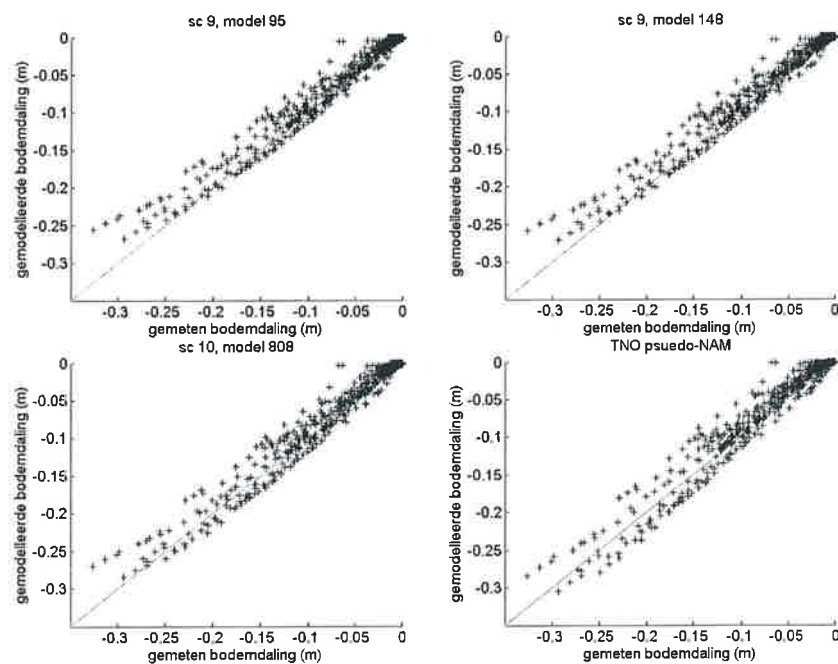
Figuur 5-6. Vergelijking tussen de twee beste modellen van scenario 9 van Ameland (Tabel 5-3), het beste model van scenario 10 en het TNO pseudo-NAM model voor de geselecteerde peilmerken van Figuur 5-5. De rode punten met foutenmarge geven de peilmerkdada aan.

Tabel 5-3. De beste twee modellen van scenario 9, het beste model van scenario 10 en het TNO pseudo-NAM model met de bijbehorende waarden voor de relaxatietijden van het zout en het reservoir. RMS is, conform de RMS-toets van SodM, gedefinieerd als de 'root-mean-squared' van het verschil van de peilmerkdta (d) en de gemodelleerde daling

$$(m): RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (d_i - m_i)^2}$$

| Model | χ^2 | RMS (m) | T_{zout} (/jaar) | T_{res} (/jaar) | c/k(0) | d(c/k) |
|----------------|----------|---------|-----------------------|----------------------|--------|--------|
| Sc 9, m 95 | 0.7629 | 0.0165 | 17.9 | 3.4 | 0.89 | 0.21 |
| Sc 9, m 148 | 0.7694 | 0.0166 | 17.1 | 3.8 | 0.91 | 0.19 |
| Sc 10, m 808 | 0.847 | 0.0178 | 17.5 | 3.5 | 0.92 | 0.22 |
| TNO pseudo-NAM | - | 0.0175 | 18.7 | 5.0 | 1.00 | 0.20 |

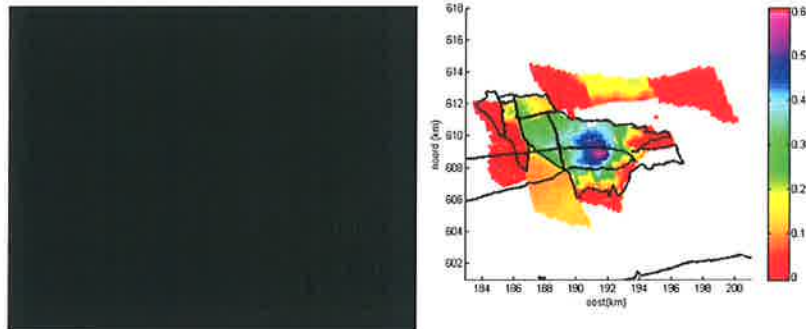
Figuur 5-6 laat de vergelijking zien tussen de modellen van Tabel 5-3 en de peilmerkdta van Figuur 5-5. Op de oostkant van Ameland en op het wad (02C0033, 02C0034, 02C0035, 02C0029, 02C0030, 02C0031, 02D00048, 02D00049, 02D00050, M002M, M002N, M002Z, 02D0070, 02D0073, 02D0052) fit scenario 9 binnen de fout in de peilmerken. In het centrum en meer naar het westen van de bodemdalingsskom (02C0023, 02C0087, 02C0082, 02C0083, 02C0075) wordt de fit aanmerkelijk minder goed. Hier wordt de bodemdaling door de modellen onderschat. De TNO analyse met de NAM parameterwaarden (TNO pseudo-NAM model) laat hetzelfde zien.



Figuur 5-7. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van en Tabel 5-3. Peilmerkdta die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn.

Tenslotte laat Figuur 5-7 de overeenkomst zien tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de twee beste modellen van scenario 9, het beste model van scenario 10 en het TNO pseudo-NAM model (de parameters

hiervan staan in Tabel 5-3). De resultaten van beide modellen van scenario 9 zijn gecentreerd rond de 45 graden lijn (gemeten bodemdaling is gelijk aan gemodelleerde bodemdaling), met een bandbreedte van ongeveer 5 cm. Voor alle scenario's geldt dat er een bias te zien is: de gemodelleerde bodemdaling is in de meeste gevallen iets groter dan de gemeten bodemdaling.



Figuur 5-8. Compactie in het reservoir in 2010 in het GEOMECC model van de NAM (links) en het TNO pseudo-NAM model (rechts).

Het TNO pseudo-NAM model komt niet overeen met de bodemdaling zoals door de NAM gemodelleerd en gepresenteerd in het voorstel wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011". Om dit verschil te duiden is in eerste instantie gekeken naar de compactie op reservoirniveau. De compactie in het reservoir (Figuur 5-8) laat een goede overeenkomst zien ten noorden, oosten en zuiden van het diepste punt. De verschillen in het centrum en westen zijn in de orde van 5% tot 10% en worden waarschijnlijk veroorzaakt door de laterale opschaling van de compactie voor het GEOMECC model (van 200x200m in de dynamische reservoir modellen naar 500x500m in het GEOMECC model).

Daarnaast kunnen verschillen in gemodelleerde bodemdaling voortkomen uit de verschillen in enkele aannames tussen de TNO methode en het numerieke model van de NAM. De uitkomsten in het numerieke model van de NAM wordt mede bepaald door de aannames voor de randvoorwaarden van het model die mogelijk fundamenteel verschillen met die in de TNO modellen. De TNO methode neemt een rigide basement aan die de bodembeweging mathematisch beschrijft.

Tenslotte verschuift het diepste punt van de bodemdaling in de TNO methodiek in principe niet in de tijd. Uit verschillende analyses (zie ook Figuur 5-2) is gebleken dat het diepste punt in het GEOMECC model mogelijk een laterale translatie van maximaal 800 m ondergaat waarbij het diepste punt van de kom zich ten gevolge van de zoutkruip van oost naar west verplaatst. Dit kan een artefact van de numerieke methode zijn, echter het kan ook een daadwerkelijk gevolg zijn van de aanwezigheid van de zoutdiapier in de ondergrond net ten oosten van Ameland. In het laatste geval zou deze translatie een vergroting van de bodemdaling in het westen geven, zoals ook geobserveerd. In Hoofdstuk 6 zal de invloed van een mogelijke translatie van het basement worden meegenomen in de onzekerheidsanalyse.

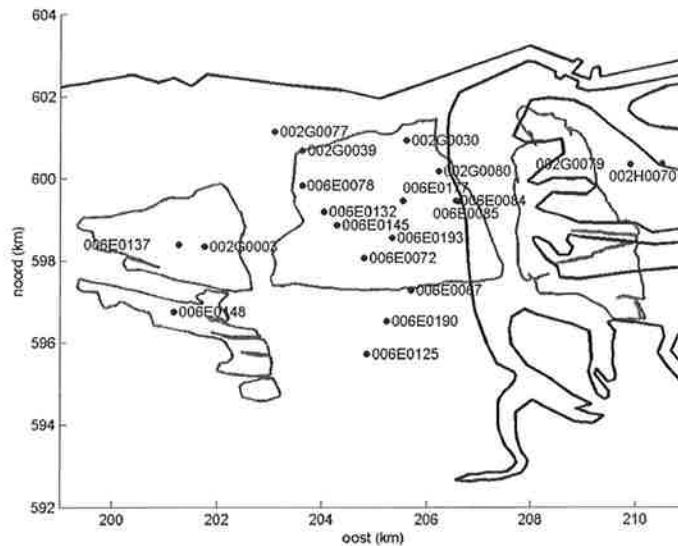
5.3 Anjum, Ezumazijl en Metslawier

In de volgende secties volgt de bodemdalingsanalyse van Anjum, Ezumazijl en Metslawier. Eerst wordt de bodemdalingsdata besproken. Daarna worden de

geomechanische scenario's voor dit gebied beschreven. Tot slot wordt het resultaat van de 'Red Flag' methode gepresenteerd in termen van de parameters, waarmee de bodemdaling van deze drie voorkomens het beste te modelleren is.

5.3.1 Bodemdaling Anjum, Ezumazijl en Metslawier

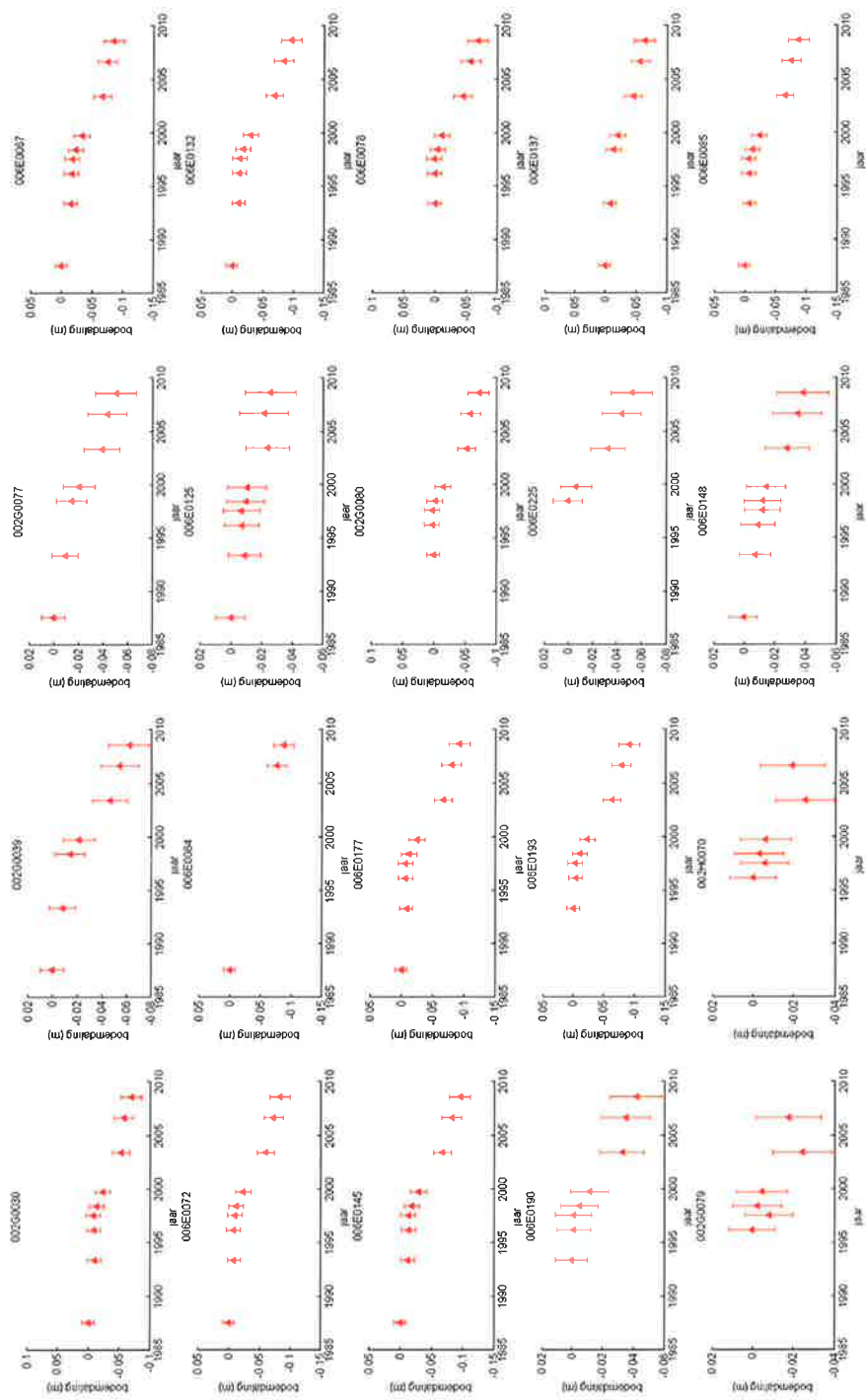
Uit Anjum en Metslawier wordt sinds 1997 gas geproduceerd. De productie in Ezumazijl is in 1999 begonnen. Sinds de start van productie van deze voorkomens is er tot de meetcampagne van 2008 bijna 10 cm bodemdaling waargenomen. De bodemdaling in het gebied wordt met regelmaat gemeten sinds 1987.



Figuur 5-9 Locaties van de peilmerkpunten van Figuur 5-10

Figuur 5-10 laat de bodemdaling zien voor een selectie van peilmerkpunten boven de Anjum, Ezumazijl en Metslawier velden. De bodemdaling laat een duidelijke toename zien na 1997, na aanvang van de productie in Anjum en Metslawier. Voor 1997 laten de meeste peilmerkpunten een autonome daling zien van ongeveer één tot twee centimeter (bijvoorbeeld peilmerkpunten 002G0030/72/145). Het diepste punt van de bodemdalingssom lijkt centraal boven het Anjum veld te liggen.

Voor peilmerkdaling bij Anjum, Ezumazijl en Metslawier is uitgegaan van dezelfde onzekerheidsberekening als bij Ameland. Dit resulteert in een onzekerheid van 8,5 mm in 1997, toenemend tot 1,05 cm in 2009.



Figuur 5-10. Bodemdaling (m) voor 14 peilmerken boven het Anjum gasveld, 2 peilmerken boven Metslawier en 2 peilmerken naast Ezumaziji in de tijd. De locaties van de punten staan in Figuur 5-9.

5.3.2 Red Flag: Geomechanische scenario's

De geomechanische scenario's uit Tabel 5-4 worden gebruikt om voor de voorkomens Anjum, Ezumazijl en Metslawier de beste waarden voor de onzekere parameters te bepalen. Wederom is ervoor gekozen om beide compactiemodellen te onderzoeken. Daarnaast is de bijdrage van de zoutkruip op de overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling onderzocht. In tegenstelling tot Ameland is in de analyse hier alleen gebruikt gemaakt van de dynamische modellen waarin geen depletie in de aquifer plaatsvindt. De dynamische reservoir modellering heeft aangetoond dat een goede overeenkomst met de historische gemeten druk data zeer moeilijk te bereiken is als er depletie in het aquifer wordt toegestaan (persoonlijke communicatie NAM). Daarnaast geeft dit een enorme overschatting van de bodemdaling.

Net als bij Ameland worden 4 parameters afgeschat in de 'Red Flag' analyse: de relaxatietijden voor de zoutkruip en het reservoirgesteente en $c/k(0)$ en $d(c/k)$ uit vergelijking 7. Wederom is ervoor gekozen om de parameters eerst te voorzien van een grote standaard deviatie, waarna in gezoomd wordt op de modelruimte waar de modellen met een goede overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling zich bevinden. Dit laatste bereik wordt aangegeven in Tabel 5-5. Per analyse (het grote en kleine bereik) worden 1000 modellen getrokken om een adequate sampling van de modelruimte te bereiken.

Tabel 5-4. Verschillende geomechanische scenario's voor de Anjum, Ezumazijl en Metslawier voorkomens.

| Scenario | compactiecurve | Lineaire kruip | Model |
|----------|-------------------------|----------------|----------------------|
| 1 | Ongecorrigeerde labdata | Aan | Anjum zonder aquifer |
| 2 | Ongecorrigeerde labdata | Uit | Anjum zonder aquifer |
| 3 | Gecorrigeerde labdata | Aan | Anjum zonder aquifer |
| 4 | Gecorrigeerde labdata | Uit | Anjum zonder aquifer |

Tabel 5-5. Gemiddelden en standaard deviaties, alsook minimum en maximum waarden voor de parameter zoektocht binnen de kleinere modelruimte

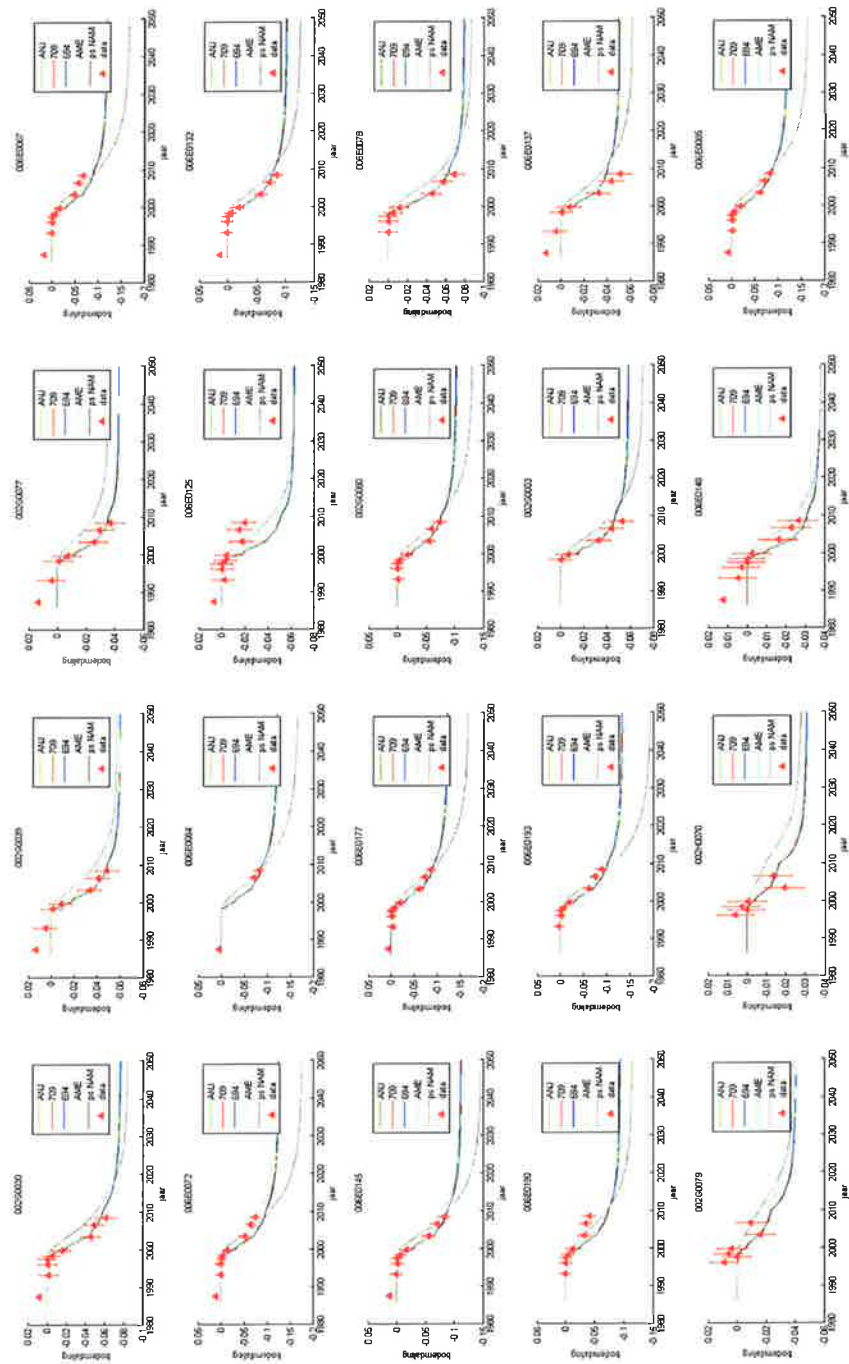
| | Gemiddelde | Standaard deviatie | Minimum | Maximum |
|----------------------------|------------|--------------------|-----------|-----------|
| Zoutkruip vertraging | 17.5 jaar | 1.0 jaar | 14.5 jaar | 20.5 jaar |
| Reservoir kruip vertraging | 2.5 jaar | 1.5 jaar | 0 jaar | 7 jaar |
| $c/k(0)$ | 0.75 | 0.03 | 0.66 | 0.84 |
| Dc/k | 0.175 | 0.025 | 0.1 | 0.25 |

Tabel 5-6. De beste twee modellen van scenario 3, het Anjum (ANJ), Ameland (AME) en psuedo NAM scenario (ps NAM) met de bijbehorende waarden voor de relaxatietijden van het zout en het reservoir en de parameters voor het rigide basement.

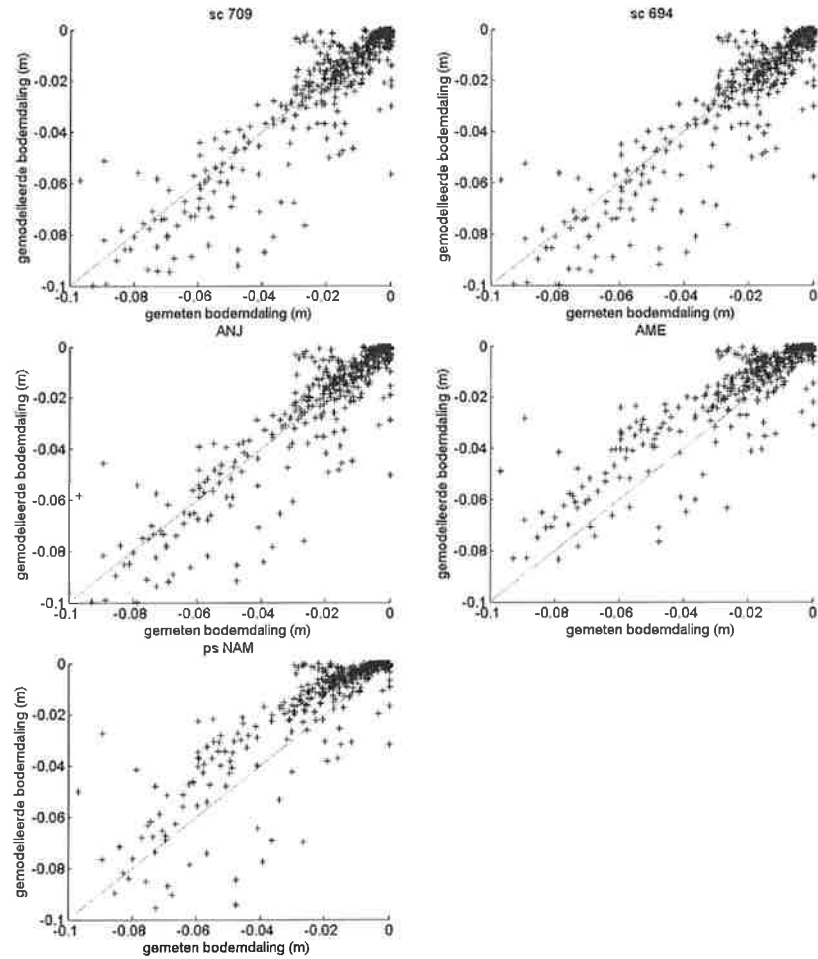
| Model | χ^2 | RMS | T_{zout} (/jaar) | T_{res} (/jaar) | $c/k(0)$ | dc/k |
|--------|----------|--------|------------------------------|-----------------------------|----------|--------|
| #709 | 0.5019 | 0.0099 | 17.1 | 0.3 | 0.76 | 0.15 |
| #694 | 0.5024 | 0.0100 | 15.7 | 0.12 | 0.73 | 0.17 |
| ANJ | - | 0.0096 | 17.5 | 1.0 | 0.75 | 0.17 |
| AME | - | 0.0106 | 17.5 | 3.6 | 0.75 | 0.17 |
| ps NAM | - | 0.0114 | 18.7 | 5.0 | 0.90 | 0.17 |

Uit de analyse blijkt dat scenario 3 de beste overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling geeft. In Tabel 5-6 zijn de resulterende parameters van de twee beste modellen gegeven. De bijbehorende χ^2 is kleiner dan 1, wat aangeeft dat over alle peilmerken genomen het verschil tussen de gemodelleerde bodemdaling en de gemeten bodemdaling kleiner is dan de onzekerheid van de gemeten data.

De resulterende waarden voor de relaxatietijden en het fundament zijn consistent tussen deze modellen. Net als bij Ameland komt uit de 'Red Flag' analyse dat de relaxatietijd van het reservoir scherper bepaald is dan de relaxatietijd van het zout. Verder bestaat er een lineaire relatie tussen $c/k(0)$ en $d(c/k)$ en tussen τ_{res} en $c/k(0) + d(c/k)$ en τ_{res} en $c/k(0)$. De waarden voor $c/k(0)$ en $d(c/k)$ zijn anders dan voor Ameland, wat te verklaren is door het verschil in diepte waarop de velden gelegen zijn (3350 m voor Ameland vs 3800 m voor Anjum), waardoor het elasticiteitsprofiel (combinatie Young's modulus, Poisson's ratio en dikte van de lagen) voor de twee velden sterk verschilt. Figuur 5-11 laat een vergelijking zien tussen de twee beste modellen uit de "Red Flag" analyse (Tabel 5-6), het model waar scenario 3 is doorgerekend met een relaxatietijd in het reservoir van 1 jaar ("ANJ"), het model waar scenario 3 is doorgerekend met de relaxatietijden afgeleid voor Ameland ("AME") en het model waar scenario 3 is doorgerekend met de relaxatietijden van de NAM (uit de wijziging winningsplan 'Anjum 2011 rev.30-09-2011'; "ps NAM"). De twee beste modellen uit de "Red Flag" analyse en het "ANJ" model geven dezelfde resultaten tot 2010. Het model met de Ameland relaxatietijden en het pseudo-NAM model wijken meer af vanwege de grotere relaxatietijden. Analyse van de verschillen tussen de gemeten en gemodelleerde daling laat zien dat de peilmerkdatabanden ten zuiden van het Anjum veld (006E0125, 006E0190) niet goed gefit worden. Hier geeft de gemodelleerde bodemdaling een overschatting ten opzichte van de gemeten daling. Figuur 5-11 en Figuur 5-12 laten zien dat de AME en (pseudo-)NAM modellen met name de eerste jaren de bodemdaling onderschatten vanwege de grotere relaxatietijden. De RMS figuren laten een trend zien rond de 45 graden lijn waar de gemeten bodemdaling gelijk is aan de gemodelleerde bodemdaling. In vergelijking met Ameland is er meer scatter rond deze lijn wat veroorzaakt wordt door de peilmerkdatabanden zelf en de aanwezigheid van meer velden in de buurt van de Anjum, Ezumazijl en Metslawier velden (e.g. NES, Moddergat), welke niet meegenomen zijn in deze analyse.



Figuur 5-11. Vergelijking tussen twee beste modellen van Anjum (Tabel 5-6), het Anjum model ('ANJ'), het Ameland model (aangepast voor andere c/k) ('AME') en het pseudo-NAM model voor de geselecteerde peilmerken van Figuur 5-9. De rode punten met foutenmarge geven de peilmerkdta aan. Het aangeleverde model van Ezumazijl laat een sprong zien in 2009 (zichtbaar in 002G0079 en 002H0070). Dit markeert de overgang van het 'history match' gedeelte naar het voorspellende gedeelte van het reservoir model van Ezumazijl.



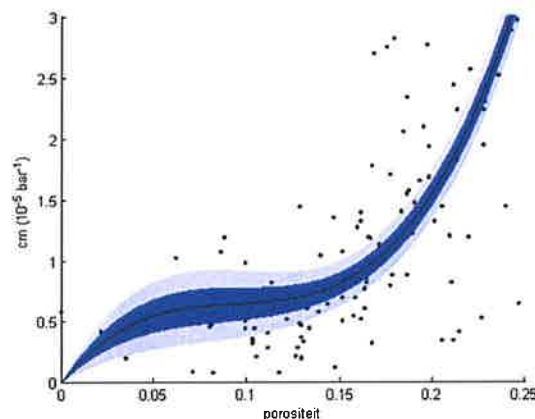
Figuur 5-12. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van Tabel 5-6. Peilmerckdata die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn.

6 Onzekerheidsanalyse geomechanische modellering

Figuur 5-6 en Figuur 5-11 laten de vergelijkingen zien van de bodemdalingsdata met de voorspellingen van de beste modellen uit onze analyses voor Ameland en Anjum, Ezumazijl en Metslawier. De verkregen fit en de relaxatietijden zijn afhankelijk van het onderliggende reservoir model en de keuzes/aannamen die gemaakt zijn. In dit hoofdstuk worden de onzekerheden in deze keuzes en aannamen verkend waardoor de hierdoor veroorzaakte onzekerheid in de gemodelleerde bodemdaling kan worden gedefinieerd.

6.1 Porositeit afhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt

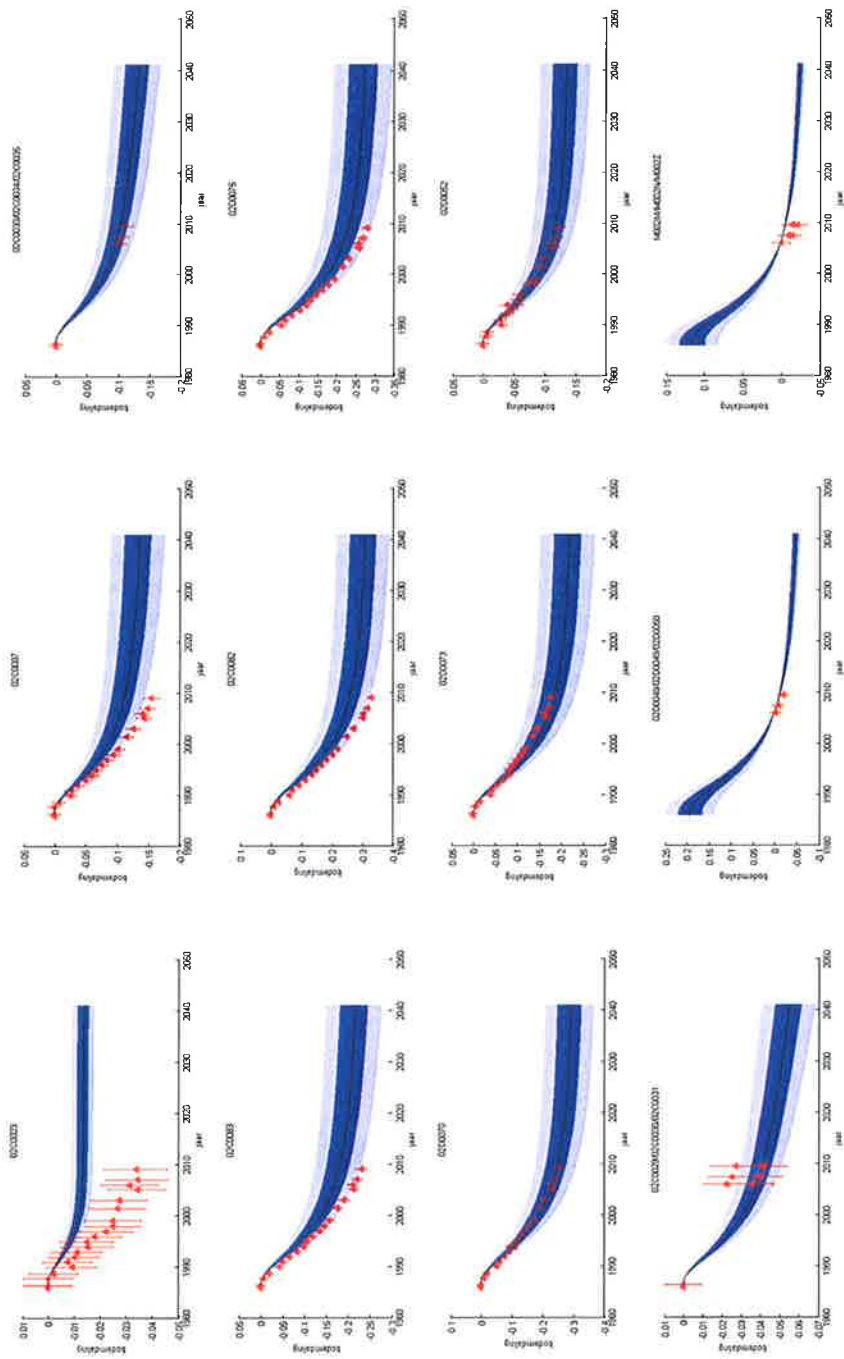
De compactiecoëfficiënt, bepaald uit de compactie-experimenten op Rotliegend kernmonsters van gasvelden in Noord Nederland, is afhankelijk van de porositeit. Op basis hiervan zijn in hoofdstuk 5.1.2 twee vergelijkingen afgeleid (vergelijkingen 3 en 4), die zijn gebruikt in de calibraties van Hoofdstuk 5. Uit Figuur 5-1 bleek dat de relaties tussen compactiecoëfficiënt en de porositeit relatief weinig verschillen, de spreiding van de meetpunten rond de gefitte relaties heen is echter groot. Figuur 6-1 laat de 67% en 95% betrouwbaarheidsgrenzen zien voor de gecorrigeerde regressiefunctie (vergelijking 4). De 67% betrouwbaarheidsgrens komt overeen met een standaarddeviatie, terwijl de 95% betrouwbaarheidsgrens overeen komt met drie standaarddeviaties. De mogelijke bodemdaling binnen deze betrouwbaarheidsgrenzen zijn voor Ameland en Anjum, Metslawier en Ezumazijl verder uitgewerkt in de volgende paragrafen.



Figuur 6-1. De 67% en 95% betrouwbaarheidsgrenzen van de gecorrigeerde regressiefunctie (vergelijking 4).

6.1.1 Ameland

De 67% en 95% betrouwbaarheidsgrenzen voor de regressiefunctie laten een grote range aan mogelijke bodemdaling zien (Figuur 6-2). Binnen 67% betrouwbaarheid kan het diepste punt van de bodemdalingssom variëren tussen de 25 cm en 35 cm uiteindelijke bodemdaling. Voor de 95% betrouwbaarheidsgrens varieert dit tussen de 20 cm en 40 cm.



Figuur 6-2 Variatie in bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9) voor de 67% betrouwbaarheidsgrens van de regressiefunctie (donkerblauw) en de 95% betrouwbaarheidsgrens (lichtblauw).

De compactiecoëfficiënt is bepaald uit de compactie-experimenten op Rotliegend kernmonsters van gasvelden in Noord Nederland. Figuur 6-3 laat zien welke metingen binnen deze dataset gedaan zijn aan kernen uit putten in het Amelandveld. Aangezien de kernmonsters afkomstig uit de Ameland putten een relatief grotere compactie laten zien dan gemiddeld voor de Rotliegend kernen, is een derde functie voor de porositeitsafhankelijke compactie getest welke bepaald is door van de gecorrigeerde metingen alleen deze specifieke Ameland kernmetingen mee te nemen:

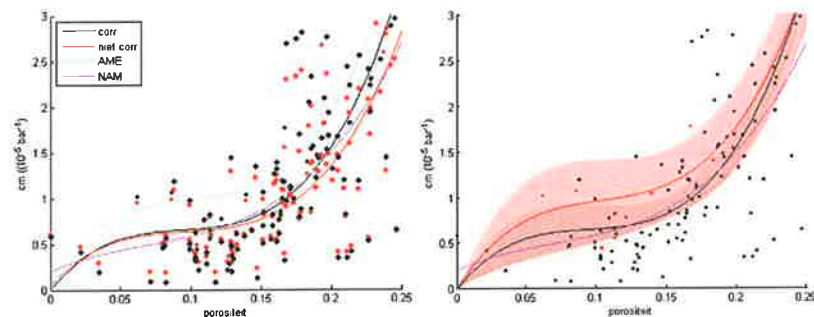
$$c_m = 0,0079 \varphi^3 - 0,00246 \varphi^2 + 0,00026 \varphi \text{ bar}^{-1} \quad (8)$$

Deze functie geeft een grotere compactiecoëfficiënt bij vergelijkbare waarden voor de porositeit (zie Figuur 6-3) en zal dus leiden tot meer compactie in het reservoir en derhalve een grotere bodemdaling.

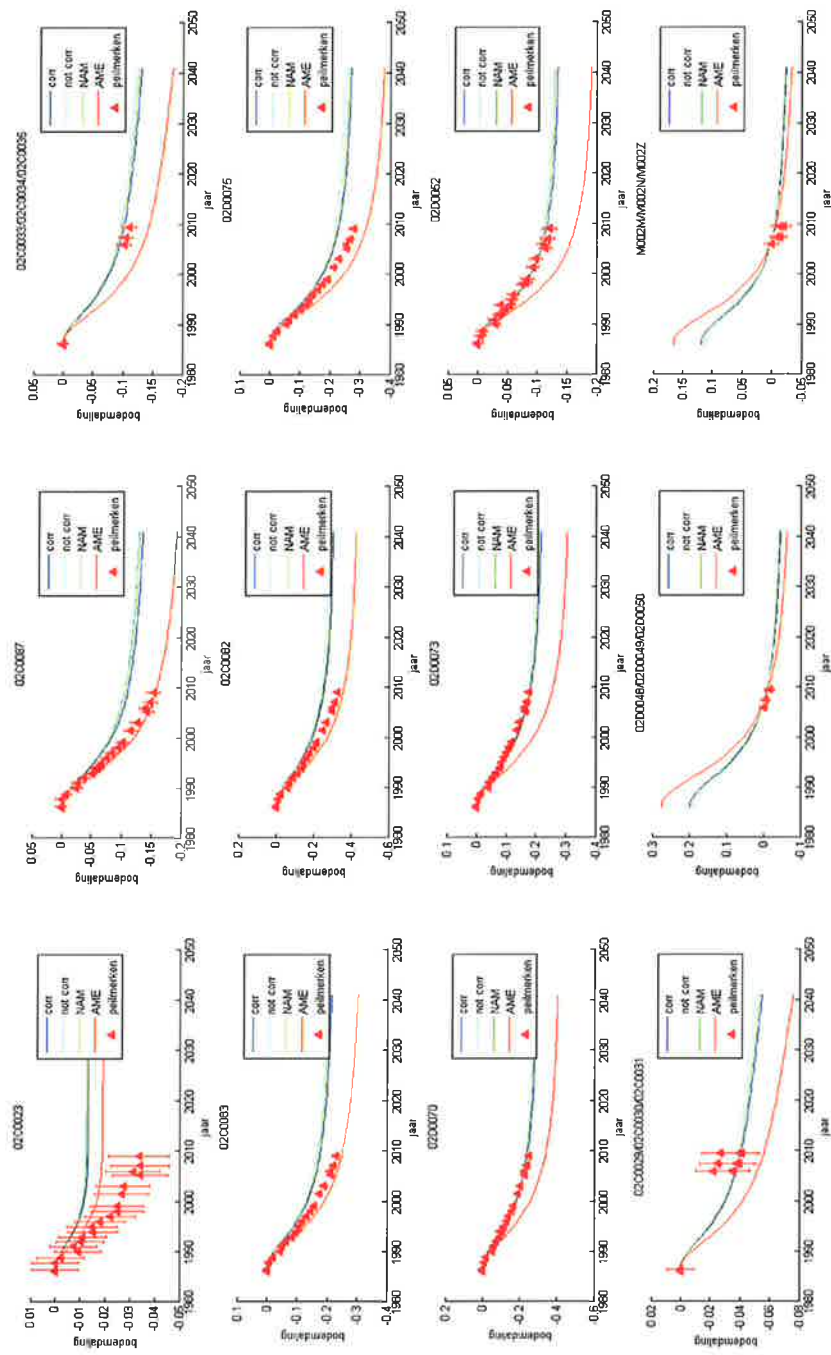
In de wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011" gebruikt de NAM een porositeitsafhankelijke vergelijking voor de compactie welke afwijkt van alle door ons bepaalde vergelijkingen. Op basis van de door NAM beschikbare informatie is een benadering voor deze vergelijking afgeleid (Figuur 6-3):

$$c_m = 0,002865 \varphi^3 - 0,0006 \varphi^2 + 0,00007 \varphi + 2e - 6 \text{ bar}^{-1} \quad (9)$$

Deze vergelijking geeft voor de porositeiten tussen de 10 en 20% een iets grotere compactie dan de door ons afgeleide regressiefunctie aan de gecorrigeerde kernmetingen. Bij porositeiten boven de 20% resulteert deze vergelijking in kleinere compactiecoëfficiënten, waarbij deze zelfs lager worden dan waarden bepaald met onze regressiefunctie aan de niet gecorrigeerde kernmetingen (Figuur 6-3).



Figuur 6-3. (Links) Porositeitsafhankelijkheid van de compactiecoëfficiënt. De rode punten geven de niet gecorrigeerde waarden en de zwarte de gecorrigeerde punten. De rode lijn is de beste fit van de niet gecorrigeerde waarden (vergelijking 3), de zwarte lijn is de beste fit van de gecorrigeerde waarden (vergelijking 4), de blauwe lijn is de beste fit van de Ameland kernen (vergelijking 8), en de roze lijn is de benadering van de NAM vergelijking (vergelijking 9). De waarden voor de Ameland kernen zijn gegeven door de punten met een blauwe rand. De waarden voor de Anjum kernen zijn gegeven door de punten met een groene rand. (Rechts) de 95% betrouwbaarheidsgrenzen van de gecorrigeerde regressiefunctie (vergelijking 4, grijs vlak, meetpunten zijn zwart) en de gecorrigeerde regressiefunctie van de Ameland kernen (vergelijking 8, rood vlak en de meetpunten in rood). De roze lijn geeft de benadering van de NAM vergelijking (vergelijking 9).



Figuur 6-4 Bodemdaling voor drie verschillende compactiecoëfficiënt porositeit relaties. Groen is gemodelleerd op basis van de relatie die gecorrigeerd is voor laboratorium effecten (vergelijking 4), blauw is op basis van de niet gecorrigeerde relatie (vergelijking 3), rood is op basis van de relatie afgeleid voor de Ameland kernen (vergelijking 8) en blauw is op basis van een benadering van de NAM relatie (vergelijking 9).

Figuur 6-4 laat het verschil in de gemodelleerde bodemdaling zien met de gecorrigeerde relatie (corr, vergelijking 4), de ongecorrigeerde relatie (not corr, vergelijking 3), de relatie van de NAM (NAM, vergelijking 9) en de relatie die afgeleid is uit de Ameland kernen alleen (AME; vergelijking 8). De bodemdaling is berekend met het model van de NAM, waarbij de aquifer vertraagt meedepleteert (er is drukcommunicatie tussen aquifer en gasvoerend gedeelte). Verder zijn de parameters genomen zoals voor het beste model van scenario 9 in Tabel 5-3.

De verschillen door het gebruik van de gecorrigeerde, niet gecorrigeerde en afgeleide NAM relatie lopen op tot 5 mm in het diepste punt. De Ameland regressiefunctie geeft echter de grootste verschillen tot 15 cm in het diepste punt.

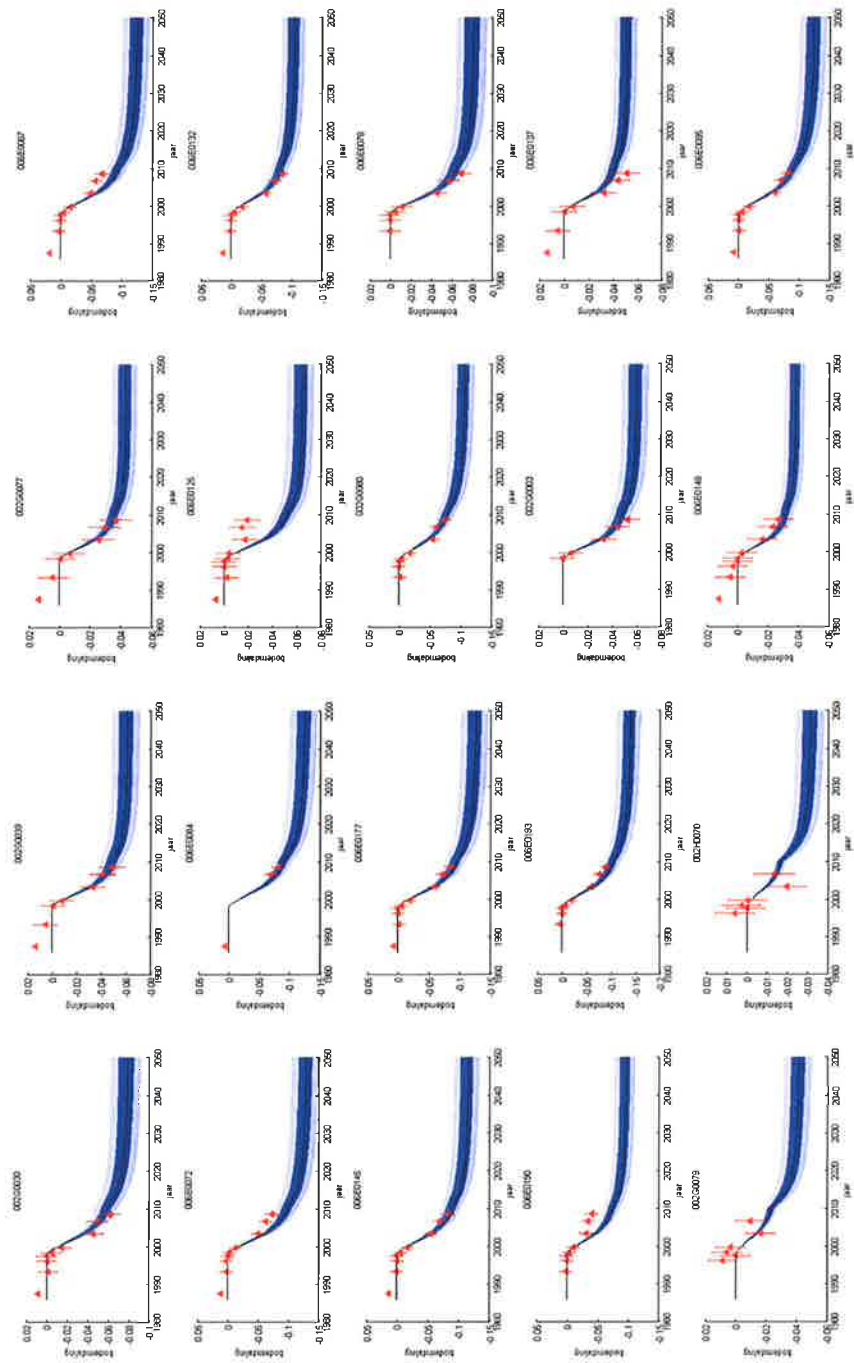
Figuur 6-3 (links) laat de 95% betrouwbaarheidsgrenzen voor de Ameland regressiefunctie (vergelijking 8) en de gecorrigeerde regressiefunctie (vergelijking 4) zien. De betrouwbaarheidsgrenzen voor de Ameland regressiefunctie zijn veel groter dan voor de gecorrigeerde functie wat een direct gevolg is van het geringe aantal (14) meetpunten voor Ameland. Binnen de 95% betrouwbaarheidsgrenzen is de regressiefunctie van Ameland niet significant anders dan de gecorrigeerde regressiefunctie. De benaderde regressiefunctie van de NAM valt bij de hogere porositeiten (vanaf 0.22) buiten de 95% betrouwbaarheidsgrens.

6.1.2 Anjum, Metslawier, Ezumazijl

Figuur 6-5 laat zien dat ook voor Anjum de 67% en 95% betrouwbaarheidsgrenzen een grote range aan mogelijke bodemdaling geven. Binnen 67% betrouwbaarheid kan het diepste punt van de bodemdalingssom variëren tussen de 12 cm en 15 cm uiteindelijke bodemdaling. Voor de 95% betrouwbaarheidsgrens varieert dit tussen de 11 cm en 16 cm.

6.2 Invloed van peilmerken met kleine bodemdaling op de relaxatietijden

Van de 75 peilmerken gebruikt voor de Ameland analyse hebben 47 peilmerken in 2009 een bodemdaling van minder dan 5 cm. In deze paragraaf wordt nagegaan, in hoeverre de peilmerken met kleine bodemdaling van invloed zijn op de gevonden waarden tijdens de "Red Flag" methode. Hiervoor zijn voor scenario 9 van Ameland (Tabel 5-3) de peilmerken met een uiteindelijke bodemdaling van minder dan 5, 10 of 15 cm uit de input van de "Red Flag" methode gehaald. Hierna is de analyse voor zowel de grote als de kleine (Tabel 5-1) modelruimte opnieuw uitgevoerd. Voor de grote modelruimte zijn de beste gevonden modellen gelijk aan elkaar. De χ^2 nam toe wanneer minder punten meegenomen werden. Dit is een direct gevolg van het aantal punten en de relatief grotere bodemdaling van deze punten. Tabel 6-1 laat de resultaten in de kleine modelruimte zien. De gemiddelde waarden van de parameters verkregen uit de "Red Flag" analyse zijn vergelijkbaar. De grootste verschillen zitten in de parameter voor de zoutkruip (τ_{zout}). Dit is te verklaren doordat het deel van de bodemdalingssom dat meegenomen wordt in de analyse kleiner wordt als meer peilmerken worden weggelaten. Hierdoor komt het scharnierpunt (zie paragraaf 5.1.3) buiten het geanalyseerde deel van de bodemdalingssom te liggen. Hierdoor wordt de verdieping en versmalling van de bodemdalingssom ten gevolge van de zoutkruip minder goed te bepalen.



Figuur 6-5. Variatie in bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9) voor de 67% betrouwbaarheids grens van de regressiefunctie (donkerblauw) en de 95% betrouwbaarheids grens (lichtblauw).

Tabel 6-1. Gemiddelde van de vijf beste modellen van RedFlag (kleine modelruimte) waarbij als input de data met een uiteindelijke bodemdaling van meer dan 5, 10 en 15 cm.

| | T_{zout} (/jaar) | T_{res} (/jaar) | $c/k(0)$ | $d c/k$ |
|---------|--------------------|-------------------|----------|---------|
| > 5 cm | 17.7 | 3.7 | 0.92 | 0.20 |
| > 10 cm | 17.5 | 3.9 | 0.93 | 0.19 |
| > 15 cm | 17.2 | 3.8 | 0.91 | 0.20 |

Figuur 6-6 tot Figuur 6-9 illustreert de verschillen in de gemodelleerde bodemdaling voor de variaties in parameters van Tabel 6-1. Tenslotte laat Figuur 6-10 twee extreme variaties zien binnen de oplossingsruimte van de "Red Flag". Het verschil loopt hierdoor op tot ongeveer 5 cm in het diepste punt.

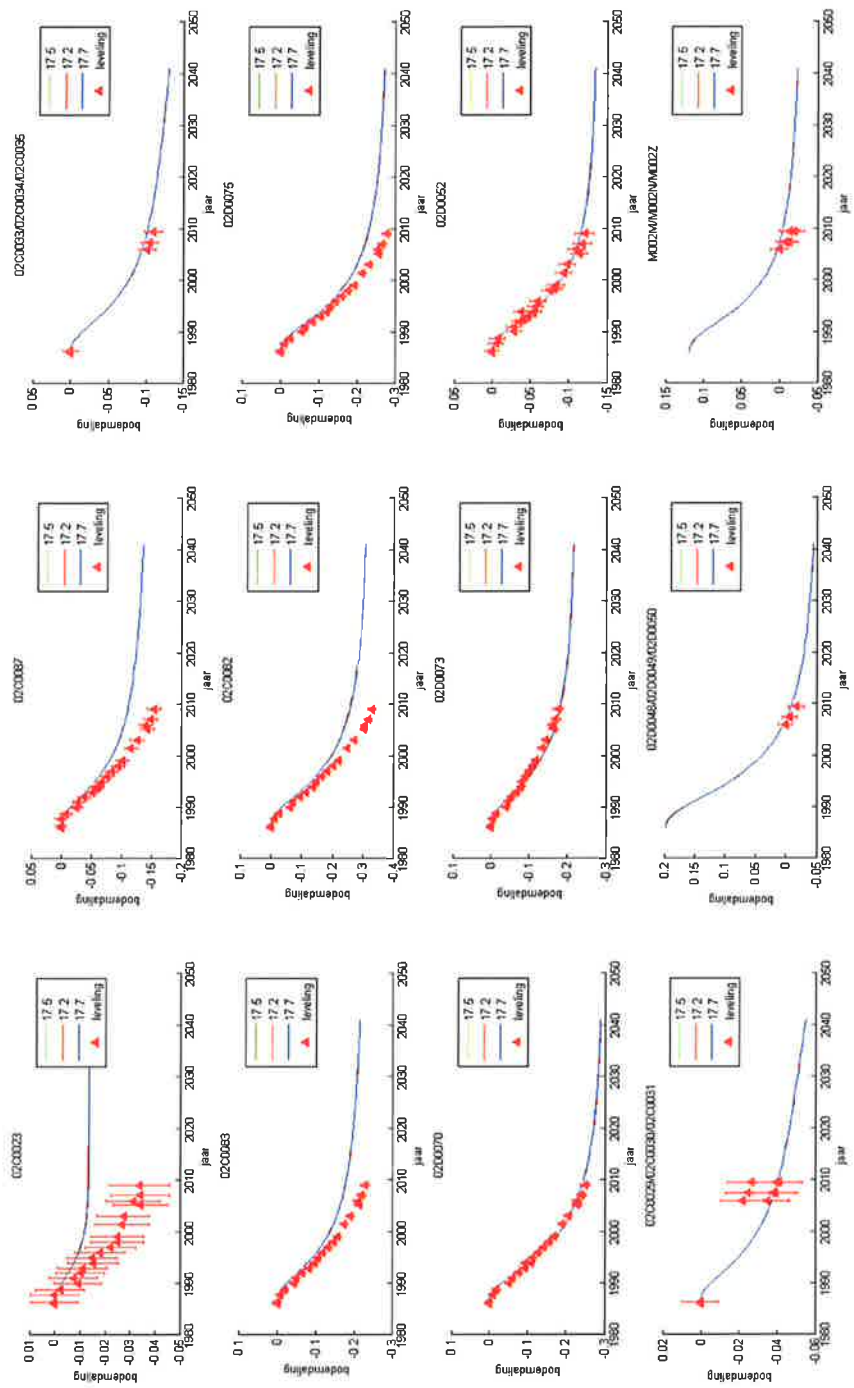
Bij Anjum, Ezumazijl en Metslawier is het verschil in daling bij de peilmerkpunten veel kleiner (tot 10 cm in het centrum van de kom). Het heeft dan ook geen nut om een dergelijke evaluatie voor de bodemdalingssom ten gevolge van Anjum, Ezumazijl en Metslawier te maken.

6.3 Laterale translatie van de kom

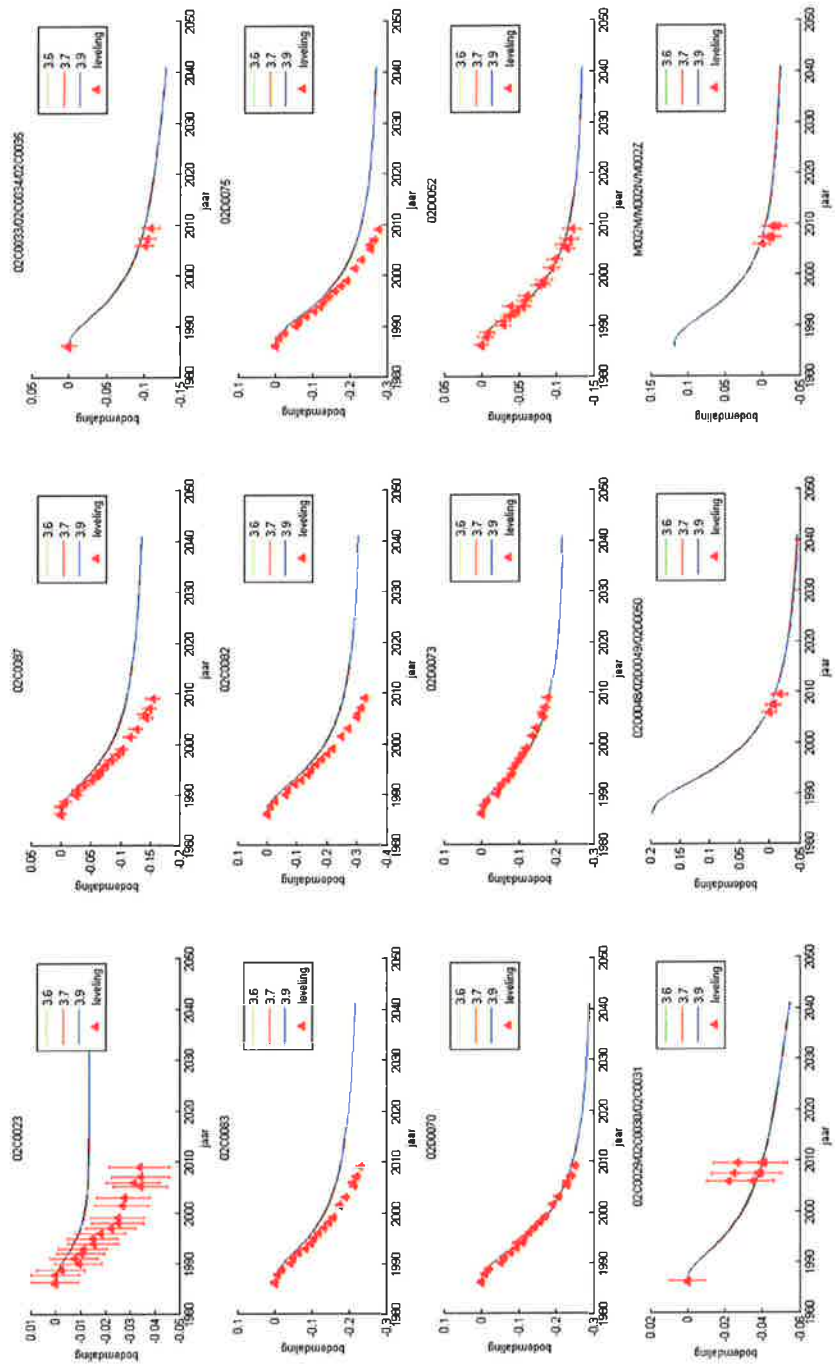
In paragraaf 5.2.2 is aan bod gekomen dat uit eerdere analyses is gebleken dat het diepste punt van de bodemdalingssom van Ameland mogelijk een laterale translatie van maximaal 800 m heeft ondergaan, waarbij het diepste punt van de kom zich ten gevolge van de zoutkruip van oost naar west heeft verplaatst (zie ook Figuur 5-2). Dit kan een artefact van de numerieke methode zijn, echter het kan ook een daadwerkelijk gevolg zijn van de aanwezigheid van de zoutdiapier in de ondergrond net ten oosten van Ameland. In deze sectie wordt de invloed van een translatie van het diepste punt op de analyse van Ameland onderzocht. In het geval het gaat om een artefact van de numerieke methode heeft dit mogelijk ook gevolgen voor de analyse bij Anjum, Ezumazijl en Metslawier. De zoutdiapier ligt echter ten noorden van deze velden zodanig dat het onwaarschijnlijk is dat deze invloed heeft op de bodemdalingssom.

Figuur 6-11 en Figuur 6-13 laten de gemodelleerde en gemeten bodemdaling zien als translatie van het diepste punt wordt toegepast waarbij de gecorrigeerde relatie (vergelijking 4) wordt gebruikt voor de porositeitafhankelijke compactiecoëfficiënt. De uiteindelijke verschillen lopen op tot bijna 10 cm ten oosten van het diepste punt.

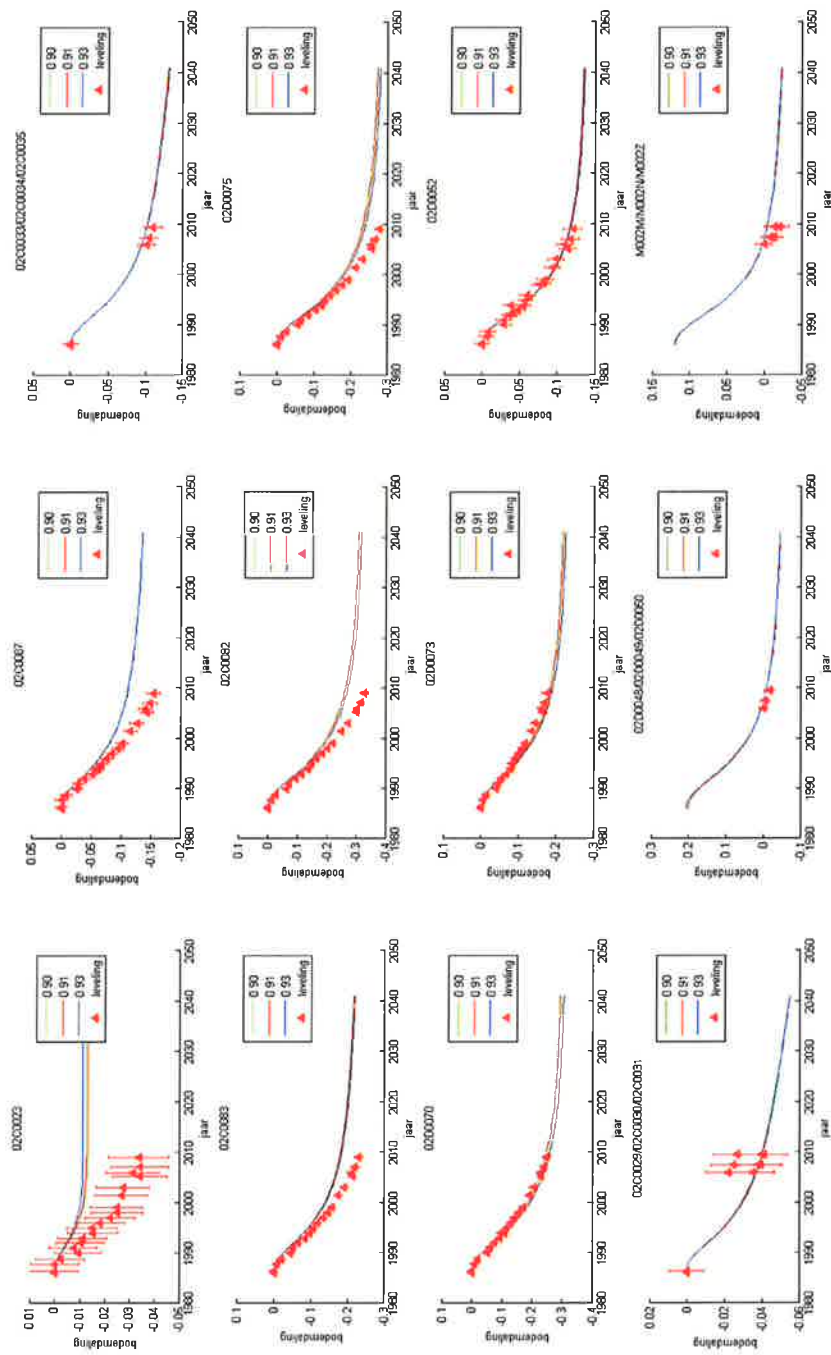
In de hier gepresenteerde analyse wordt ook de regressiefunctie van de Ameland kernen (vergelijking 8) meegenomen. Figuur 6-12 en Figuur 6-14 laten de fit met de gemeten peilmerkaling zien voor de 16 geselecteerde punten van Figuur 5-4 als de regressiefunctie voor de Ameland kernen wordt toegepast (vergelijking 8) zonder en met een translatie van het diepste punt. De gemodelleerde bodemdaling zonder translatie laat een duidelijke overschatting van de bodemdaling zien. Na toepassing van de translatie van het diepste punt van de bodemdalingssom blijkt dat de gemodelleerde en gemeten bodemdaling beter overeenkomen. In Figuur 6-14 is ook te zien dat de scatter rondom de 45 graden lijn (gemeten bodemdaling is gelijk aan gemodelleerde bodemdaling) minder wordt, als een translatie van 400 m of 800 m wordt toegepast. Ook worden de peilmerken met de grootste dalingen nu goed gefit. De scatter rondom de 45 graden lijn neemt weer toe als er een translatie van 1200 m wordt toegepast.



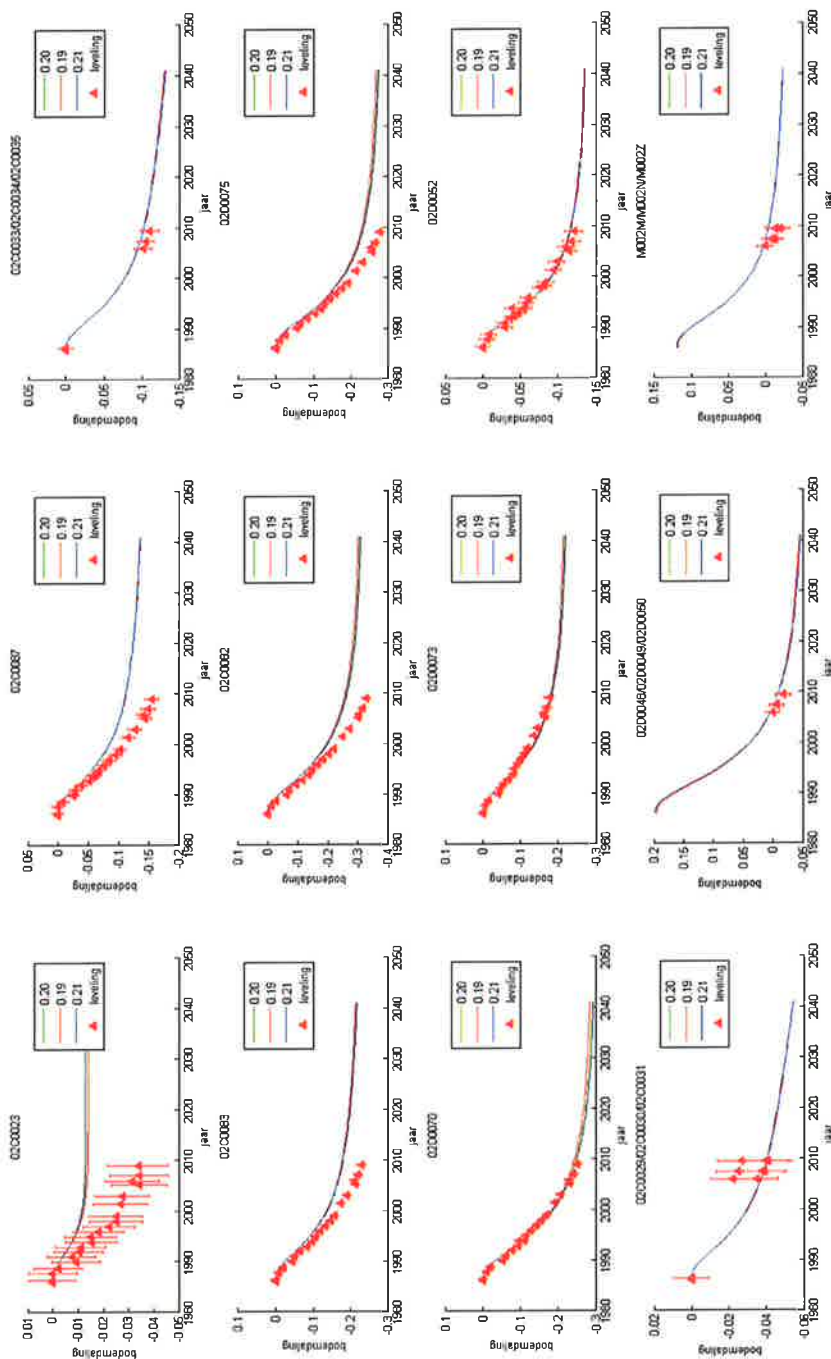
Figuur 6-6. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor de zoutkruip is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9.



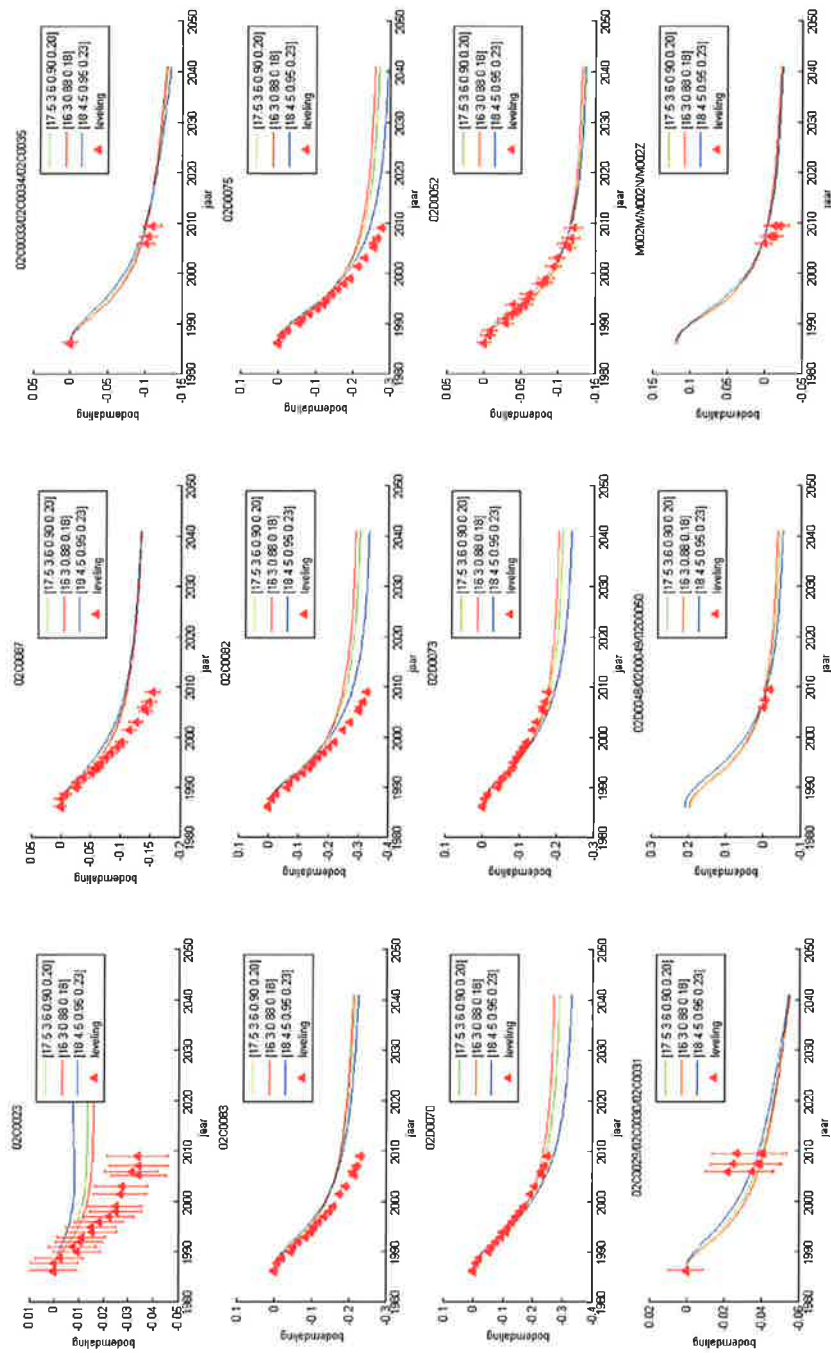
Figuur 6-7. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor de diffusie is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9.



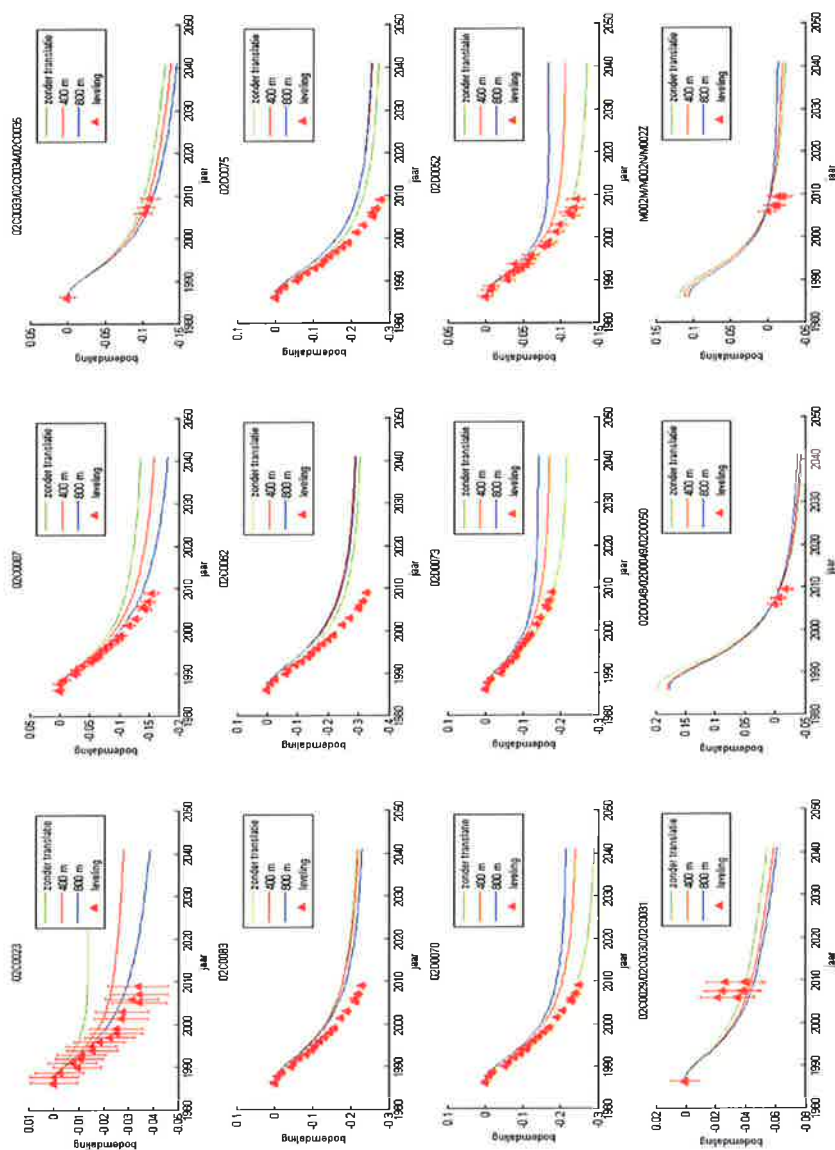
Figuur 6-8. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor het rigide basement (c/k) in de Geerstema-Van Opstal relatie is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9.



Figuur 6-9. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). De variatie in de parameter voor de verandering van het rigide basement (dc/k) in de Geerstema-Van Opstal relatie is gegeven door de gekleurde lijnen. De andere parameters zijn gelijk aan het beste model van scenario 9.

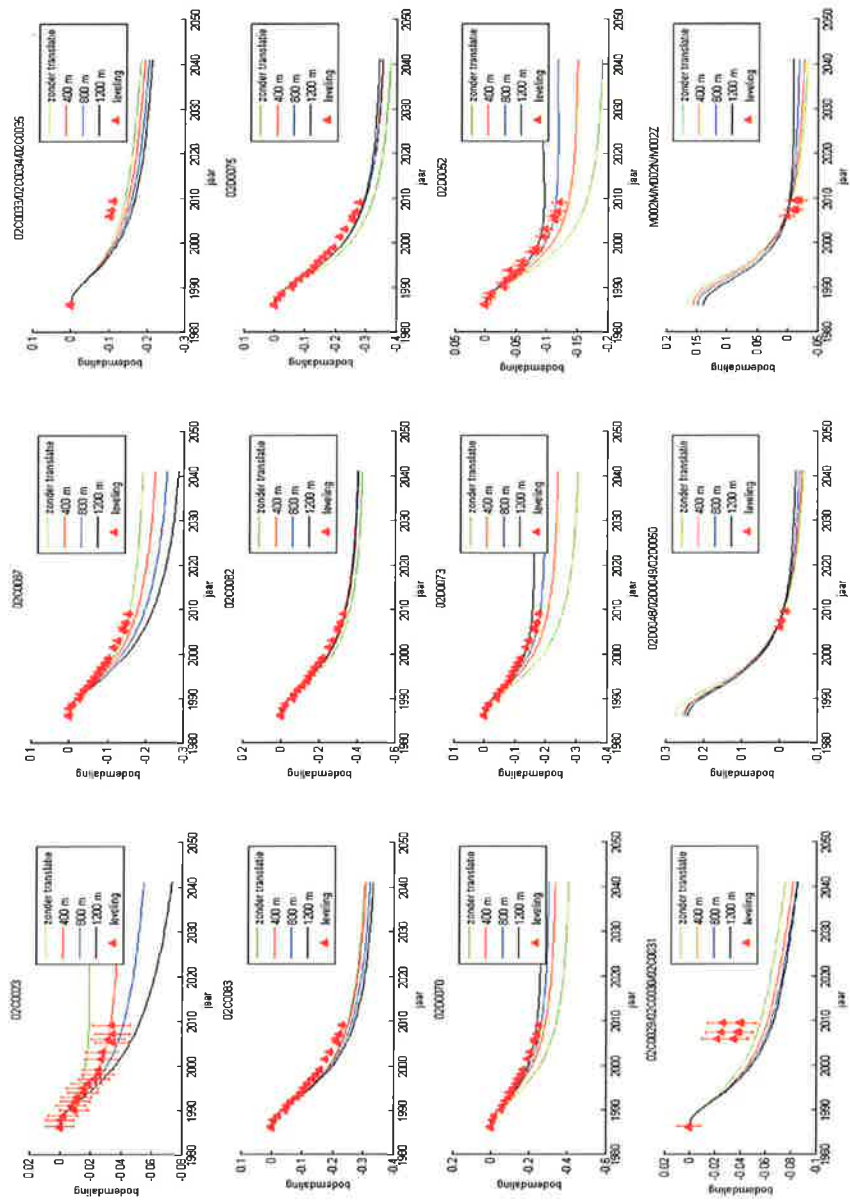


Figuur 6-10. Bodemdaling berekend met het gedeeltelijke aquifer model van Ameland (scenario 9). Er is gekozen voor twee extreme variatie van de parameters [zoutkruip, diffusie, c/k , dc/k] die nog in de oplossingsruimte voorkomt (blauwe en rode lijnen) en de parameters van het beste model van scenario 9 (groene lijn).

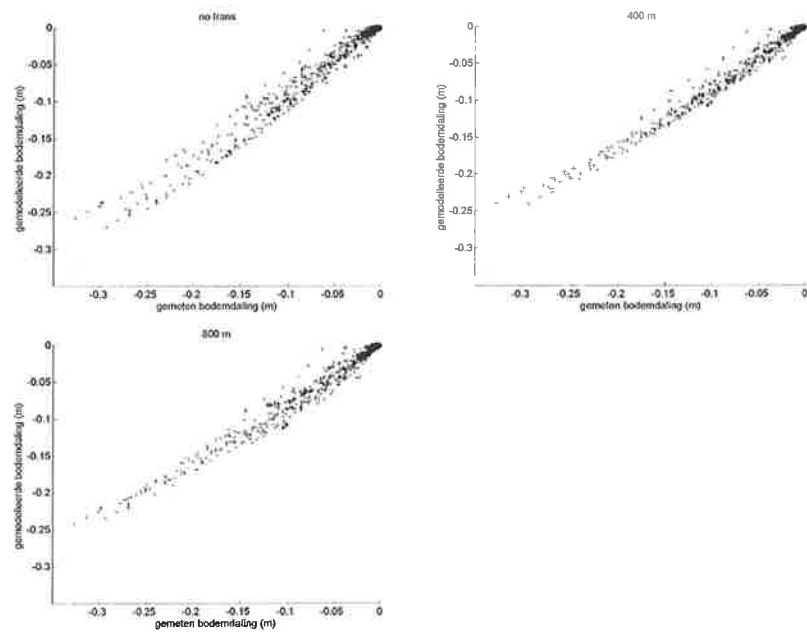


Figuur 6-11. Bodemdaling berekend met en zonder een translatieafstand van het diepste punt. De gebruikte relatie voor de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt is de gecorrigeerde van alle Rotliegend kernen (vergelijking 4).

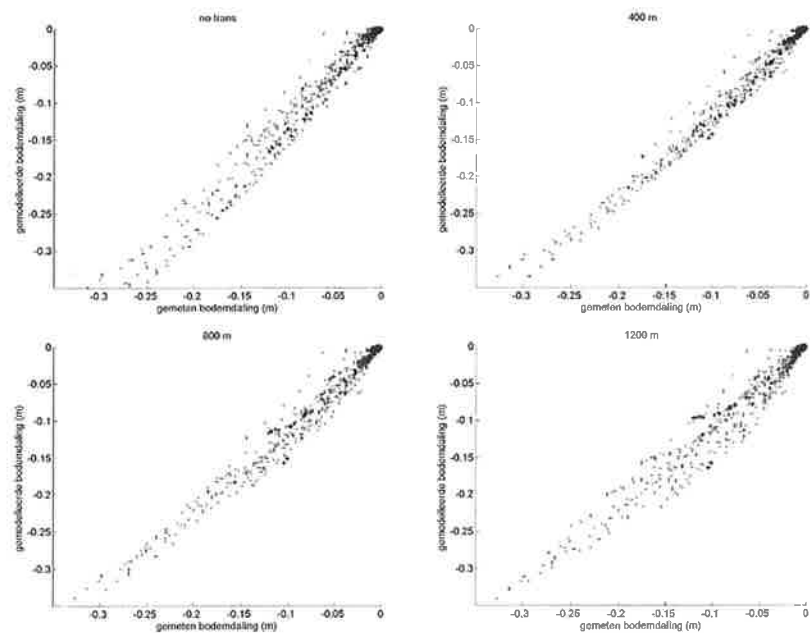
Uit de vergelijking met het numerieke model bleek eerder dat de translatie net zichtbaar was in het grid, wat een resolutie van 400 m heeft. De hier getoonde analyse laat zien dat het waarschijnlijk is dat de translatie geen numeriek artefact is maar een direct gevolg van de zoutdiapier ten oosten van Ameland waardoor lateraal grote verschillen in zoutdikte aanwezig zijn.



Figuur 6-12. Bodemdaling berekend met en zonder een translatieafstand van het diepste punt. De gebruikte relatie voor de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt is die van de Ameland kernen (vergelijking 8).



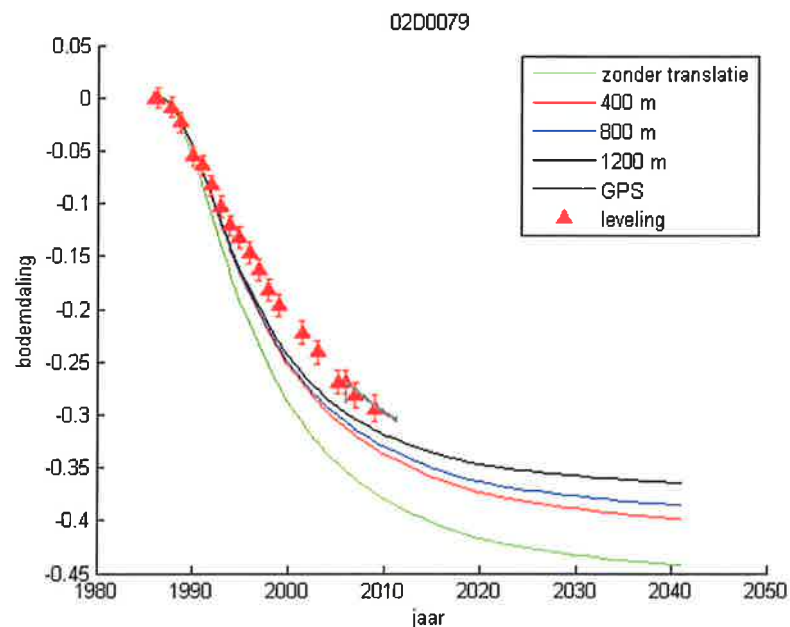
Figuur 6-13 Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van Figuur 6-11. Peilmerckdata die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn.



Figuur 6-14. Verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor de scenario's van Figuur 6-12. Peilmerckdata die gelijk zijn aan de gemodelleerde daling bevinden zich op de 45 graden lijn.

Figuur 6-15 laat de fit met het GPS punt zien wat op hetzelfde gebouw is geplaatst als peilmerk 02D0079. De gemodelleerde bodemdaling (met de relatie tussen compactiecoëfficiënt en porositeit afgeleid voor Ameland kernmateriaal, vergelijking 8) is iets groter dan de gemeten bodemdaling van het peilmerk. De GPS daling laat dezelfde bodemdalingssnelheid zien als het peilmerk 02D0079, welke wel goed overeenkomt met de bodemdalingssnelheid van het model met 400 m translatie.

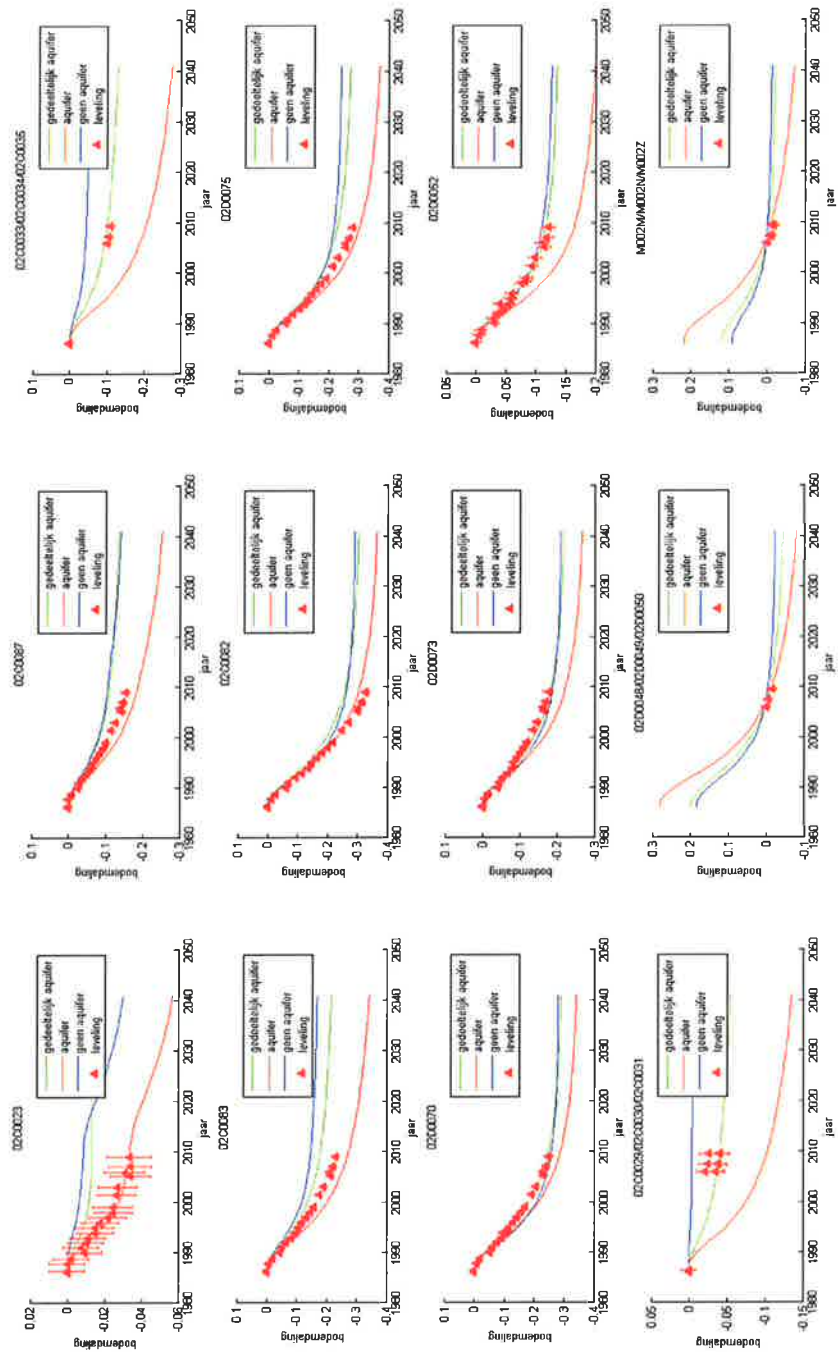
De hypothese dat een translatie van 400 - 800 m van het diepste punt van Ameland in de tijd geen numeriek artefact is maar veroorzaakt wordt door de zoutdiapier ten oosten van het eiland wordt onderbouwd door zowel de fit aan de bodemdaling als de dalingssnelheid van peilmerk 02D0079 en het GPS punt. Dit betekent ook dat deze onzekerheid bij Anjum, Metslawier en Ezumazijl geen rol speelt aangezien de zoutdiapier verder weg ligt ten noorden van de velden zodanig dat het onwaarschijnlijk is dat deze invloed heeft op het diepste punt van de bodemdalingsskom bij Anjum.



Figuur 6-15. Gemodelleerde bodemdaling van het peilmerkpunt 02D0079 en het GPS station op dezelfde locatie berekend met en zonder een translatieafstand van het diepste punt en de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt van de Ameland kernen (vergelijking 8).

6.4 Invloed van de aquifer

Als laatste wordt voor Ameland de invloed van de aquifer op de bodemdaling onderzocht. Uit de calibratie met de putgegevens (productie en drukken) is gebleken dat geen bevredigende overeenkomst verkregen kan worden indien enige drukdaling in de aquifer in de dynamische modellering werd aangenomen (NAM, 2011 d).



Figuur 6-16. Bodemdaling berekend met de MORES modellen met aquifer (rood), gedeeltelijke aquifer (groen) en waar de depletie in de aquifer is weggelaten uit het model (blauw) ($T_{zout}=17.5$, $T_{res}=3.6$, $c/k=0.90$, $dc/k=0.20$). De knik in de gemodelleerde bodemdaling rond 2012 voor punt 02C0023 berekend met het MORES model (blauwe en rode curve) met aquifer depletie wordt veroorzaakt door de depletie van dit model.

Figuur 6-16 laat de bodemdaling zien op de peilmerkpunten berekend met de gecorrigeerde compactiecoëfficiënt-porositeit relatie en voor het MORES model met aquifer, zonder aquifer en het MORES model waar de aquifer gedeeltelijk meedepleteert. Het wel of niet meedepleteren van de aquifer heeft een groot effect op de punten ten westen van het diepste punt (02C0023, 02C0087, 02C0083) op Ameland omdat de aquifers zich aan de westelijke kant van het reservoir bevinden. Ook de wadpunten laten een grote verandering zien in de gemodelleerde bodemdaling.

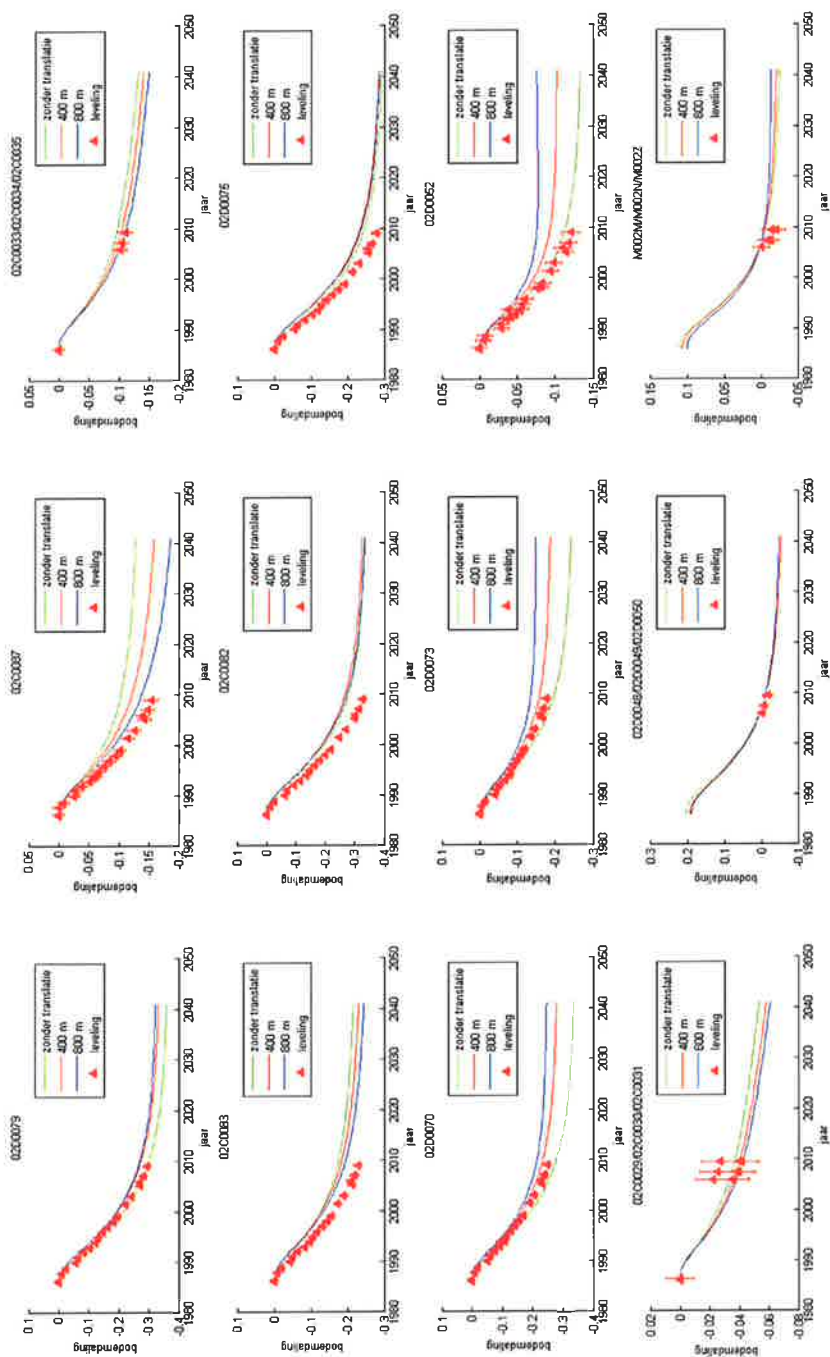
6.5 Vergelijking TNO psuedo-NAM model met modellen uit de NAM winningsplannen

Figuur 6-17 laat de bodemdaling zien zoals berekend met het TNO pseudo-NAM model, met en zonder translatie. De translatie zorgt ervoor dat de westelijke punten beter gefit worden, echter ten koste van de punten ten oosten van het diepste punt. Figuur 6-18 laat de bodemdaling bij de geselecteerde peilmerkpunten van het model uit het voorgestelde wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011" zien. De NAM modellering op de westelijke peilmerken (C-nummers) komt goed overeen met het TNO pseudo-NAM model met 800 m translatie. Echter de NAM modellering voor de oostelijke peilmerken (D-nummers) komt beter overeen met het model zonder translatie. Nabij het diepste punt is vrijwel geen verschil tussen de verschillende modellen te ontdekken. De translatie lijkt dus lateraal variabel te zijn.

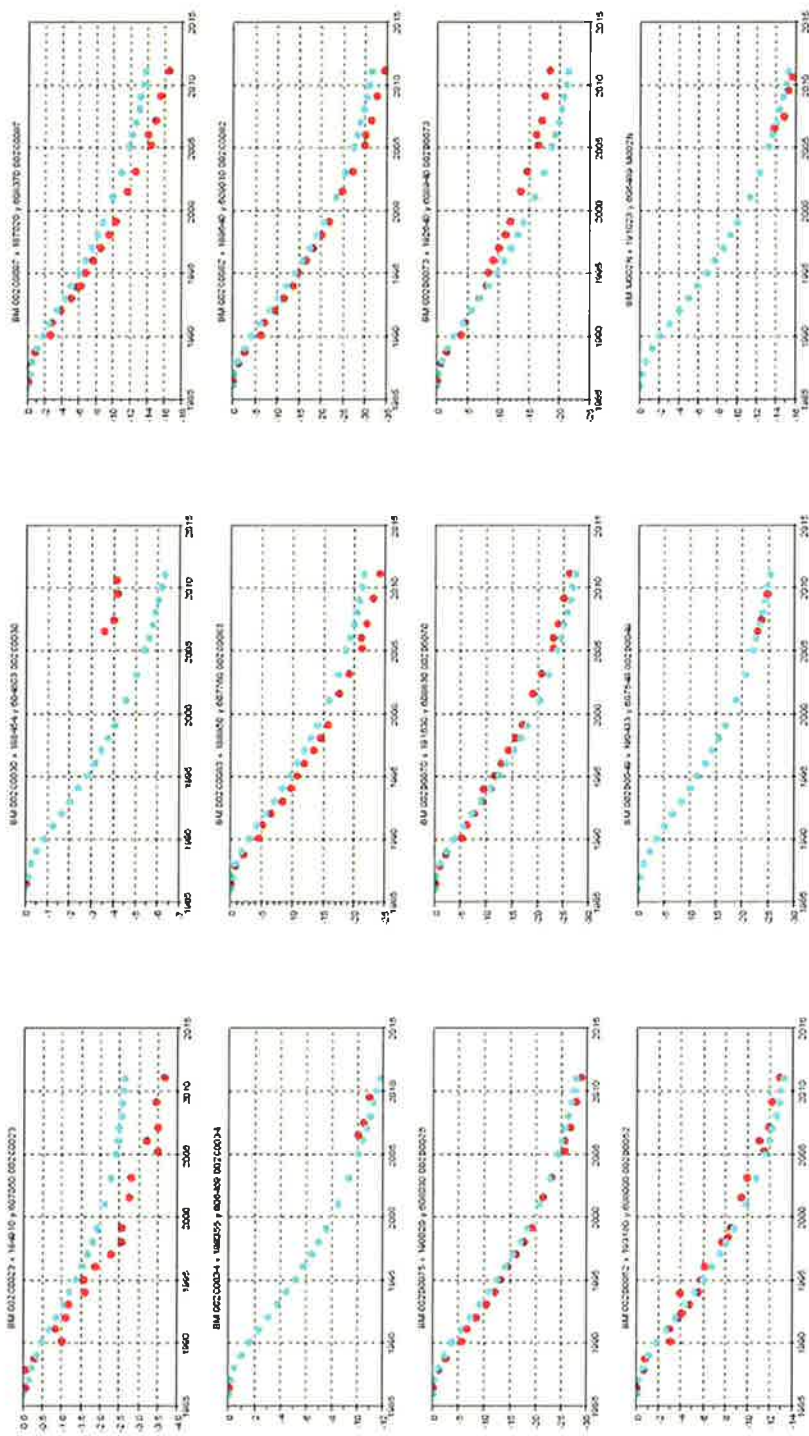
Daarnaast bleek uit Figuur 5-8 dat de compactie in het NAM model groter is dan de compactie van het TNO psuedo-NAM model, ondanks het gebruik van exact dezelfde parameters en inputgegevens. De reden hiervoor moet gezocht worden in de opschaling (zowel lateraal als in diepte) welke plaatsvindt voordat de compactie als input in het numerieke model van de NAM wordt gebruikt voor de modellering van de bodemdaling.

Geconcludeerd kan worden dat overall het TNO pseudo-NAM model met een laterale translatie van 400 m de modellering van de NAM het beste weergeeft, waarbij een afwijking van 1-2 cm ten opzichte van deze modellering in de voorgestelde wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011" wordt geïntroduceerd.

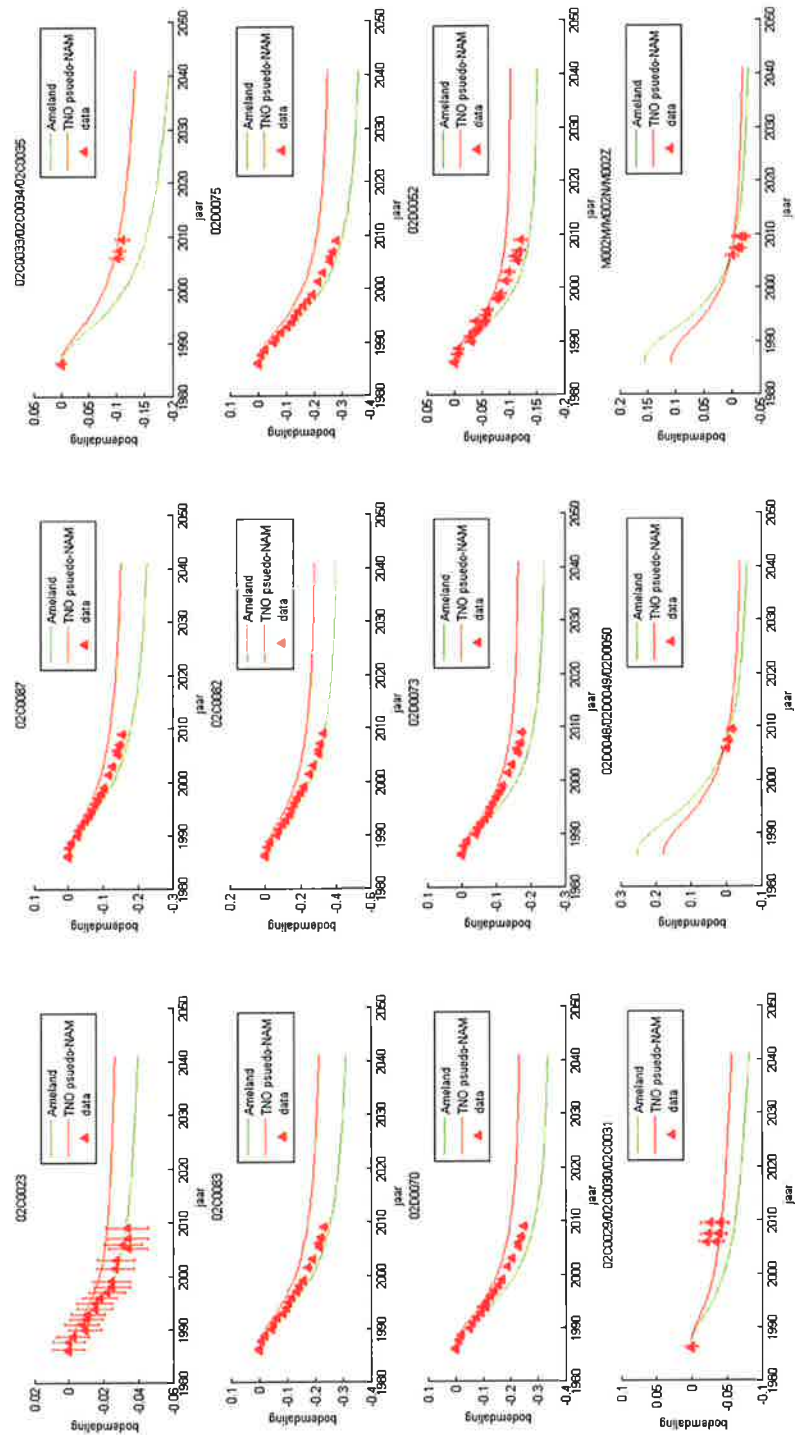
Figuur 6-19 laat tenslotte het TNO model met 400 m translatie en het compactiemodel uit vergelijking 8 en het TNO psuedo-NAM model met 400 m translatie zien. Hieruit blijkt ook dat het TNO psuedo-NAM model de bodemdaling onderschat in vergelijking met het ons model. Het TNO model laat overall een wat betere fit met de data zien.



Figuur 6-17. Bodemdaling berekend met de MORES model met gedeeltelijke aquifer depletie en de "TNO psuedo NAM" model zonder translatie, met 400 m translatie en met 800 m translatie.



Figuur 6-18. Bodemdaling volgens het model uit het voorgestelde wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011" bij de geselecteerde peilmerkpunten (van links naar rechts): C23, C30, C87;C34, C83, C82; D75, D70, D73; D52, D49, M2N.



Figuur 6-19. Bodemdaling berekend met de MORES model met gedeeltelijke aquifer depletie en het TNO model met 400 m translatie en het compactiemodel uit vergelijking 8 ("Ameland") in vergelijking met het "TNO psuedo NAM" model met 400 m translatie.

Helaas is geen informatie beschikbaar over de bodemdaling op de geselecteerde peilmerken voor het gebied rond de velden Anjum, Ezumazijl en Metslawier. Derhalve kan alleen een eenvoudige vergelijking op basis van de contourplot uit het voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011" worden gemaakt. Hieruit valt te concluderen dat het TNO psuedo-NAM model voor dit gebied redelijk goed overeen lijkt te komen met het model zoals door NAM gepresenteerd in dit voorgestelde wijziging winningsplan.

6.6 Conclusies

In dit hoofdstuk zijn de gevoeligheden van enkele keuzes en aannamen van de gevolgde methodiek onderzocht voor de gemodelleerde bodemdaling van Ameland en Anjum. Voor Ameland worden de grootste effecten veroorzaakt door het wel of niet meedepleteren van de aquifer en de keuze voor de compactiecoëfficiënt – porositeit relatie die gebuikt wordt. Daarnaast speelt de translatie van het diepste punt een belangrijke rol. De gekozen waarden voor de parameters van de zoutkruip, diffusie en de parameters van het fundament veranderen nauwelijks als meer of minder bodemdalingsdata wordt meegenomen. Deze variaties zijn een orde van grootte kleiner dan de onzekerheid in de porositeitsafhankelijke compactiecoëfficiënt en de depletie van de aquifer. Voor Anjum, Ezumazijl en Metslawier is het voornaamste effect de compactiecoëfficiënt – porositeit relatie die gebuikt wordt. De Anjum kernen en de fit met de bodemdaling geven aan dat de gemiddelde gecorrigeerde compactiecoëfficiënt – porositeit relatie een redelijke aanname is.

7 Discussie en conclusies geomechanische calibratie

7.1 Discussie calibratieresultaten

In de hoofdstukken 5 en 6 zijn voor Ameland, Anjum, Ezumazijl en Metslawier geomechanische scenario's doorgerekend en gecalibreerd aan de gemeten bodemdaling.

Voor Ameland zijn in hoofdstuk 5 tien scenario's geanalyseerd. De beste fit met de gemeten bodemdaling is in hoofdstuk 6 verkregen voor het scenario met gedeeltelijke depletie van de aanliggende aquifers. Daarbij is het compactiemodel gebaseerd op de Ameland kernen. Uit die calibratie volgde een translatie van het diepste punt van 400 m (in lijn met de numerieke resultaten NAM). In de analyse voor Anjum, Ezumazijl en Metslawier zijn vier verschillende scenario's meegenomen, waaruit in hoofdstuk 6 is geconcludeerd dat de beste overeenkomst met de gemeten bodemdaling wordt verkregen met het compactiemodel, waarbij de laboratoriummetingen gecorrigeerd zijn voor belastingsnelheid en korrelcompressibiliteit. In beide analyses wordt de beste overeenkomst verkregen met modellen, waarbij zowel zoutkruip als een diffusieproces in het reservoirgesteente wordt meegenomen in de geomechanische methodiek.

De activiteit van de aanliggende aquifers van het Ameland gasveld zou gezien de 'misfit' op de peilmerken op het Wad nog licht overschat kunnen zijn: de aquifer is waarschijnlijk minder in druk gedaald dan nu in het dynamische model is aangenomen. Bij Anjum, Ezumazijl en Metslawier is geen depletie van de aquifer meegenomen. Uit de analyse blijkt echter dat de aquifer bij Metslawier mogelijk gedeeltelijk meedepleteert (hier wordt de bodemdaling licht onderschat). De bijbehorende relaxatietijden voor de zoutkruip en het reservoirgesteente zijn consistent: 17,5 jaar voor de zoutkruip en 1 - 3,5 jaar voor de diffusie in het reservoirgesteente.

7.2 Implicaties Belasting berekeningen

Aangezien de parameterwaarden voor de Anjum, Ezumazijl, Metslawier en Ameland modellen dicht bij elkaar liggen, is er in het navolgende voor gekozen om de relaxatietijden voor alle gemodelleerde velden dezelfde parameterwaarden als uitgangspunt te kiezen als die afgeleid voor Ameland.

Ter vergelijking zullen ook de resultaten worden getoond van berekeningen die zijn gedaan met de parameterwaarden zoals opgegeven door de NAM in haar voorstel tot wijziging winningsplan "Ameland ver. 30-09-2011", respectievelijk "Anjum ver. 30-09-2011".

Een overzicht van de beschouwde scenario's voor Ameland en Anjum is gegeven in Tabel 7-1 en Tabel 7-2. Voor de worst case scenario van Ameland wordt het volledige meedepletende aquifer model genomen in combinatie met de Ameland compactiecoëfficiënt – porositeit relatie met daarbovenop nog 20% onzekerheid. Dit scenario zal de grootste bodemdaling tot gevolg hebben en houdt er rekening mee, dat mogelijk in de toekomst er toch nog volledige depletie van de aquifer zou kunnen optreden. In hoofdstuk 8 wordt voor de verwachtingswaarde voor de Belasting van Ameland de prognose van de bodemdaling bepaald door het

geomechanische scenario dat de data het beste fit (Best Estimate (BE) in Tabel 7-1).

Tabel 7-1. Parameterwaarden van drie scenario's voor Ameland voor de bodemdalingsanalyses. Het TNO pseudo- NAM scenario volgt de parameterwaarden van de NAM uit het wijziging winningsplan "Ameland 2011 2011 rev.30-09-2011".

| | Analyse scenario | T_{res} (jaar) | T_{zout} (jaar) | $c/k(0)$ | dc/k |
|--------------------|--|------------------|-------------------|----------|--------|
| Best Estimate (BE) | part aquifer model, vergelijking 5, 400 m translatie | 3,6 | 17,5 | 0,90 | 0,20 |
| Worst case (WC) | part aquifer model, vergelijking 5+20%, 400 m translatie | 3,6 | 17,5 | 0,90 | 0,20 |
| TNO pseudo-NAM | part aquifer model, NAM relatie 400 m translatie | 5,0 | 18,7 | 1,0 | 0,20 |

Tabel 7-2. Parameterwaarden van drie scenario's voor Anjum, Ezumazijl en Metslawier, die in het volgende hoofdstuk zullen worden gebruikt voor de bodemdalingsanalyses. 'Worst case' gebruikt de relaxatietijden gevonden voor Ameland. 'Best case' gebruikt de relaxatietijden gevonden in de analyse van het gebied met de Anjum, Ezumazijl en Metslawier voorkomens en 'TNO psuedo-NAM' gebruikt de relaxatietijden van het zout en reservoirgesteente conform de voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011".

| | T_{res} (jaar) | T_{zout} (jaar) | $c/k(0)$ | dc/k |
|--------------------|------------------|-------------------|----------|--------|
| Best Estimate (BE) | 1.0 | 17.5 | 0.75 | 0.17 |
| Worst case (WC) | 3.6 | 17.5 | 0.75 | 0.17 |
| TNO pseudo-NAM | 5 | 18.7 | 0.90 | 0.17 |

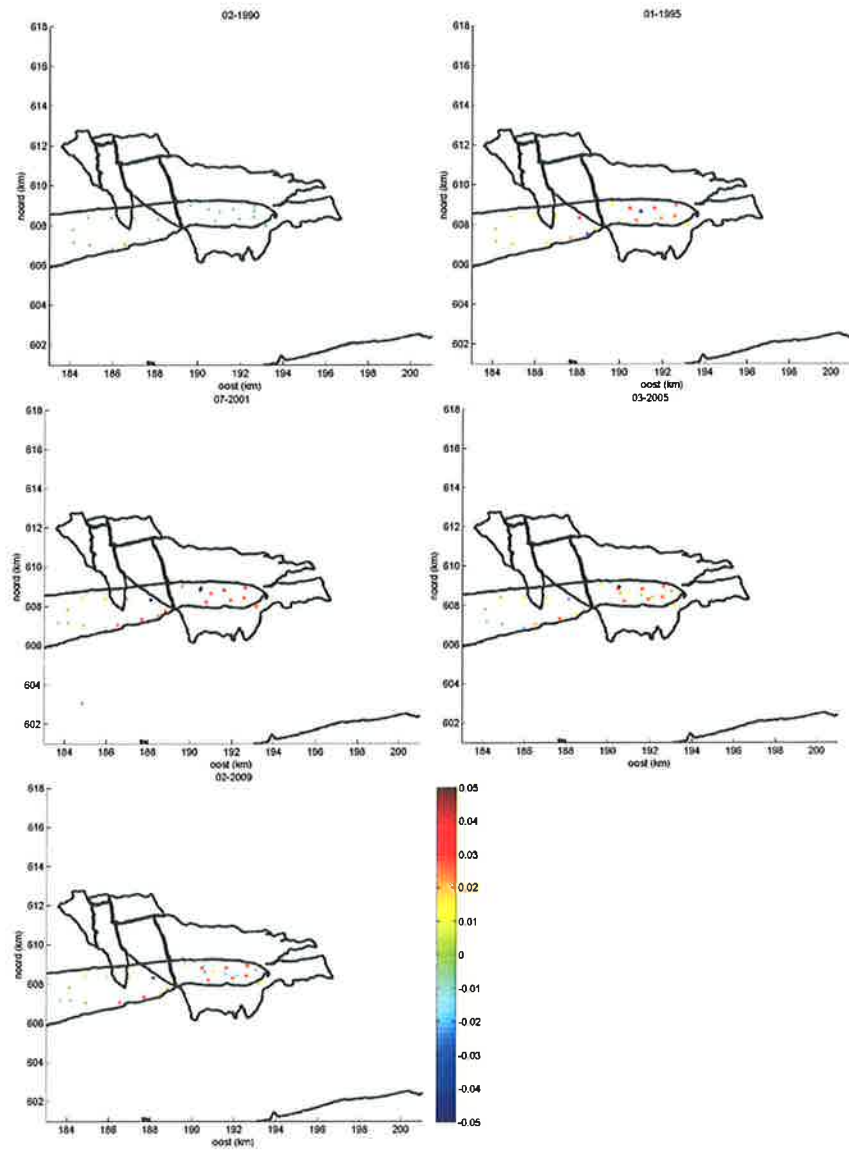
7.3 Ruimtelijke misfit tussen gemeten en gemodelleerde bodemdaling

Figuur 7-1 en Figuur 7-2 geven de ruimtelijke verschillen weer tussen de gemeten en gemodelleerde bodemdaling voor Ameland, Anjum, Metslawier en Ezumazijl op enkele tijdstippen, waarop de peilmerken aangemeten zijn. De bodemdaling van Ameland is berekend volgens het BE scenario (Tabel 7-1). In het geval van Anjum, Metslawier en Ezumazijl is het scenario BE uit Tabel 7-2 toegepast.

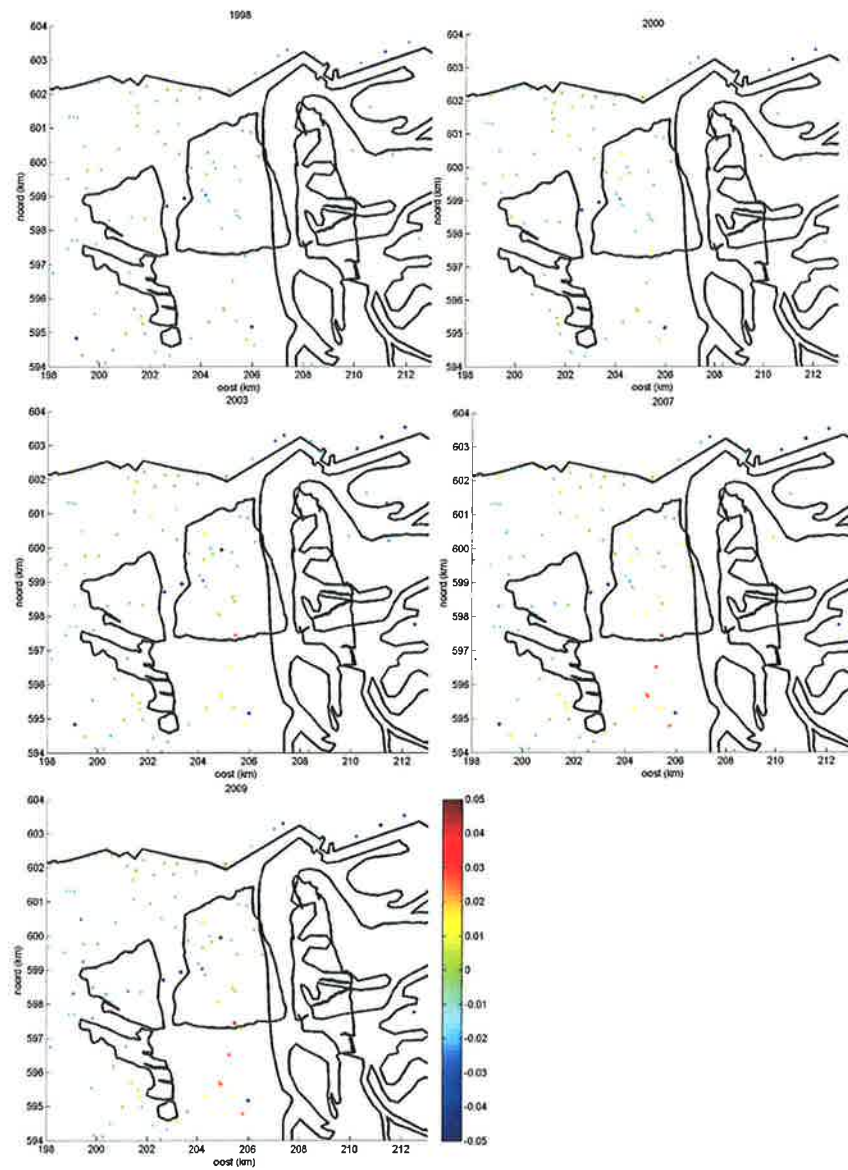
Voor Ameland wordt door het model de bodemdaling licht overschat, behalve voor de westelijke punten op het eiland. Dit is ook te zien in Figuur 6-12. De verschillen nemen niet toe in de tijd, wat aangeeft dat het beste model de trend van de bodemdaling goed volgt. Zoals in Hoofdstuk 5 aangegeven is de onzekerheid in de peilmerkmetingen afhankelijk van de tijd en loopt op tot ± 3 cm in 2009. Het merendeel van de verschillen ligt binnen deze onzekerheid.

Voor Anjum wordt door het model de bodemdaling licht onderschat (Tabel 5-6). Deze onderschatting verandert voor de peilmerken ten zuiden van het Anjumveld voor de recentere waarnemingen in een lichte overschatting (tot 2 cm). Voor de rest van het gebied blijft een licht onderschatting van de bodemdaling zichtbaar. De verschillen laten, net als in Figuur 5-11 en Figuur 5-12, meer scatter zien, die

veroorzaakt wordt door de peilmerkdata zelf en de bijdrage van velden in de buurt van de Anjum, Ezumazijl en Metslawier (e.g. Nes, Moddergat), die niet meegenomen zijn in deze analyse.



Figuur 7-1. Vergelijking tussen de gemeten bodemdaling en de gemodelleerde bodemdaling (Ameland relatie, vergelijking 8 en 400 m translatie) voor Ameland op de aangegeven tijdstippen. Positieve waarden geven een overschatting van de gemeten bodemdaling, negatieve waarden een onderschatting.



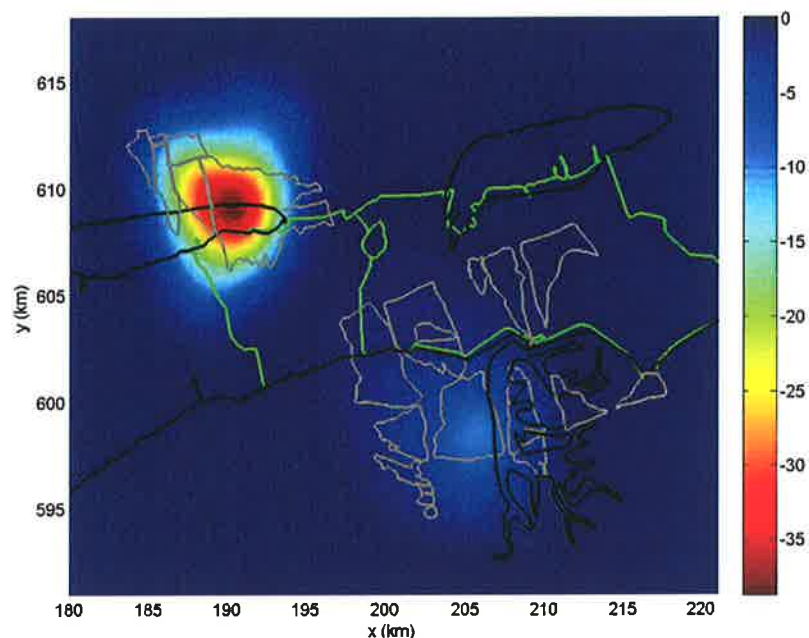
Figuur 7-2. Vergelijking tussen de gemeten bodemdaling en de gemodelleerde bodemdaling voor Anjum, Metslawier en Ezumajil op de aangegeven tijdstippen. Positieve waarden geven een overschatting van de gemeten bodemdaling, negatieve waarden een onderschatting.

8 Bodemdaling

Dit hoofdstuk beschrijft de prognose voor de bodemdaling en de Belasting op de Gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van gaswinning uit de voorkomens Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Vierhuizen, Lauwersoog-Oost, -West en -Centraal.

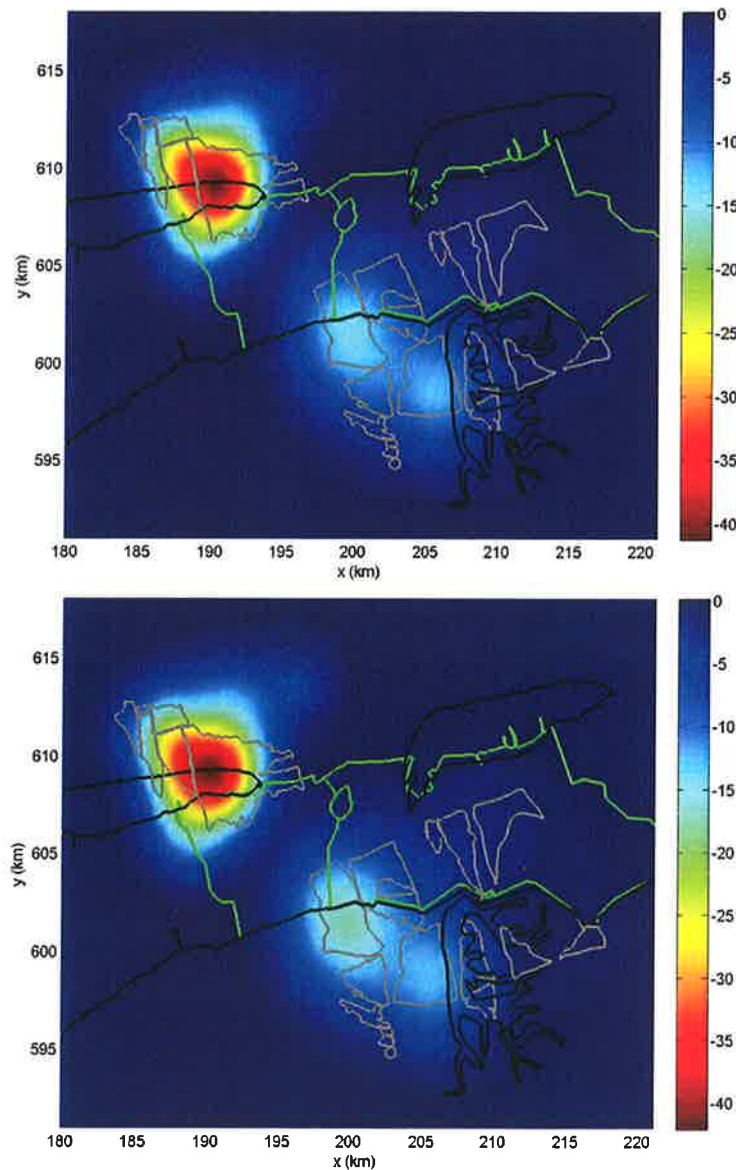
8.1 Bodemdalingsprognose

Figuur 8-1 en Figuur 8-2 laten de bodemdalingsprognose zien voor respectievelijk 2011, 2025 en 2050. Voor deze prognoses zijn de productieprofielen gebruikt zoals beschreven in de voorgestelde wijziging winningsplan "Ameland 2011 rev.30-09-2011", wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011" en wijziging winningsplan "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011 rev.30-09-2011". Voor Ameland is de prognose gebaseerd op het 'best case' scenario uit Tabel 7-1. Voor Anjum, Ezumazijl en Metslawier is eveneens de prognose bepaald op basis van het scenario "best case" uit Tabel 7-2.



Figuur 8-1. Bodemdaling (cm) in 2011. In zwart de topografie van de Waddenzee, in grijs de contouren van de gasvelden en in groen de contouren van kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.

De bodemdaling veroorzaakt door de gaswinning uit het Ameland voorkomen domineert met ruim 38 cm in het diepste punt. Deze bodemdaling neemt iets toe in de tijd naar 42 cm in 2050. Verder kan de bodemdaling ook ten gevolge van de gaswinning uit Anjum, Ezumazijl en Metslawier herkend worden met ongeveer 10 cm bodemdaling in 2011.

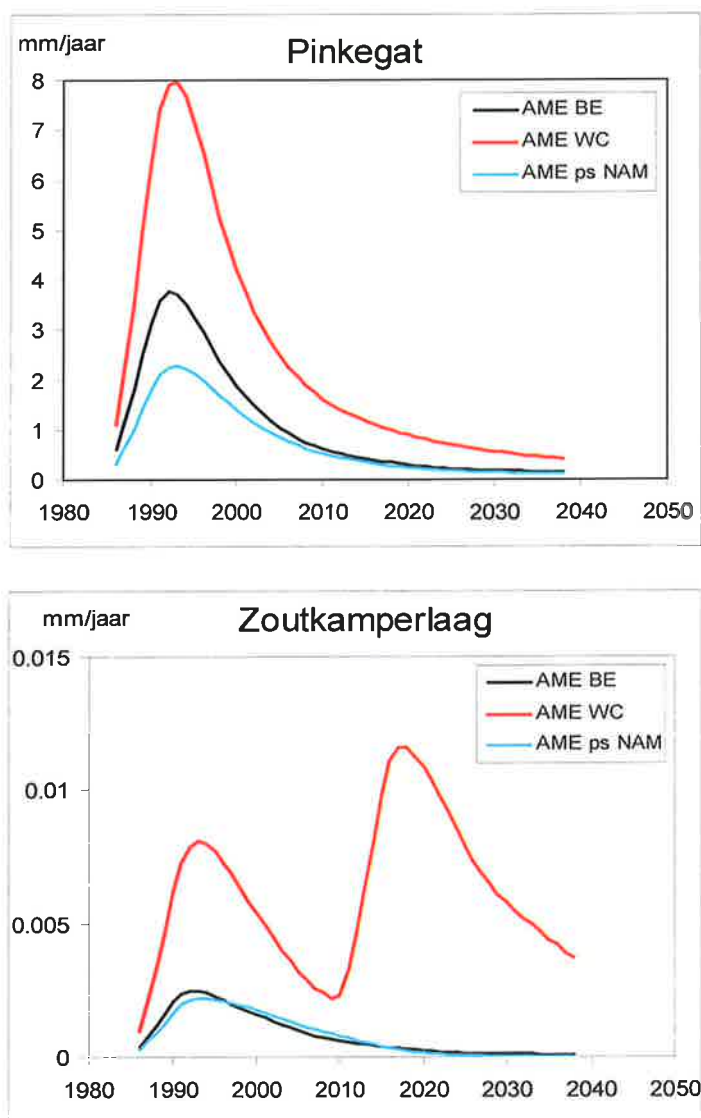


Figuur 8-2. Bodemdaling (cm) voorspelling in 2025 (boven) en 2050 (onder). In zwart de topografie van de Waddenzee, in grijs de contouren van de gasvelden en in groen de contouren van komberginsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.

In 2025 word ook de bodemdalingskom ten gevolge van de gaswinning uit Nes en Moddergat zichtbaar met ongeveer 15 cm bodemdaling in het diepste punt. De bodemdaling boven Anjum, Ezumazijl en Metslawier is dan toegenomen tot ongeveer 13 cm. Uiteindelijk is in 2050 het diepste punt van de bodemdalingskom van Nes en Moddergat gedaald tot 19 cm en de bodemdalingskom van Anjum, Ezumazijl en Metslawier tot ongeveer 14 cm. De bodemdalingskommen van de Lauwersoog velden (oost, centraal en west) en Vierhuizen zijn niet zichtbaar in deze figuren vanwege de geringe voorspelde bodemdaling (< 5 cm).

8.2 Belasting op de gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van gaswinning uit de "bestaande" velden

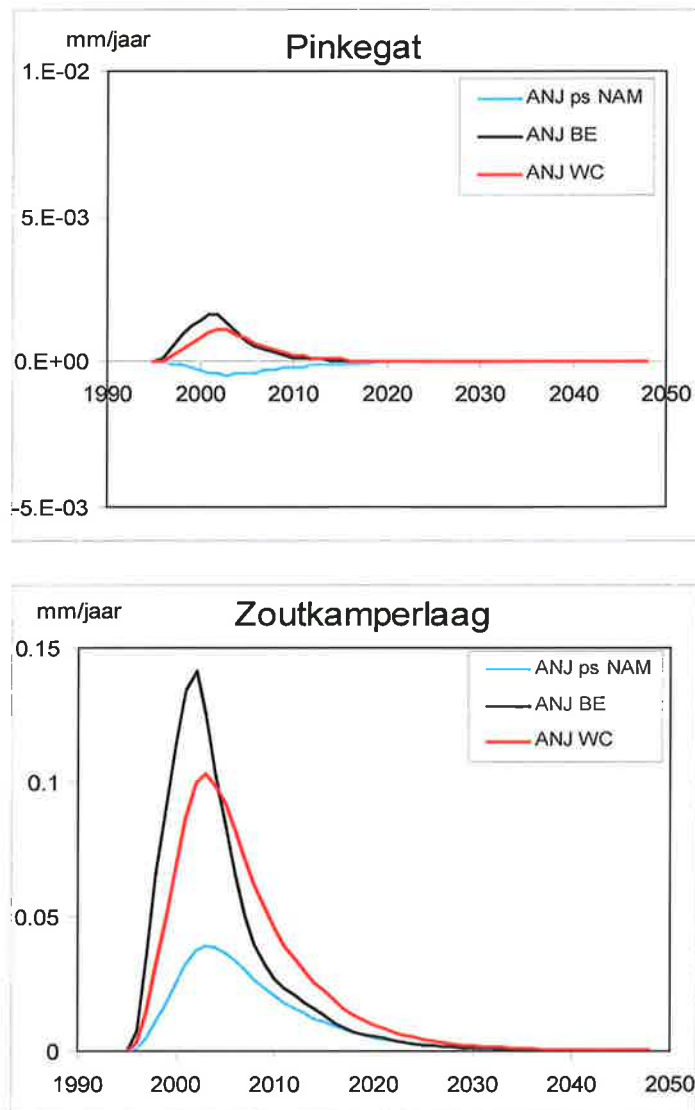
Per voorkomen zal kort de Belasting ten gevolge van de verschillende geomechanische scenario's van Ameland, Anjum, Ezumazijl en Metslawier op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag worden besproken en wordt de verwachtingswaarde voor de belasting (Best Estimate) samen met de Worst Case bepaald.



Figuur 8-3. De verwachtingswaarde (BE), het 'worst case' (WC) scenario en het TNO psuedo-NAM scenario (ps NAM; Tabel 7-1) voor de Belasting (mm/jaar) van het Ameland voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

8.2.1 Ameland

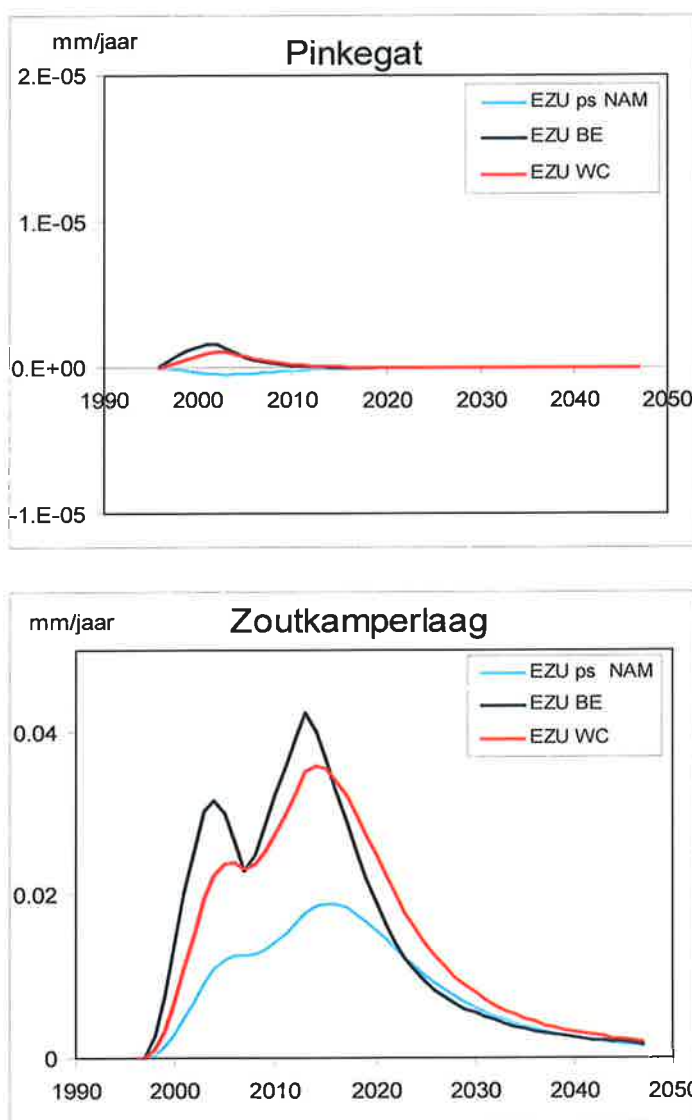
Figuur 8-3 laat de Belasting zien voor drie scenario's (zie Tabel 7-1) voor Ameland. Het TNO pseudo-NAM scenario geeft de laagste bodemdalingssnelheden en het 'worst case' (WC) scenario de hoogste. Het Ameland voorkomen geeft de grootste belasting in het kombergingsgebied Pinkegat. In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het Ameland voorkomen slechts een zeer geringe Belasting. In kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft het "WC" scenario een dubbele piek. Dit is direct gerelateerd aan de drukkaling in Ameland Westgat in het dynamische scenario waarbij de aquifer volledig meedepleteert.



Figuur 8-4. De verwachtingswaarde (BE), het 'worst case' (WC) scenario en het TNO pseudo-NAM scenario (ps NAM) voor de Belasting (mm/jaar) van het Anjum voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

8.2.1 Anjum

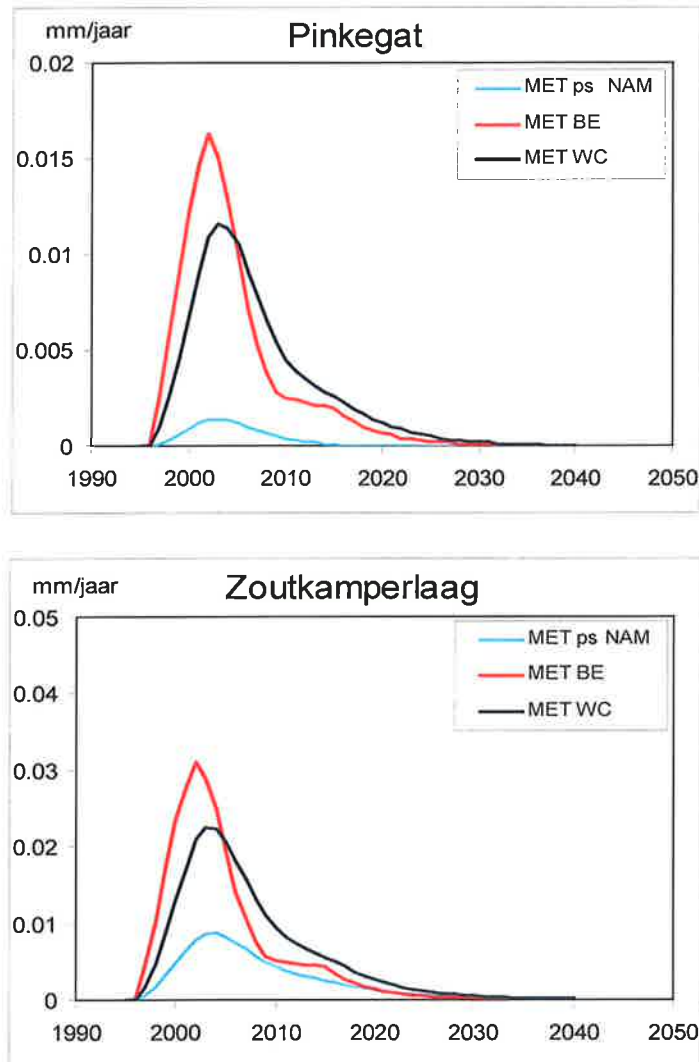
Figuur 8-4 laat de Belasting zien voor de drie scenario's (Tabel 7-2) ten gevolge van gaswinning uit het voorkomen Anjum. Het "TNO pseudo-NAM" scenario geeft de laagste bodemdalingssnelheden en het "WC" scenario de hoogste. Het Anjum gasveld veroorzaakt de grootste Belasting in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vanwege de kleinere afstand naar dit gebied. Deze belasting is echter zeer gering. De bodemstijging (negatieve belasting) voor het TNO pseudo-NAM scenario wordt veroorzaakt door de Van Opstal formule, die lichte stijging geeft aan de rand van de bodemdalingsskom.



Figuur 8-5. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Ezumazijl. "ps NAM", "BE" en "WC" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 7-2. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

8.2.1 Ezumazijl

Figuur 8-5 laat de verwachtingswaarde voor de Belasting (B) zien voor de drie scenario's (Tabel 7-2) ten gevolge van gaswinning uit het voorkomen Ezumazijl. De verwachtingswaarde voor de Belasting van Zoutkamperlaag is groter dan die op Pinkegat, maar beide zijn minder dan een tiende millimeter per jaar.



Figuur 8-6. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Metslawier. "ps NAM", "BE" en "WC" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 7-2. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

8.2.1 Metslawier

Figuur 8-6 laat de gemiddelde Belasting zien voor de drie scenario's (Tabel 7-2) ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Metslawier. De Belasting op Zoutkamperlaag is groter dan op Pinkegat. Het maximum trad op rond het jaar 2000 met 0,03 mm/jaar. Voor Metslawier geldt, net als voor Anjum, dat het pseudo-NAM

scenario (ps NAM) de laagste piek geeft, het "WC" scenario de hoogste en het "BE" scenario daar tussen in ligt.

8.3 Belasting op de gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van gaswinning uit de Wadden I velden

Per voorkomen zal kort de belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag worden besproken ten gevolge van de verschillende dynamische en geomechanische scenario's van Nes, Moddergat en de Lauwersoog velden met Vierhuizen. Vervolgens wordt de verwachtingswaarde voor de belasting (Best Estimate) samen met de Worst Case bepaald. Aangezien de diepte waarop de Waddenzee velden gelegen zijn overeenkomen met de diepte waarop Anjum, Ezumazijl en Metslawier zich bevinden zijn de gebruikte geomechanische scenario's voor de Waddenzee velden analoog aan deze naburige "bestaande" velden genomen (Tabel 8-1).

Tabel 8-1. Parameterwaarden voor drie geomechanische scenario's voor de bodemdalingsanalyses. 'Ameland' gebruikt de relaxatietijden gevonden voor Ameland. 'Anjum' gebruikt de relaxatietijden gevonden in de analyse van het gebied met de voorkomens Anjum, Ezumazijl en Metslawier en 'TNO psuedo-NAM' gebruikt de relaxatietijden van het zout en reservoirgesteente conform de voorgestelde wijziging winningsplan "Anjum 2011 rev.30-09-2011".

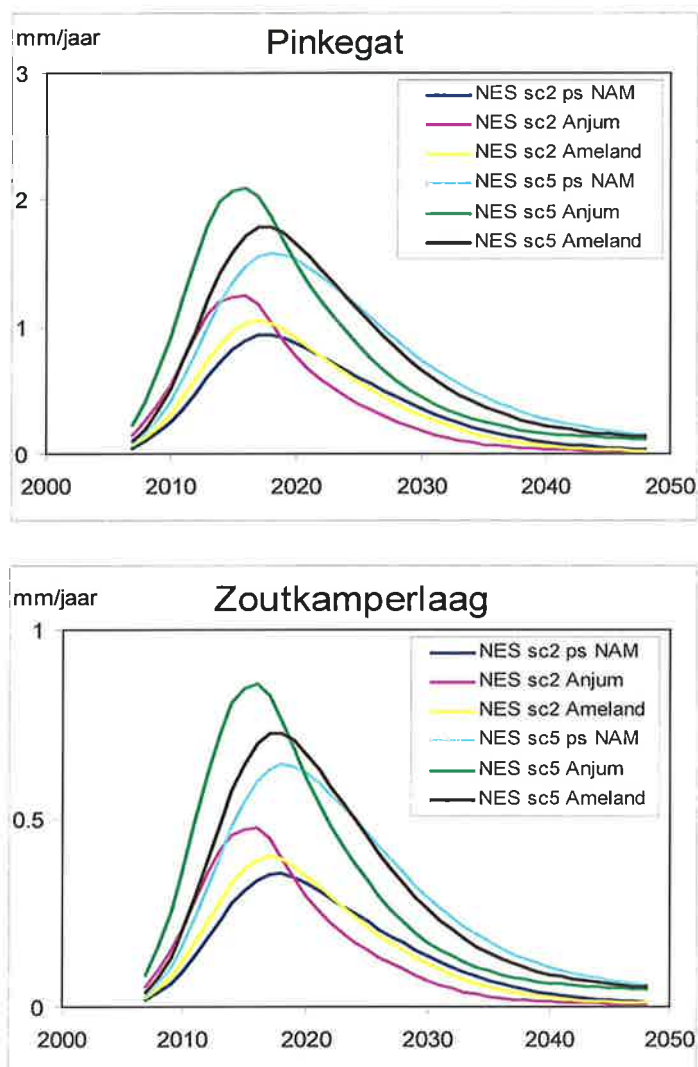
| | T_{res} (jaar) | T_{zout} (jaar) | c/k(0) | dc/k |
|----------------|------------------|-------------------|--------|------|
| Anjum | 1,0 | 17,5 | 0,75 | 0,17 |
| Ameland | 3,6 | 17,5 | 0,75 | 0,17 |
| TNO psuedo-NAM | 5,0 | 18,7 | 0,90 | 0,17 |

8.3.1 Nes

De reservoir-dynamische scenario's voor Nes zijn gegeven in Tabel 4-1. Samengevat zijn dit: de base case (1), zonder aquifer depletie (2), maximale aquifer depletie (3), lage GIIP (4) en hoge GIIP (5). Er is ook nog een variatie op scenario 5 doorgerekend met een extra put, maar deze bleek zeer kleine verschillen met scenario 5 in termen van bodemdaling te hebben waardoor deze variatie op scenario 5 verder niet is meegenomen. In hoofdstuk 3 zijn voor elk van deze scenario's de uitkomsten van de calibratie van de reservoir-dynamische modellen besproken. Op basis hiervan zijn scenario's 1, 3 en 4 niet verder meegenomen voor de bodemdalingmodellering.

Voor de reservoir-dynamische scenario's 2 en 5 zijn de drie geomechanische scenario's uit Tabel 8-1 doorgerekend. Scenario 5 geeft een goede GIIP en scenario 2 een te lage GIIP, vanwege het niet depletieren van de aquifer. Scenario 5 met een depletierende aquifer geeft een duidelijk grotere Belasting in de kombergingsgebieden dan het scenario zonder depletie in de aquifer (sc2; Figuur 8-7). De verschillende geomechanische scenario's (Tabel 8-1) bepalen vooral de timing van de Belasting. De totale Belasting op de kombergingsgebieden is voor deze scenario's gelijk. Dit is een direct gevolg van het feit dat de totale productie opgelegd is door het productieprofiel uit de wijziging winningsplan "Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011 rev.30-09-2011" en de variatie in de scenario's derhalve alleen de timing van de depletie beïnvloed. De langere relaxatietijden voor het reservoirgesteente voor de pseudo-NAM scenario's geven in eerste instantie

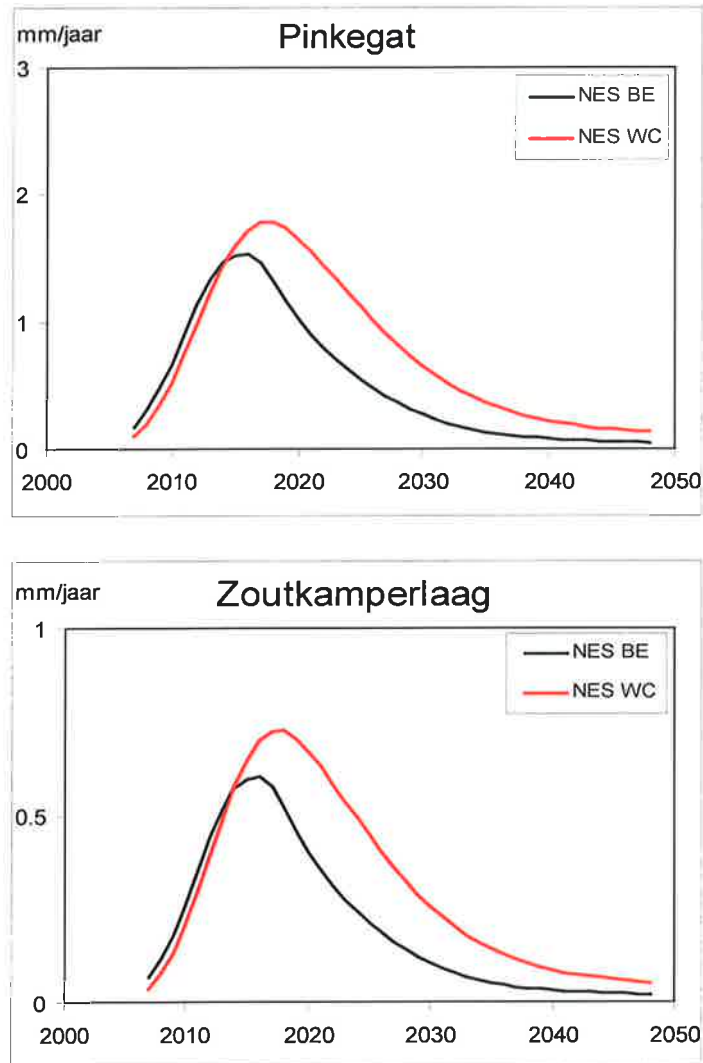
(tussen 2010 en 2020) een lagere Belasting. Echter na 2020 geeft dit scenario ("ps NAM") een grotere Belasting op de kombergingsgebieden.



Figuur 8-7. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen NES. "ps NAM", "Anjum" en "Ameland" verwijzen naar de drie geomechanische scenario's uit Tabel 8-1. Sc2 en sc5 verwijzen naar de reservoir-dynamische scenario's. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

Op dit moment is nog niet te bepalen of de depletie in de aquifer van Nes te vergelijken zal zijn met het aquifergedrag bij Ameland of met dat bij Anjum. Daarom is in dit stadium de verwachtingswaarde voor de Belasting (BE) van het voorkomen NES op de kombergingsgebieden bepaald door een gewogen ($2/3$ sc.2 vs $1/3$ sc.5) combinatie van de twee reservoir-dynamische scenario's. Het 'worst case' (WC) scenario wordt gegeven door volledige depletie van de aquifer (dynamisch scenario 5) en gebruikt de geomechanische parameters van 'Ameland' (Tabel 8-1). Figuur 8-8 laat de verwachtingswaarde voor de Belasting (BE) en het 'worst case' (WC)

scenario ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen NES op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag zien.

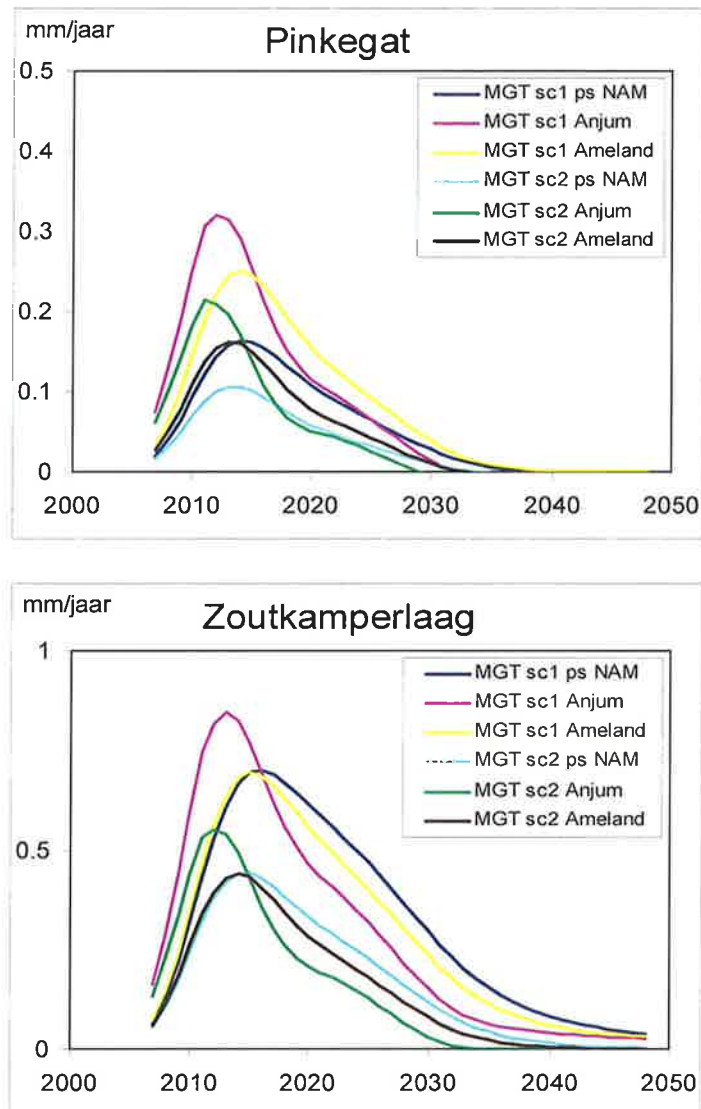


Figuur 8-8. De verwachtingswaarde (BE) en het 'worst case' (WC) scenario voor de Belasting (mm/jaar) van het NES voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

8.3.2 Moddergat

De reservoir-dynamische scenario's voor Moddergat zijn gegeven in Tabel 4-1. Samengevat zijn dit: een base case (1), zonder aquifer depletie (2), maximale aquifer depletie (3), lage GIIP (4), hoge GIIP (5) en met een niet permeabele interne breuk (6). In hoofdstuk 3 zijn voor elk van deze scenario's de uitkomsten van de calibratie van de dynamische modellen besproken. Op basis hiervan zijn scenario's 3-6 niet verder meegenomen voor de bodemdalingmodelering.

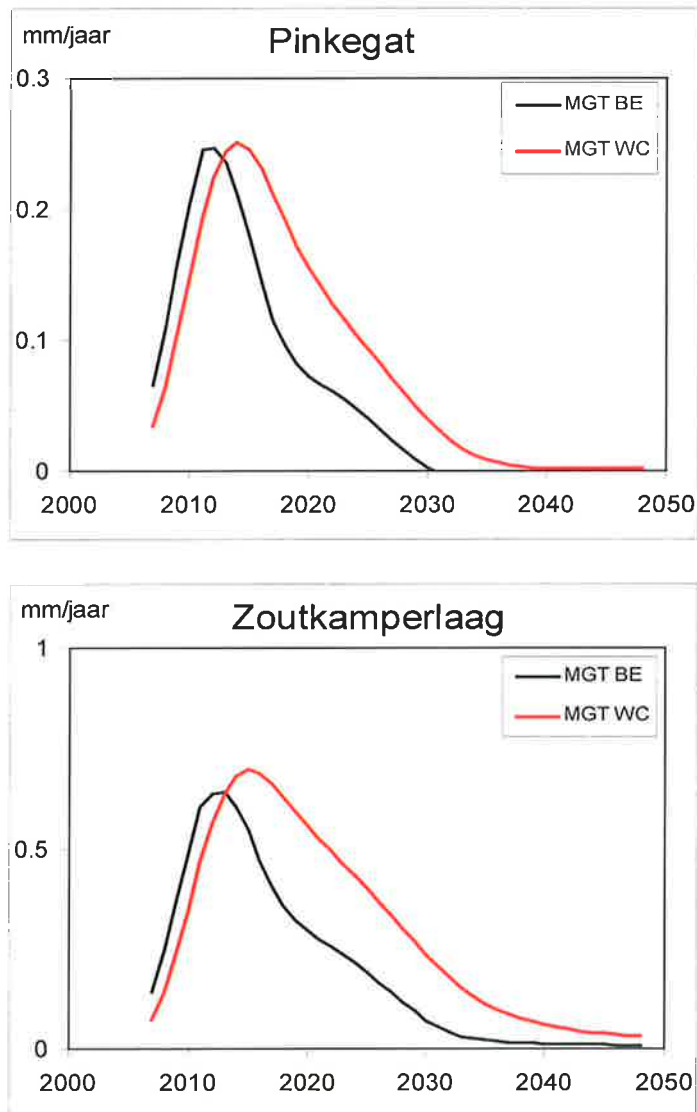
Voor de dynamische scenario's 1 en 2 zijn de drie geomechanische scenario's uit Tabel 8-1 doorgerekend. In Figuur 8-9 is te zien, dat net als bij NES het scenario met aquifer depletie (scenario 1) een grotere Belasting op de kombergingsgebieden geeft dan het scenario zonder aquifer depletie (scenario 2). Ook de invloed van de langere relaxatietijden op het verloop van de Belasting is duidelijk te zien.



Figuur 8-9. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Moddergat. "ps NAM", "Anjum" en "Ameland" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 8-1. Sc1 en sc2 verwijzen naar de dynamische scenario's. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

De verwachtingswaarde voor de Belasting ten gevolge van de gaswinning uit Moddergat is gegeven in Figuur 8-10 (BE). Omdat er nog pas korte tijd gas uit het Moddergat veld is geproduceerd, zijn de karakteristieken van het aquifergedrag nog niet uit meetgegevens af te leiden. In de bepaling van de verwachtingswaarde is

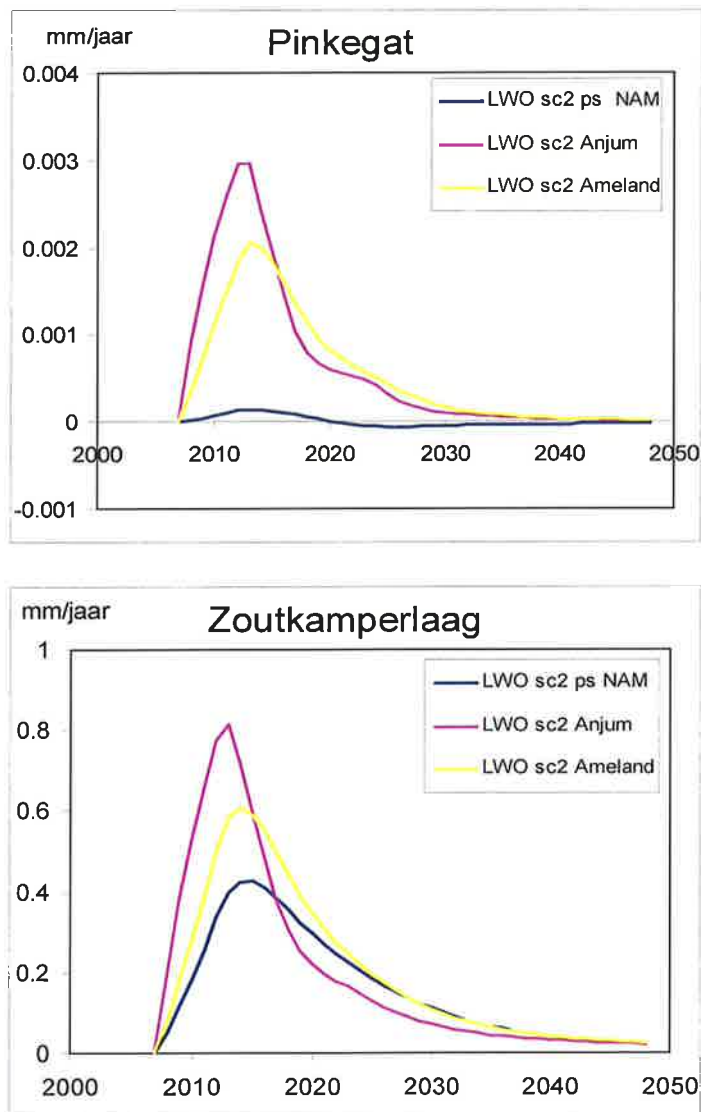
ervan uitgegaan, dat het veld de depletie in de aquifer volgt zoals waargenomen bij Ameland. Het 'worst case' (WC) scenario wordt gegeven door instantane depletie van de aquifer (dynamisch scenario 1) en gebruikt de geomechanische parameters van 'Ameland' (Tabel 8-1). Figuur 8-10 toont de verwachtingswaarde voor de Belasting (BE) en de 'worst case' (WC) scenario's ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Moddergat op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.



Figuur 8-10. De verwachtingswaarde (BE) en het 'worst case' (WC) scenario voor de Belasting (mm/jaar) van het Moddergat voorkomen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

8.3.3 Lauwersoog Oost, West en Centraal en Vierhuizen

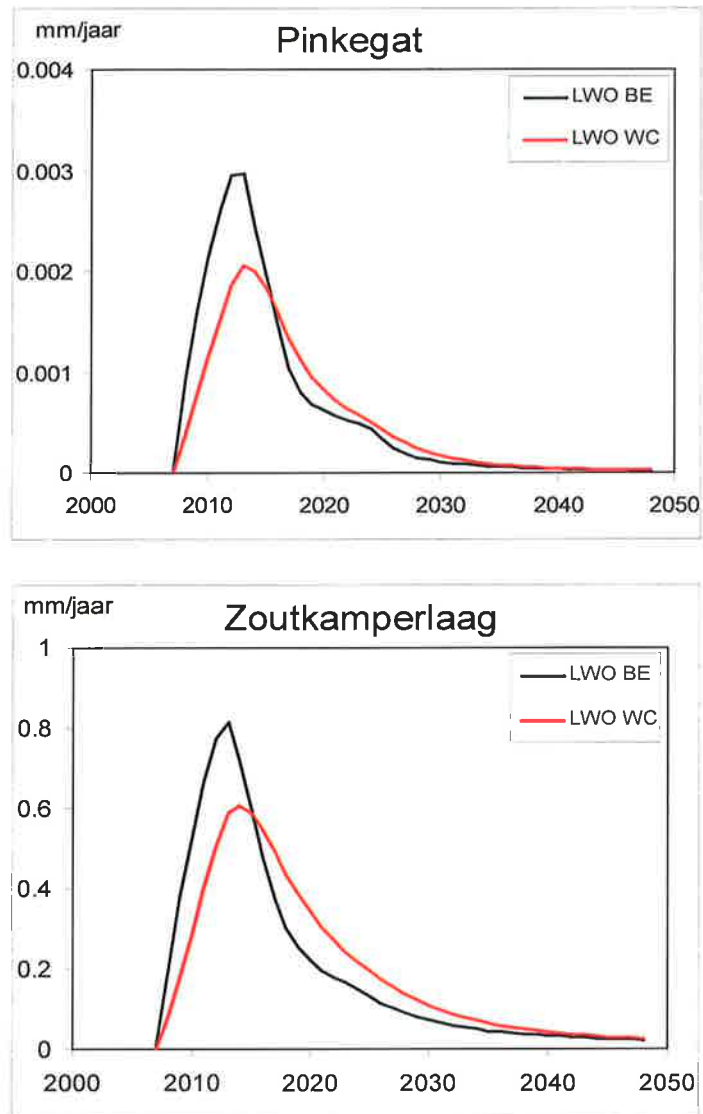
Lauwersoog-Oost, -West, -Centraal en Vierhuizen zijn samen genomen bij het reservoir-dynamisch modelleren. Er zijn drie dynamische scenario's: de base case (1), zonder aquifer depletie (2) en maximale aquifer depletie (3). In hoofdstuk 3 zijn voor elk van deze scenario's de uitkomsten van de de calibratie van de dynamische modellen besproken. Op basis hiervan zijn scenario's 1 en 3 niet verder meegenomen voor de bodemdalingsmodellering.



Figuur 8-11. Belasting op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit de voorkomens Lauwersoog-West, -Oost, -Centraal en Vierhuizen. "ps NAM", "Anjum" en "Ameland" verwijzen naar de drie scenario's uit Tabel 8-1. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

Figuur 8-11 laat de Belasting zien voor dynamisch scenario 2 (zonder aquifer) gemodelleerd met de drie geomechanische scenario's (Tabel 8-1). De Lauwersoog velden en Vierhuizen geven meer Belasting op Zoutkamperlaag door de locatie van de velden.

Figuur 8-12 toont de verwachtingswaarde voor de Belasting (BE) en de 'worst case' (WC) scenario's ten gevolge van de gaswinning uit het voorkomen Lauwersoog-West, -Oost, -Centraal en Vierhuizen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.



Figuur 8-12. De verwachtingswaarde (BE) en het 'worst case' (WC) scenario voor de Belasting (mm/jaar) van de voorkomens Lauwersoog-West, -Oost, -Centraal en Vierhuizen op de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. Let op: de schalen van de figuren zijn verschillend.

9 Gebruiksruimte Pinkegat en Zoutkamperlaag

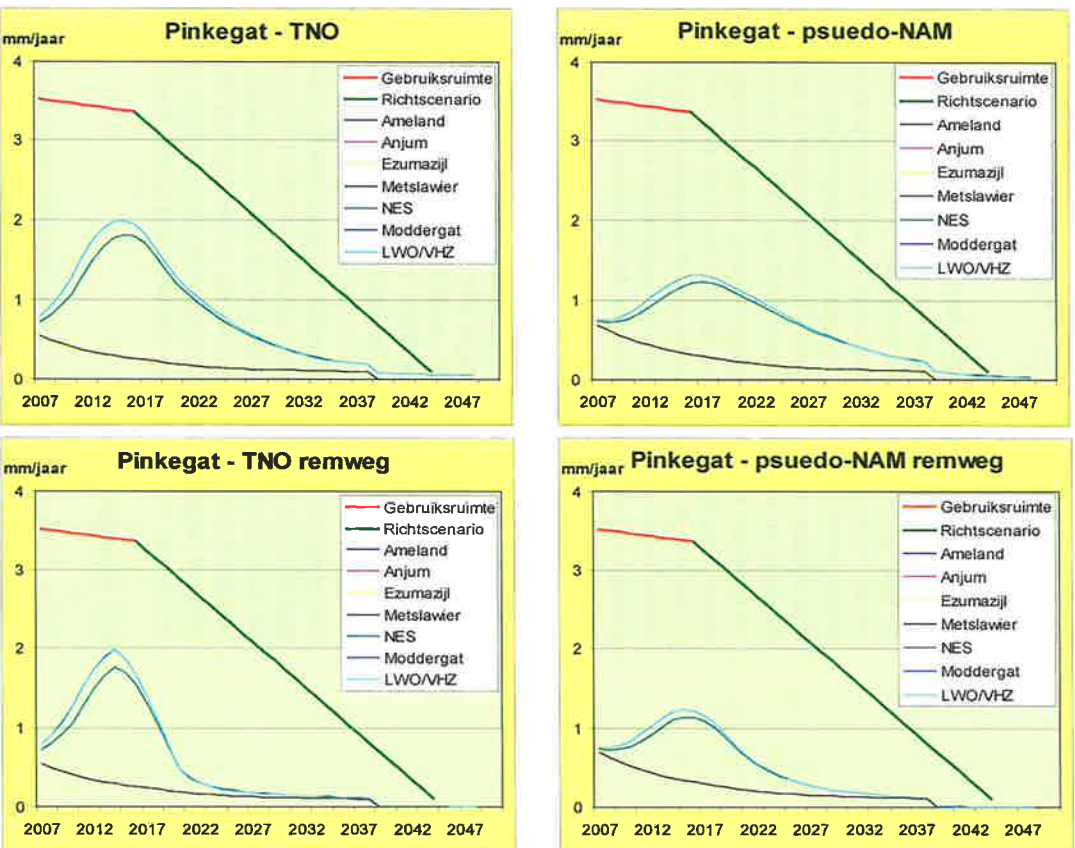
Het Meegroeivermogen is niet voor alle kombergingsgebieden gelijk. Voor Pinkegat is dit vastgesteld op 6 mm/jaar en voor Zoutkamperlaag op 5 mm/jaar (in beide gevallen gemiddeld over het oppervlak van de kombergingen en over periodes van steeds 19 jaar). De Gebruiksruimte is gedefinieerd als het verschil tussen het Meegroeivermogen en de relatieve zeespiegelstijging ($rZss$). De definitie van de $rZss$ bestaat uit twee periodes. De eerste periode is gebaseerd op de historische metingen en beslaat de periode 2007 tot 2016, de tweede periode is een richtscenario voor de zeespiegelstijging, waarbij uitgegaan is van een versnelling van de zeespiegelstijging vanaf 2016 (conform het TNO-AGE advies AGE 11-10.044). In de volgende secties wordt ingegaan op de Belasting op de Gebruiksruimte van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning onder de Waddenzee.

9.1 Pinkegat

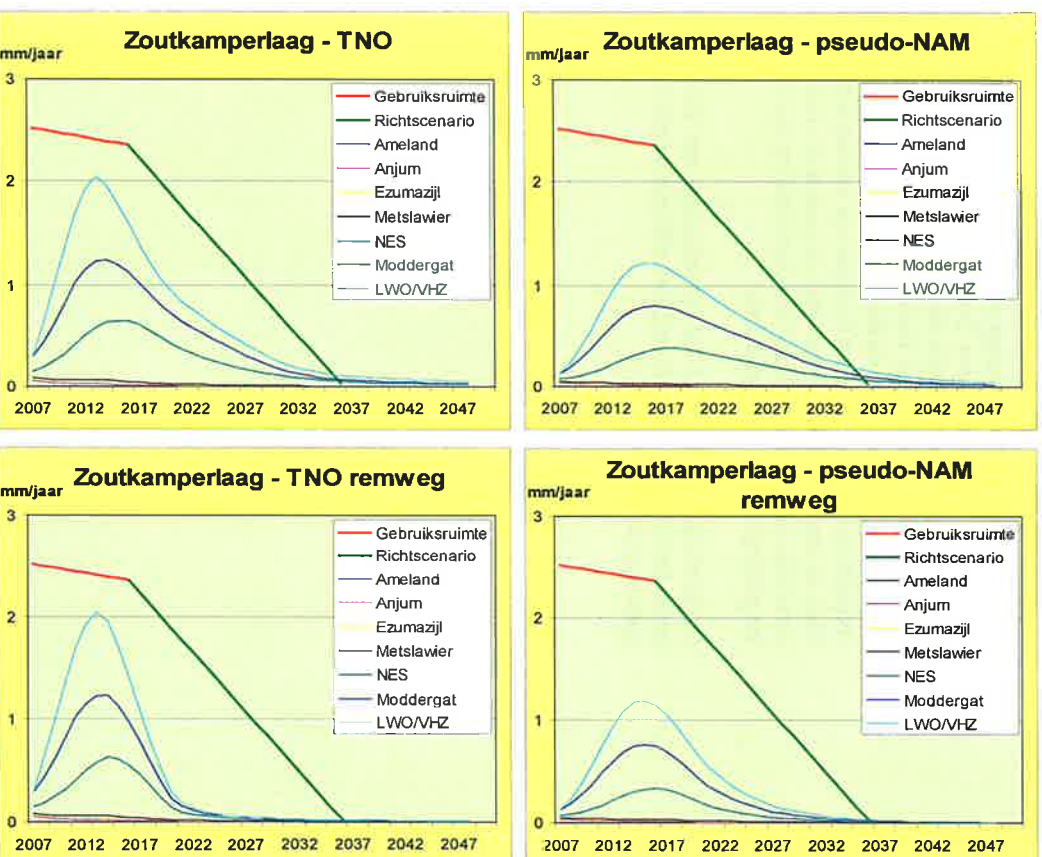
Figuur 9-1 laat de verwachtingswaarde voor de Belasting op de Gebruiksruimte zien voor komberging Pinkegat voor zowel de in hoofdstuk 8 gepresenteerde TNO verwachtingswaarde als – ter vergelijking – voor de TNO-analyse met de NAM parameterwaarden (pseudo-Nam). Het verschil tussen de twee verwachtingswaarden voor de Belasting op de Gebruiksruimte zit vooral in de variatie in de voorspelling voor Nes. De NAM bepaalt hogere waarden voor de relaxatietijd in het reservoirgesteente, waardoor de Belasting meer in de tijd wordt gespreid dan de Belasting ten gevolge van het TNO model. Daarnaast is TNO er in het bepalen van de verwachtingswaarden vanuit gegaan, dat de Waddenzeevelden een partiële depletie van de bodem- en aanliggende aquifers gaan krijgen. NAM heeft als uitgangspunt geen depletie in deze aquifers, waardoor volgens hun model ook minder bodemdaling en dus Belasting op het Wad zal optreden.

9.2 Zoutkamperlaag

Figuur 9-2 laat de Belasting op de Gebruiksruimte zien voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Net als voor Pinkegat worden zowel de Belastingen van de in hoofdstuk 8 bepaalde verwachtingswaarde als – ter vergelijking – de TNO-analyse met de NAM parameterwaarden (pseudo-NAM) gepresenteerd. Het verschil tussen de twee verwachtingswaarden voor de Belasting op de Gebruiksruimte zit ook hier vooral in de variatie in de voorspelling voor de Waddenzeevelden. De NAM neemt hogere waarden aan voor de relaxatietijd in het reservoirgesteente, waardoor de maximale Belasting later wordt bereikt en de Belasting daarna langzamer kleiner wordt in vergelijking met de door TNO afgeleide parameterwaarden. De analyse met de TNO parameterwaarden voorspelt een piek in de Belasting op Zoutkamperlaag in 2013. Het verschil met de $rZss$ is hier minder dan 0,5 mm/jaar.



Figuur 9-1. Gebruiksruimte met daarbij de Belasting voor komberging Pinkegat ten gevolge van de gaswinning uit de velden Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Lauwersoog-Oost, -Centraal, -West en Vierhuizen. In de onderste figuren zijn de zogenaamde "remweg" – scenario's te zien, waarbij op 1.1.2016 de gaswinning uit de Waddenzee velden is stilgelegd.



Figuur 9-2. Gebruiksruimte met daarbij de Belasting voor komberging Zoutkamperlaag ten gevolge van de gaswinning uit de velden Ameland, Anjum, Ezumazijl, Metslawier, Nes, Moddergat, Lauwersoog-Oost, -Centraal, -West en Verhuizen. In de onderste figuren zijn de zogenaamde "remweg" – scenario's te zien, waarbij op 1.1.2016 de gaswinning uit de Waddenzee velden is stilgelegd.

9.3 'Remweg' scenario's

De 'remweg' scenario's zijn opgesteld voor het geval uit een nieuwe actualisering rond 2016 van het beleidsscenario voor de Waddenzee zou blijken, dat de zeespiegel sneller stijgt dan nu verwacht voor de komende 5 jaar. Dit is dan een test op de effectiviteit van het "Hand aan de Kraan" principe. In de hieronder gepresenteerde berekeningen is uitgegaan van het zogenaamde "noodstop" scenario. Dit houdt in dat is aangenomen dat na 1-1-2016 (na het vaststellen van een volgend zeespiegelstijgingsscenario) geen gas meer zou worden gewonnen uit de velden Nes, Moddergat, Verhuizen, Lauwersoog-Oost, -West en -Centraal.

Figuur 9-1 en Figuur 9-2 laten de Belasting op de Gebruiksruimte voor kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag zien voor het hierboven beschreven remwegscenario. Door het zesjarig gemiddelde waarmee de Belasting wordt bepaald is de afname in Belasting al vanaf 2014 zichtbaar terwijl de productie pas in 2016 wordt stilgelegd. Hoewel de effecten van de productie tot 2016 nog enkele jaren doorklinken in de Belasting, neemt de Belasting significant af in vergelijking met onverminderd doorgaande productie (Figuur 9-1 en Figuur 9-2). Door de langere relaxatietijden laten de scenario's met de door NAM afgeleide parameterwaarden een langzamere vermindering van de Belasting zien in vergelijking met de TNO resultaten.

Geconcludeerd kan worden dat het reduceren van de productie (en in het uiterste geval dichtdraaien van de kraan) een effectief middel is om de Belasting binnen de Gebruiksruimte te houden..

10 Referenties

- Das, 2011, Reservoir Modelling of Anjum and Wadden Fields for Subsidence Prediction, Confidential Subsurface Technical Report, EP201105207759, NAM, Assen
- Geertsema, J., 1973. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs, J. Petr. Tech. pp. 734-744
- Hagoort, J., 1988. Fundamentals of gas reservoir engineering, Editor G.V. Chilimgarian, In: Developments in Petroleum Science, vol 23, 327 pp.
- Hettema, M.H.H., Schutjens, P.M.T.M., Verboom, B.J. & Gussinklo, H.J., 1998. Production-induced compaction of sandstone reservoirs: The strong influence of field stress. SPE 50630, Europ. Petr. Conf., The Hague
- Hower, T.L., Jones, R.E., 1991. Predicting recovery of gas reservoirs under waterdrive conditions, SPE 22937.
- Mobach, E. & Gussinklo, H.J., 1994. In-situ reservoir compaction monitoring in the Groningen field. In: Eurock 94, SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, 535-547
- Muntendam-Bos, A.G., Kroon, I.C., Geel, C.R., Hooff, P., Raemakers, J.J.F., Peters, E. & Breunese, J.N., 2010. Toetsing van het gebruikruimtebeslag door bodemdaling ten gevolge van gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen, TNO-034-UT-2010-00664/C
- NAM, 2011 a, Wijziging Winningsplan Ameland 2011, rev. 30-09-2011.
- NAM, 2011 b, Wijziging Winningsplan Anjum 2011, rev. 30-09-2011.
- NAM, 2011 c, Wijziging Winningsplan Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen 2011, rev. 30-09-2011.
- NAM, 2011 d, Reservoir Modelling of Ameland Fields for Subsidence Prediction, Confidential Subsurface Technical Report, EP201105208057, NAM, Assen.
- NAM, 2010, Bodemdaling door Aardgaswinning, NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, statusrapport 2010 en prognose tot het jaar 2070.
- Nepveu, M., Kroon, I. C. & Fokker, P.A., 2010. Hoisting a Red Flag, an Early Warning System for Exceeding Subsidence Limits. Mathematical Geosciences, Volume 42, Number , February.
- Opstal, G. van, 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.
- Ontwerp-Rijksprojectbesluit "Gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen", 2006.publicatienummer: 06 ET 04
- Waal, J.A. de, Smits, R.M.M., 1988. Prediction of Reservoir Compaction and Surface Subsidence: Field Application of a New Model. SPE Formation Evaluation, Volume 3, Number 2, June

11 Ondertekening

Utrecht, 16 maart 2012

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B. Schroot', with a horizontal line underneath.

Barthold Schroot
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken