

BODEMDALING NW-FRIESLAND 1976-2009



25-02-
2010

Precisie en betrouwbaarheid uit metingen

De bodem in Barradeel is niet verder gedaald. In Barradeel II daalt de bodem door zoutwinning als verwacht.

Na stopzetting van de gaswinning bij Franeker gaat de bodemdaling onverminderd door. Verdubbeling is waarschijnlijk..

Nieuwe GPS en radarmetingen brengen geen duidelijkheid.

SAMENVATTING

Is de bodemdaling in noordwest Friesland nu eindelijk onder controle? Ter beantwoording van die vraag werd in september 2009 een nieuwe waterpassing uitgevoerd en werden tot de verbeelding sprekende nieuwe meettechnieken in de strijd geworpen: GPS en radarinterferometrie vanuit satellieten. Intussen bracht de Technische commissie bodembeweging (TCBB) advies uit over de manier waarop bodemdaling onder controle moet worden gebracht en bereidde de stuurgroep Franekeradeel-Harlingen een plan voor om schade door bodemdaling te beperken of te compenseren.

In dit rapport wordt de stand van zaken t.a.v. de bodemdaling in NW-Friesland opgemaakt met behulp van de meest recente waterpassing en de vraag beantwoord in hoeverre de nieuwe meettechnieken helpen. Het TCBB advies wordt tegen de maatlat van de ervaringen in NW-Friesland gelegd en de betekenis van de laatste bodemdalingcijfers voor de herinrichting Franekeradeel-Harlingen kritisch bekeken.

De bodemdaling door zoutwinning verloopt als voorspeld. De daling boven de BAS1/2, BAS3 en BAS4 cavernes bedroeg in september 2009 respectievelijk 33, 13 en 5 cm. De cumulatieve daling boven het gasveld ten westen van Franeker bedroeg op dat tijdstip 26 cm. Na stopzetting van de gaswinning is de bodemdaling onverminderd doorgegaan. De onzekerheid in de voorspellingen is groot, maar het meest waarschijnlijke scenario is een verdubbeling van het dalingsvolume in de periode tot 2038. Er is geen sprake van bodemdaling door andere oorzaken dan gas- en zoutwinning. Het totale volume van de bodemdaling in noordwest Friesland sinds het begin van de eerste winning in 1988 bedraagt inmiddels 5,8 miljoen m³.

Door onzekerheden in de relatie tussen de metingen op de GPS stations en de daling in het diepste punt geven de continue GPS metingen niet de bescherming die er van mag worden verwacht. De GPS metingen tonen ook onverwacht grote horizontale bewegingsnelheden aan. Het is denkbaar dat ook deze bewegingen schade veroorzaken. Verwaarlozing van die horizontale beweging heeft de resultaten van de radarmetingen dusdanig verstoord dat zij onbruikbaar zijn geworden als grondslag voor de herinrichting van noordwest Friesland.

Door de onverminderde bodemdaling na staking van de gaswinning dreigen de maatregelen in het kader van de herinrichting Franekeradeel – Harlingen al ver voor 2016 onvoldoende te zijn. Elke centimeter meer bodemdaling levert 3% meer schade op. Het is onduidelijk of overschrijding van de 2016 prognose ook leidt tot aanpassing van de kostentoedeling in verhouding met die veroorzaakte schade.

Op grond van de ervaringen met de gaswinning bij Franeker moet worden vastgesteld dat het TCBB advies de kans op herhaling van de voortdurende onderschatting van bodemdaling als bij Franeker groter, niet kleiner maakt.

Het rapport sluit met een aantal aanbevelingen.

INHOUD

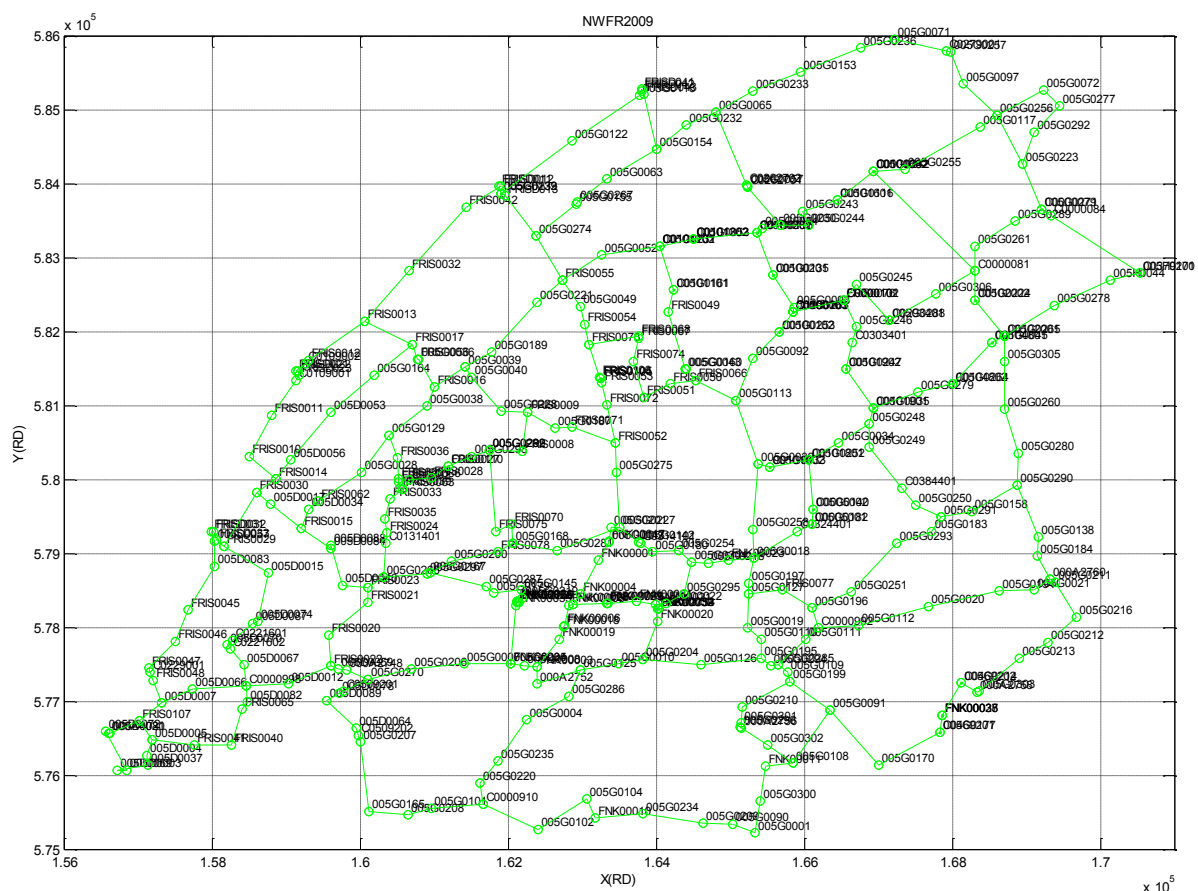
SAMENVATTING	1
INLEIDING	3
BEREKENING TOTALE DALING	5
Methodiek	5
Onregelmatigheden	5
Ruis	5
Totale bodemdaling	7
GEOMETRISCHE ONTRAFELING	8
Identificatie van afzonderlijke mechanismen.....	8
Oorzakelijke scheiding.....	9
Bodemdaling door gaswinning.....	12
Bodemdaling door zoutwinning.....	15
Ongespecificeerde bodembeweging.....	17
AANVERWANTE ZAKEN	18
GPS metingen.....	18
Radar metingen	23
TCBB advies.....	26
Gebiedsproces noordwest Friesland.....	29
CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	32
Conclusies.....	32
Bodemdaling	32
GPS metingen.....	32
Radar metingen	32
TCBB advies	32
Gebiedsproces noordwest Friesland.....	33
Aanbevelingen	34
Bodemdaling	34
GPS metingen.....	34
Radar metingen	34
TCBB advies	34
Gebiedsproces noordwest Friesland.....	34
GECITEERDE WERKEN	35

Bodemdaling NW-Friesland 1976-2009

GESPECIFICEERD NAAR OORZAAK

INLEIDING

In noordwest Friesland wordt vanaf 1988 gas gewonnen ten westen van Franeker. Onder Pietersbierum werd vanaf 1995 ook zout gewonnen. Deze zoutwinning ging in 2004 goeddeels over naar een locatie ten oosten van Sexbierum. Vanaf 2006 vindt ook zoutwinning plaats op de locatie Bethanië ten zuiden van Tzummarum. Delfstofwinning leidt tot bodemdaling en om deze in kaart te brengen wordt regelmatig gemeten. De nog niet gepubliceerde waterpasmeting van september 2009 (Figuur 1) vormde de aanleiding voor deze analyse.



FIGUUR 1: HET MEETNETWERK VAN SEPTEMBER 2009

In 2003 werd aangenomen dat de bodemdaling door zoutwinning boven de BAS1 en BAS2 cavernes ten oosten van Sexbierum na sluiting in 2004 zou omslaan in bodem-



stijging. Voor de gaswinning werd een redelijk constante bodemdalingsnelheid van hooguit 3,5 mm per jaar verwacht. Eerder onafhankelijk onderzoek (Houtenbos A. , 2004) legde naast een onjuiste onderbouwing van de bodemstijging na zoutwinning ook een aanzienlijke versnelling van de bodemdaling door gaswinning vanaf 1996 bloot. De trage en weinig transparante afhandeling van discrepanties tussen metingen en voorspellingen door mijnbouwondernemingen en overheid heeft het draagvlak voor nieuwe gas- en zoutwinning in Friesland aangetast. Pas in juli 2008 werd de gaswinning bij Franeker stil gelegd. InSar studie gebiedsproces.

De belangen van mijnbouwondernemingen bij specificatie van bodemdaling naar oorzaak en bij publicatie van verschillen tussen verwachte en gemeten daling zijn tegengesteld aan die van lokale overheden en individuele burgers:

Zonder onafhankelijke analyse geen objectieve toedeling van aansprakelijkheid.

De bodemdaling in dit rapport is berekend volgens de integrale methode, beschreven in bijlage C van (TCBB, 2009). Door recente aanpassingen van de software kunnen nu veel grotere datasets integraal op fouten gecontroleerd en vereffend worden. De bodemdaling per oorzaak wordt berekend in twee stappen. Eerst wordt de totale bodemdaling, gezuiverd van meetruis en peilmerkeigen beweging, berekend uit de metingen. Vervolgens wordt de gemeten totale bodemdaling onderverdeeld in componenten met een enkelvoudige oorzaak. Deze componenten worden op basis van plaats en ontwikkeling in de tijd gekoppeld aan oorzaken.

Alle beweging is becijferd ten opzichte van de situatie bij aanvang van de gaswinning in oktober 1988. Om onderscheid te kunnen maken tussen effecten van delfstofwinning en die van andere oorzaken zijn de NAP metingen in de 12 jaar voorafgaande aan de gaswinning integraal in de berekeningen meegenomen. In deze analyse is het gehele gebied binnen de invloedssfeer van de gaswinning uit het Harlingen Boven-Krijt (HRL) en het Franekerveld en de zoutwinning uit de cavernes BAS1 tot en met BAS4 onder ogen gezien. Voor de berekening zijn in totaal 4417 hoogteverschilmetingen uit 44 meetcampagnes gebruikt. Daarbij waren 909 peilmerken betrokken.

BEREKENING TOTALE DALING

Methodiek

De berekening begint met een integrale, driedimensionale vereffening van alle hoogteverschilmetingen in ruimte en tijd. Tijdens deze vereffening wordt getoetst op onregelmatigheden en worden de parameters van meetruis, peilmerkinstabiliteit en imperfecties van het bodembewegingmodel berekend.

Zonder specifieke geodetische deskundigheid, geen betrouwbare cijfers voor werkelijk opgetreden bodemdaling.

Onregelmatigheden

In 2% van de metingen werden onregelmatigheden gedetecteerd. Slechts in 0,4% van de gevallen betrof dat fouten in gemeten waarde zelf, zoals een tekenfout in de 2006 meting van 005D0005-FRIS0041 en een kennelijke onjuiste waarde fout in de 2003 meting van 005G0093-SEC0012107. De overige gevonden meetfouten waren kleiner dan 6 mm.

De peilmerken 005D0083, 005G0187, 010B0133, FRIS0053 en FRIS0083 zijn mogelijk instabiel voor (een deel van) de beschouwde periode.

Overige onregelmatigheden betreffen geïsoleerde punten op geïsoleerde tijdstippen. In 1999 is het peilmerk 005G0239 abusievelijk voor 005G0132 aangezien. In de 1988 nulmeting van 005G0203 werd een 2,5 cm fout gevonden.

De onregelmatigheden zijn met minimaal informatieverlies onschadelijk gemaakt voor de vervolgberekening.

Ruis

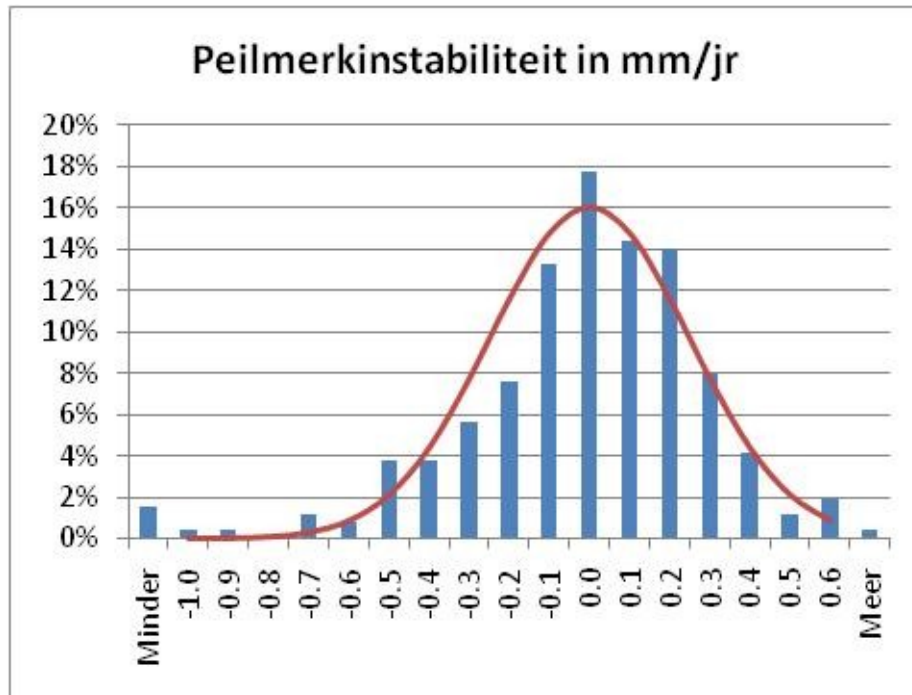
Meetruis en relatieve peilmerkinstabiliteit beïnvloeden de precisie van de berekende relatieve bodemdaling. Modelimperfecties doen dat niet. Het bodemdalingmodel speelt slechts een cosmetische rol. Het verlegt de referentie voor de relatief gemeten bodemdaling zodanig dat de gemiddelde absolute daling in het buitengebied nul is.

Ruiscomponent	Standaard deviatie ruiseffect op relatieve daling
Meetruis	$0,76 \text{ mm} * \sqrt{2} * \text{afstand in km}$
Peilmerk instabiliteit	$0,49 \text{ mm} * (\text{periode in jaren})^{0,90} * \sqrt{2}$
Model imperfecties	$2,09 \text{ mm} * (\text{periode in jaren})^{0,65} * \sqrt{2 * (1 - e^{-(\text{afstand in m}/1562)^2})}$

TABEL 1: RUISCOMPONENTEN NW-FRIESLAND 1976-2009

De metingen passen binnen de Rijkswaterstaatnorm voor meetruis in 2^e orde waterpassingen. Ter beoordeling van de stabiliteit van de meetpunten is de beweging van elk individueel peilmerk vergeleken met de gemiddelde beweging van de peilmerken in de omgeving.

De standaardafwijking van de peilmerkinstabiliteit in noordwest Friesland is groter dan die elders in Nederland. Daar staat tegenover dat de tijdsrelatie minder is. Gemeten over de productieperiode van 21 jaar is de standaardafwijking van de peilmerkinstabiliteit in noordwest Friesland (0.36 mm/jaar) vergelijkbaar met die elders in Nederland (0.31 mm/jaar). 94% van de peilmerken zit in de hoogste stabiliteitsklasse van -0,5 tot +0,5 mm per jaar (Figuur 2).



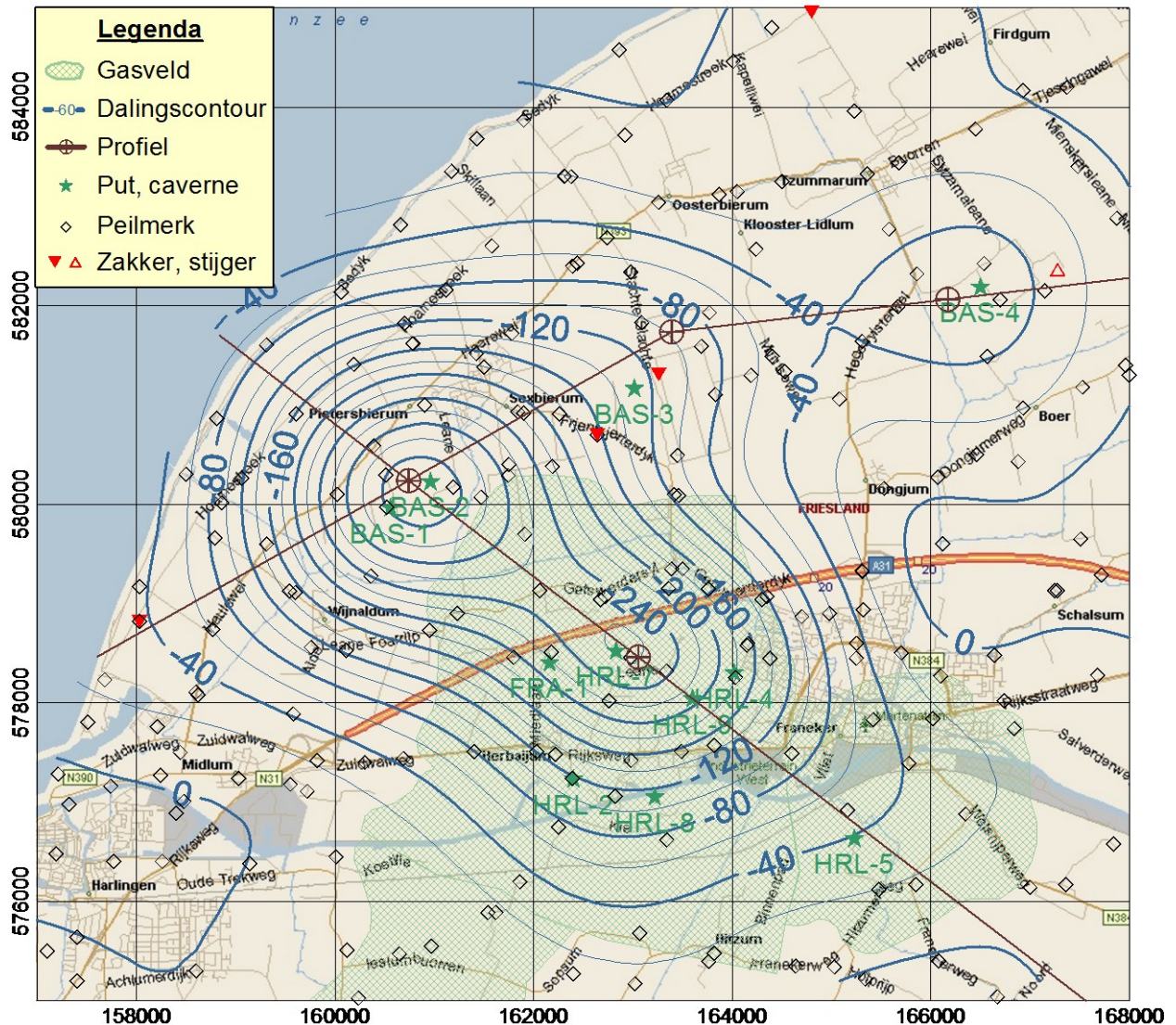
FIGUUR 2: HISTOGRAM GEMIDDELDE PEILMERKEIGEN BEWEGING 1988-2009

De rode lijn in Figuur 2 geeft de best passende normale verdeling aan. De standaardafwijking van deze gemiddelde peilmerkspecifieke bewegingsnelheid over 21 jaar is 0.25 mm/jaar. Deze gemiddelde snelheid over 21 jaar is lager dan de gemiddelde snelheid over 1 jaar (0.49 mm/jaar) door middeling van korte termijn effecten, als dagelijkse en seizoensgebonden uitzetting en krimp ten gevolge van temperatuurverschillen. Naarmate metingen elkaar sneller opvolgen (GPS, Radar) klinken meer van deze korte termijn effecten door in de meetresultaten.

Gewone peilmerken zetten zich gemiddeld 0.15 mm/jaar (in dit geval 0.17 mm/jaar) sneller in de bodem dan ondergrondse merken (NAP peilmerknummers beginnend met 000A). De gemiddelde absolute daling van peilmerken doet voor de alleen relatief te bepalen bodemdaling niet ter zake. Het verschil in gemiddelde daling tussen gewone peilmerken en ondergrondse merken verstoort de gemeten relatieve daling wel enigszins. Het verschil is echter te klein om uitsluiting van gewone peilmerken of bijplaatsing van duurdere ondergrondse merken te rechtvaardigen.

Totale bodemdaling

De van meetruis en peilmerkinstabiliteit gezuiverde bodemdaling onder de meetpunten is verwerkt tot contourkaart (Figuur 3). Hierbij zijn de berekende karakteristieken van de modelimperfectie uit (Tabel 1) gebruikt als stuurparameters.



FIGUUR 3: TOTALE BODEMDALING, M.A.W. NETTO BODEMBEWEGING DOOR ALLE OORZAKEN TEZAMEN

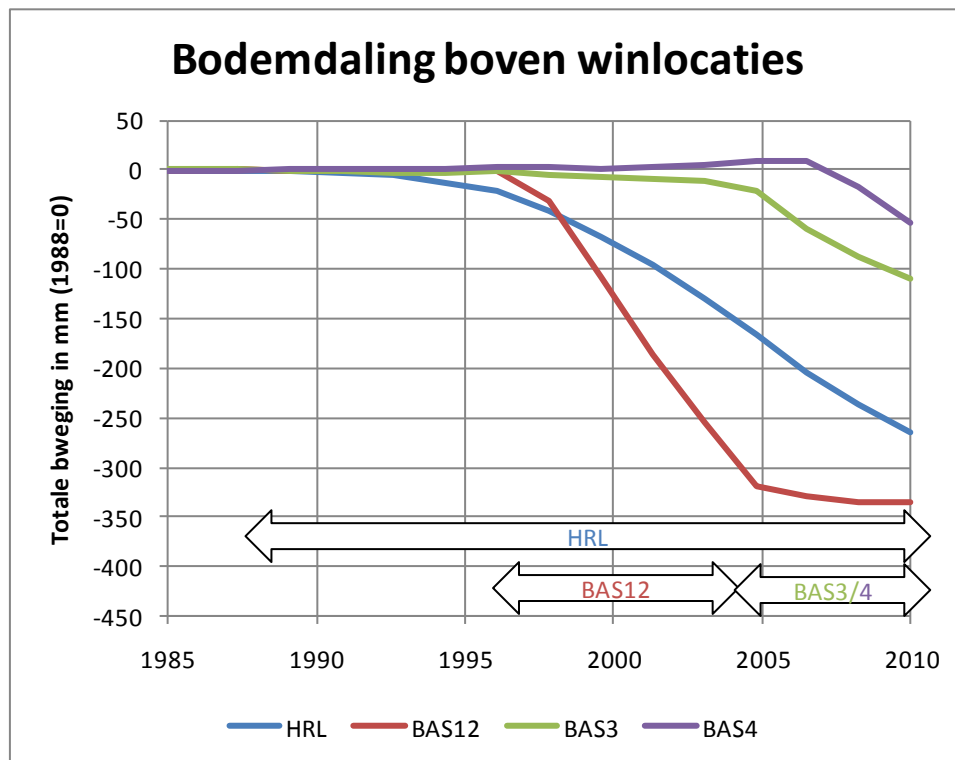
Boven het HRL gasveld (groen gearceerd) bedraagt de bodemdaling over de periode 1988-2009 maximaal 260 mm, bij de zoutwinninglocaties BAS1/2 en BAS4 (ster symbolen) maximaal respectievelijk 333 mm en 49 mm. Boven de BAS3 caverne bedraagt de bodemdaling ongeveer 130 mm. Deze cijfers betreffen de bodemdaling d alle oorzaken tezamen.

Het volume van de bodemdaling in het gebied van Figuur 3 bedraagt 5,8 miljoen m³. De scheefstelling bereikt een maximum van 16,5 cm per km in Pietersbierum.

GEOMETRISCHE ONTRAFELING

Identificatie van afzonderlijke mechanismen

De ontwikkeling van de bodemdaling in de tijd op de 3 winlocaties is weergegeven in Figuur 4. De knikpunten in de ontwikkeling op de zoutwinninglocaties komen overeen met begin en einde van zoutwinningen. De ontwikkeling boven het gasveld vertoont geen scherpe knik. Zoals oorspronkelijk voorspeld, bleef de bodemdaling boven het gasveld tot 1996 beperkt. Daarna versnelde de bodemdaling onverwacht. Vóór aanvang van de gaswinning in 1988 was er geen bodemdaling van betekenis.



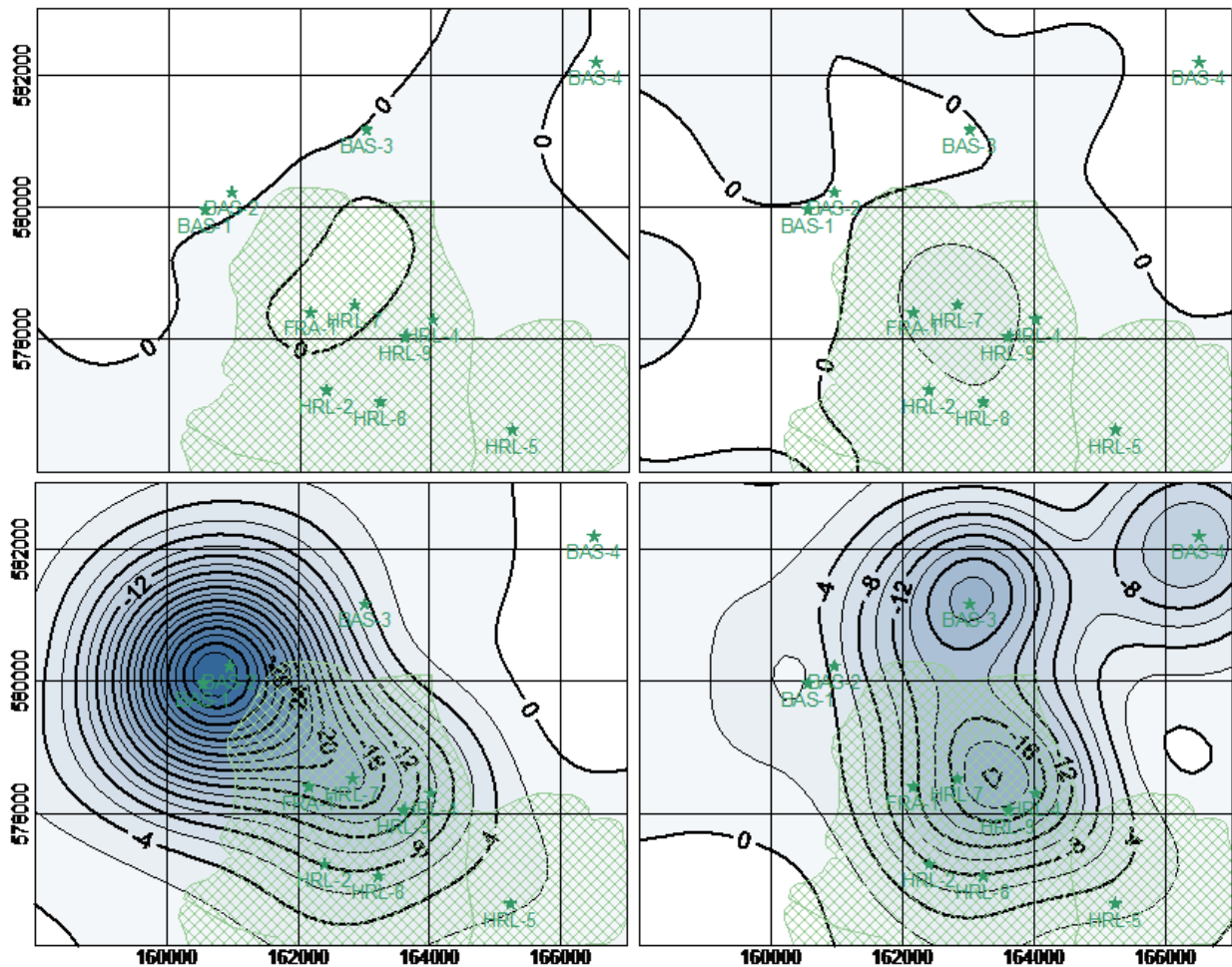
FIGUUR 4: ONTWIKKELING TOTALE BODEMDALING IN DE TIJD

Figuur 5 laat de gemiddelde bodemdalingsnelheid in noordwest Friesland zien over de periodes 1976-1988, 1988-1996, 1996-2004 en 2004-2009. Ook hier is van significante bodemdaling voor aanvang van de winningen in 1988 geen sprake. In de periode 1988-1996, tussen het begin van de gaswinning en het begin van de zoutwinning, daalt de bodem alleen met enige significantie boven het HRL gasveld. In de periode 1996-2004 is sprake van twee aparte bronnen van bodemdaling: een boven de BAS1/2 cavernes en een boven het HRL gasveld. Het patroon voor de periode 2004-2009 toont drie aparte bodemdalingmechanismen: een boven de BAS3 caverne, een boven de BAS4 caverne en een boven het HRL gasveld.

Samenvattend indiceren Figuur 4 en Figuur 5 vier afzonderlijke mechanismen: een boven het HRL gasveld in tijd gecorreleerd met de periode van gaswinning, een gecentreerd boven de BAS1/2 cavernes in tijd gecorreleerd met de periode van zoutwinning uit die BAS1/2 cavernes, een gecentreerd boven de BAS3 caverne in tijd gecorreleerd met de periode van zoutwinning uit de BAS3 caverne en tenslotte een

gecentreerd boven de BAS4 caveerne in tijd gecorreleerd met de periode van zoutwinning uit die BAS4 caveerne.

De metingen in NW-Friesland bevatten geen aanwijzingen voor significante bodemdaling anders dan door gas- en zoutwinning.



FIGUUR 5: BODEMDALINGSNELHEID IN MM/JAAR, 1976-1988, 1988-1996, 1996-2004, 2004-2009

Oorzakelijke scheiding

Plaats, vorm en ontwikkeling van de bodemdaling ten gevolge van elk van de drie mechanismen is gekarakteriseerd met behulp van een analytische functie:

$$z(x, y, t) = z_{max}(t) \cdot e^{-\frac{1}{2}r^2} \\ r^2 = \left(\frac{(x - x_{mid}) \cdot \sin\alpha + (y - y_{mid}) \cdot \cos\alpha}{a} \right)^2 + \left(\frac{(x - x_{mid}) \cdot \cos\alpha - (y - y_{mid}) \cdot \sin\alpha}{b} \right)^2$$

Deze functie kan zich via geschikte parameterwaardes (vgl. Tabel 2) exact transformeren naar de in (TNO, 2003) en (Frisia Zout B.V., 2007) gebruikte functie voor de modellering van zoutwinning in Barradeel en de in (Pollmann, 1984) gebruikte

functie voor de beschrijving van bodemdaling door samendrukking van cavernes. De functie voegt zich ook zeer nauwkeurig naar de door (Geertsma, 1973) beschreven bodemdaling boven schijfvormige gasreservoirs over het gehele spectrum van reële reservoirstraal/diepte verhoudingen.

De parameters van de 4 komvormen zijn simultaan bepaald door optimale aanpassing aan de gemeten totale bodemdaling op elk van de punten. Het resultaat voor de datum van laatste meting, 10-09-2009, was:

Parameter	Symbol	HRL	BAS1/2	BAS3	BAS4
X coördinaat komhart [m]	x_{mid}	163054	160741	163391	166172
Y coördinaat komhart [m]	y_{mid}	578462	580238	581737	582064
Lange komstraal [m]	a	1268	1260	924	1116
Korte komstraal [m]	b	1051	1056	924	1116
Kaarthoek lange komstraal [°]	α	126	55	0	0
Afplatting	δ	1,76	1,82	2,43	3,04
Diepte in komhart [mm]	z_{max}	246	306	63	47

TABEL 2: KOMPARAMETERS BIJ LAATSTE METING

De parameters van de nog weinig geprononceerde BAS3 en BAS4 kommen konden minder goed worden bepaald door vervloeiing met de veel diepere BAS3 kom en het kleine aantal metingen rond BAS4. Het verschil tussen de som van de komvormen en de totaal gemeten daling (overall kleiner dan 19 mm) is ten slotte proportioneel met de absolute waarde van de samenstellende delen verdeelt over de vier geïdentificeerde mechanismen en de ongeïdentificeerde restbeweging.

Dit levert de volgende beïnvloedingtabel op:

Bodembeweging bij hart \ ten gevolge van	HRL kom	BAS1/2 kom	BAS3 kom	BAS4 kom
Gaswinning	-246 mm	-28 mm	-8 mm	0 mm
Zoutwinning	-14 mm	-305 mm	-89 mm	-48 mm
Ongeïdentificeerde oorzaak	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Alle oorzaken tezamen	-260 mm	-333 mm	-97 mm	-49 mm

TABEL 3: OORZAKELIJKE ONTRAFELING 1988-2009

Tenslotte nog enige afgeleide kentallen van productie en bodemdaling per winning:

Parameter	HRL gaswinning	BAS1/2 zoutwinning	BAS3 zoutwinning	BAS4 zoutwinning
Productievolume	1681 Mm ³	8882 KTon	2704 KTon	2115 KTon
Productiesnelheid	0 Mm ³ /jr	1 KTon/jr	292 KTon/jr	649 KTon/jr
Diepte komhart	246 mm	307 mm	63 mm	47 mm
Verticale snelheid komhart	-16 mm/jr	3 mm/jr	-9 mm/jr	-21 mm/jr
Dalingsvolume	2,42 Mm ³	2,87 Mm ³	0,28 Mm ³	0,26 Mm ³
Toename dalingsvolume	0,19 Mm ³ /jr	0,00 Mm ³ /jr	0,04 Mm ³ /jr	0,12 Mm ³ /jr
Dalingsvolume per productievolume	0,00299 m ³ /m ³	0,00035 m ³ /kg	0,00013 m ³ /kg	0,00013 m ³ /kg
Retardatie constante	18,14 jaar	2,39 jaar	1,88 jaar	1,88 jaar

TABEL 4: KENTALLEN BODEMDALING 1988-2009 PER KOM

Uit de bodemdalingreactie op plotselinge veranderingen van de productiesnelheid zijn het uiteindelijke dalingsvolume per m³ productie en de retardatieconstante bepaald. Hiervoor is de procedure gebruikt uit (Houtenbos A. , Subsidence and gas production: an empirical relation., 2007). Deze is in essentie gelijk aan die beschreven in (TCBB, 2008). Door de korte en weinig bewogen productiegiedenis van de BAS3 en 4 cavernes konden de parameters van deze winningen niet nauwkeurig worden bepaald.

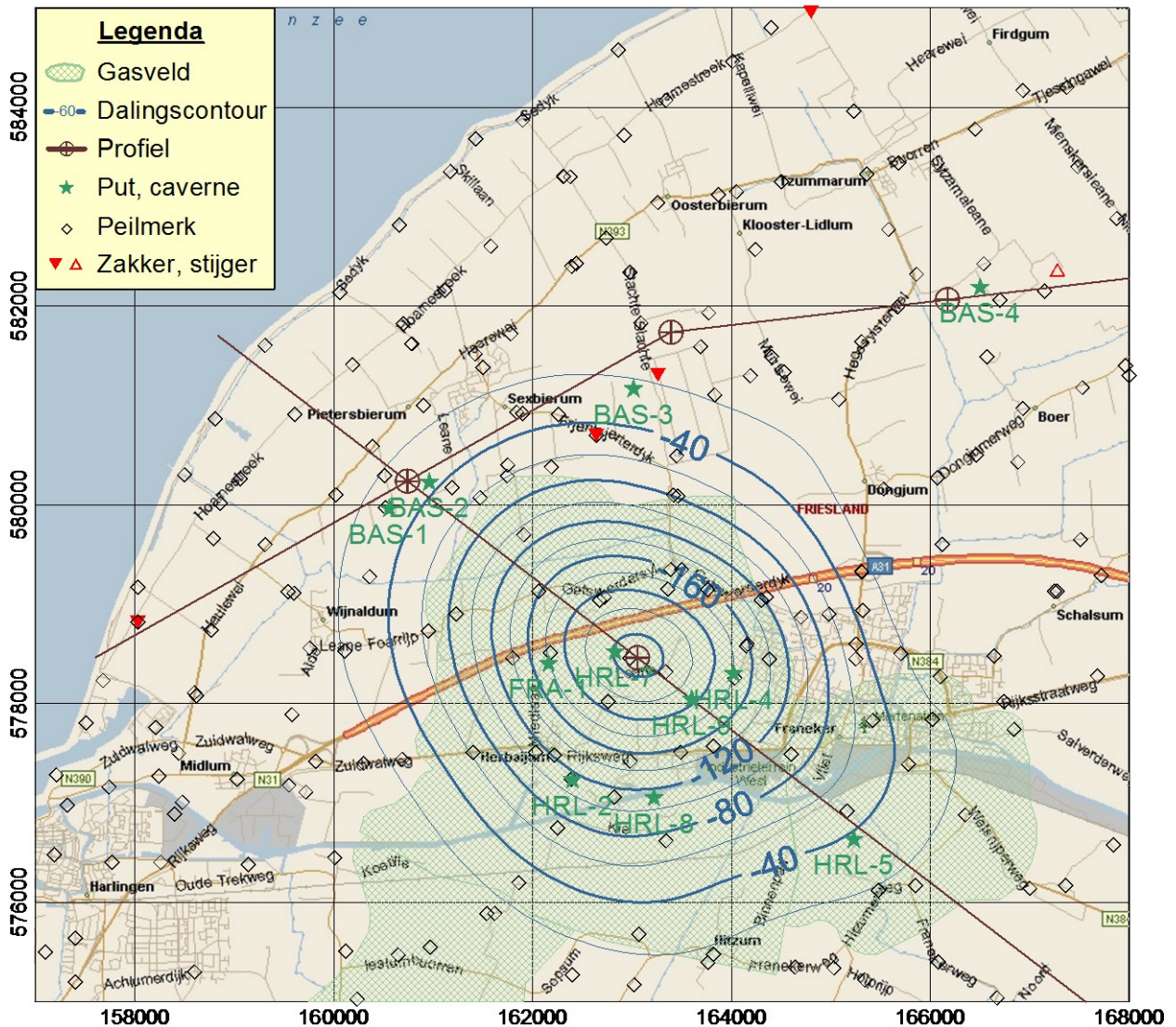
Geometrische ontrafeling naar oorzaak sluit iteratieve voorwaartse geomechanische modellering vanuit kennis van de ondergrond, als beschreven in bijlage 1 van (TCBB, 2009), geenszins uit. De resultaten van geomechanische modellering dienen echter tegenover, niet in plaats van, geometrische modellering te worden gesteld.

Zonder geometrische ontrafeling geen effectieve signalering van afwijkend dalingsgedrag door een specifieke oorzaak.

Een goed bij het gemeten dalingspatroon aansluitend, geomechanische model vormt een solide basis voor voorspelling van nog te verwachten bodemdaling. Het is echter een vergissing om hieruit te concluderen dat extrapolatie van een historisch geijkte relatie tussen productie en bodemdaling geen toegevoegde waarde heeft als toetssteen voor geomechanische prognoses.

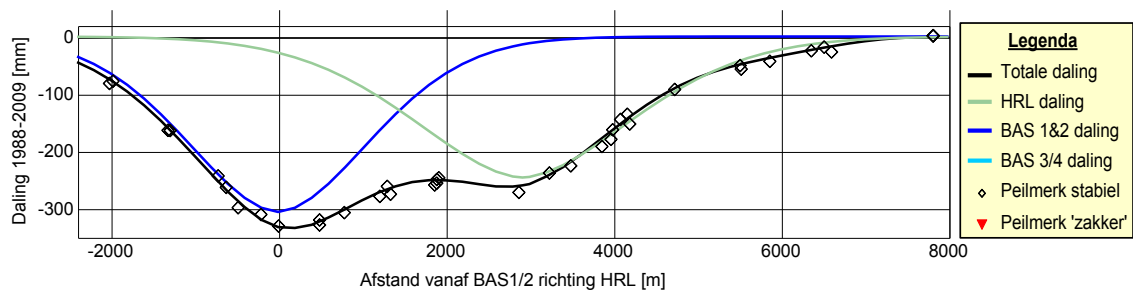
Bodemdaling door gaswinning

Figuur 6 is een contourkaart van de bodemdaling door gaswinning in mm sinds 1988.

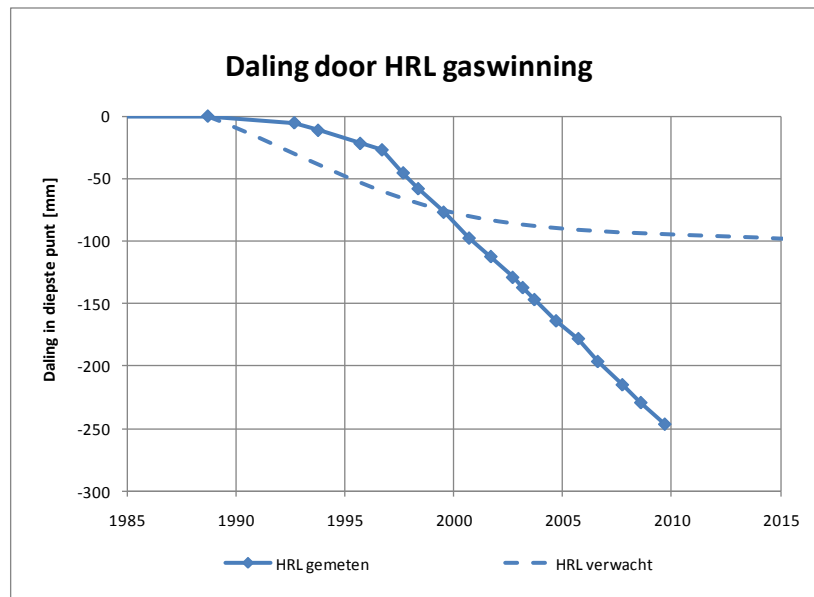


FIGUUR 6: BODEMDALING DOOR GASWINNING UIT HRL VELD 1988-2009

Figuur 7 toont de ontrafeling van de totaal gemeten bodemdaling langs een lijn (bruin in Figuur 6) door het hart van de BAS1/2 en HRL kommen (rad symbolen). De hoogteverandering van peilmerken binnen een kilometer van de lijn is langs de bodemdalingcontouren op de lijn geprojecteerd.



FIGUUR 7: OORZAKELIJKE ONTRAFELING LANGS DE LIJN BAS1/2-HRL



FIGUUR 8: GEMETEN EN VERWACHTTE BODEMDALING DOOR HRL GASWINNING

Figuur 8 illustreert de ontwikkeling van de bodemdaling door gaswinning in de tijd. Aanvankelijk werd verondersteld dat de bodemdaling tussen 1988 en 2016 8 cm zou bedragen met een onzekerheidsmarge van 20%. Tot 1996 bleef de bodemdaling inderdaad zeer beperkt. Tussen 1993 en 2001 deden zich echter abrupte veranderingen voor in plaats, volumegroei, straal en afplatting van de bodemdalingkom. Na 2001 ontwikkelde de bodemdaling zich meer geleidelijk, zij het veel sneller dan aanvankelijk verwacht. Ondanks stopzetting van de gaswinning in 2008 zette de bodemdaling zich met onverminderde snelheid door. Dit bleef niet beperkt tot een klein gebied rond het centrum van het dalingskom, maar doet zich overal voor binnen een straal van ongeveer 3 km rond het diepste punt (het gebied binnen de 20 mm dalingscontour in Figuur 6)

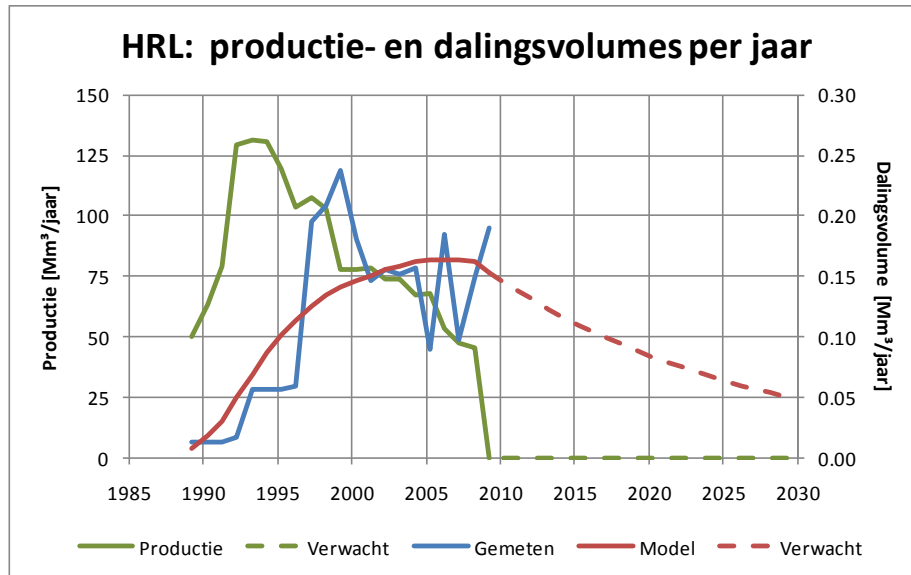
Zonder gedetailleerde beschouwing van de afwijkende geometrische ontwikkeling, geen betrouwbare verklaring voor het afwijkende HRL gedrag.

Een per periode tussen waterpassingen gespecificeerde geometrische probleem-analyse valt buiten het bestek van dit rapport.

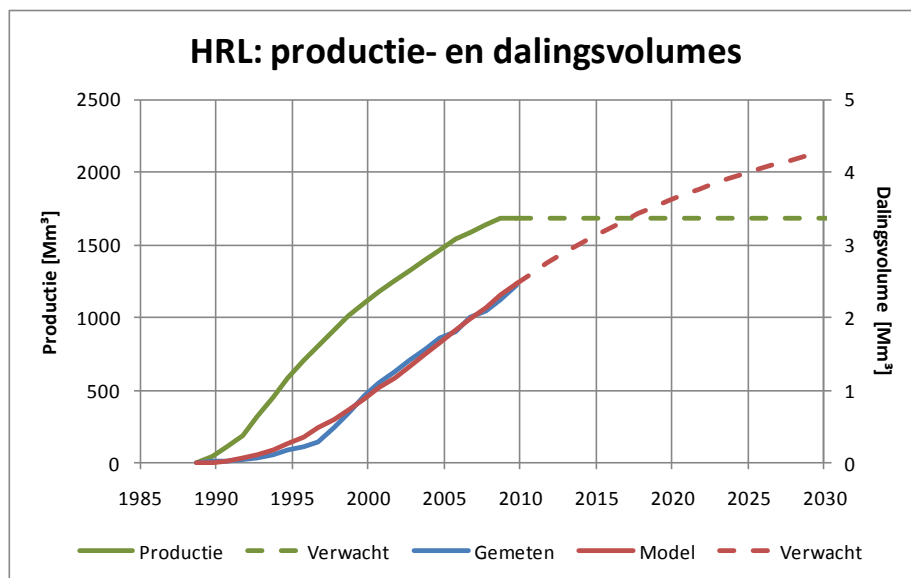
In Figuur 9 zijn de gemeten volumes van productie (groen) en daling (blauw) per jaar tegen de tijd uitgezet. In het eerste jaar na stopzetting van de gaswinning was de jaarlijkse toename van het bodemdalingvolume groter dan in de acht voorafgaande jaren met gaswinning. De bodemdaling volgt de productie met een flinke vertraging en ijlt na het stilleggen van de gaswinning in 2008 significant na. De retardatie constante bereikt de uitzonderlijk hoge waarde van 18,14 jaar. Het uiteindelijke dalingsvolume per duizend m³ geproduceerd gas bedraagt 2.99 m³.

Extrapolatie van de gemeten relatie tussen bodemdaling en gaswinning met deze parameters naar een toekomst zonder verdere productie voorspelt nog een lange periode van na-ijlende bodemdaling (Figuur 10). In 2038 zou het volume van bodemdaling twee maal zo groot zijn als het volume op het moment van stopzetting van de gaswinning in 2008. De door gaswinning veroorzaakte bodemdaling in het diepste

punt zou dan 47 cm bedragen tegen 23 cm in 2008 bij het staken van de winning. De onzekerheid in deze voorspelling is groot, vooral omdat nog onduidelijk is in hoeverre het tot nu gemeten gedrag representatief is voor het toekomstige gedrag. Omdat de huidige geomechanische kennis echter niet in staat is gebleken het gedrag in het verleden te verklaren, verdient het aanbeveling de maatvoering van schadebeperkende maatregelen in te steken op bovenstaande extrapolatie van het werkelijk gemeten gedrag.



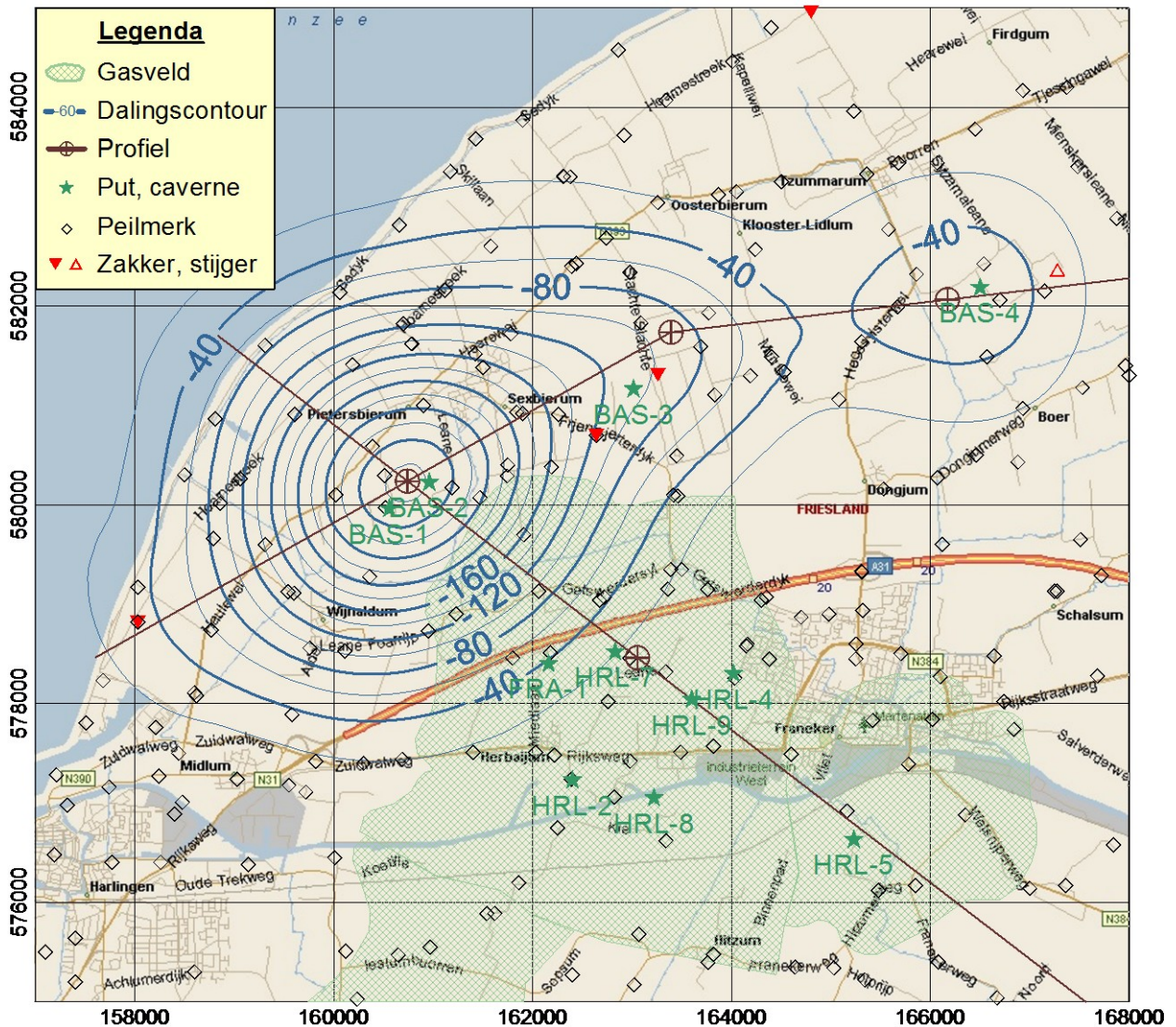
FIGUUR 9: JAARLIJKE HARLINGEN PRODUCTIE- EN DALINGSVOLUMES



FIGUUR 10: VOLUME HRL GASPRODUCTIE EN DALING

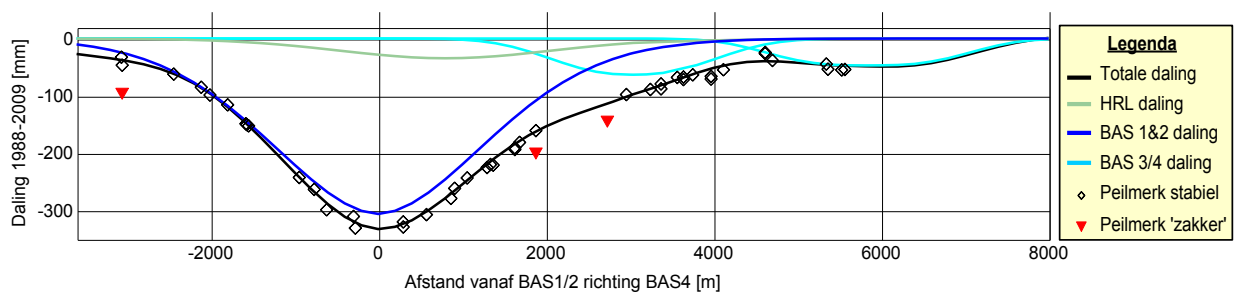
Bodemdaling door zoutwinning

Figuur 11 is een contourkaart van de bodemdaling door zoutwinning in mm.

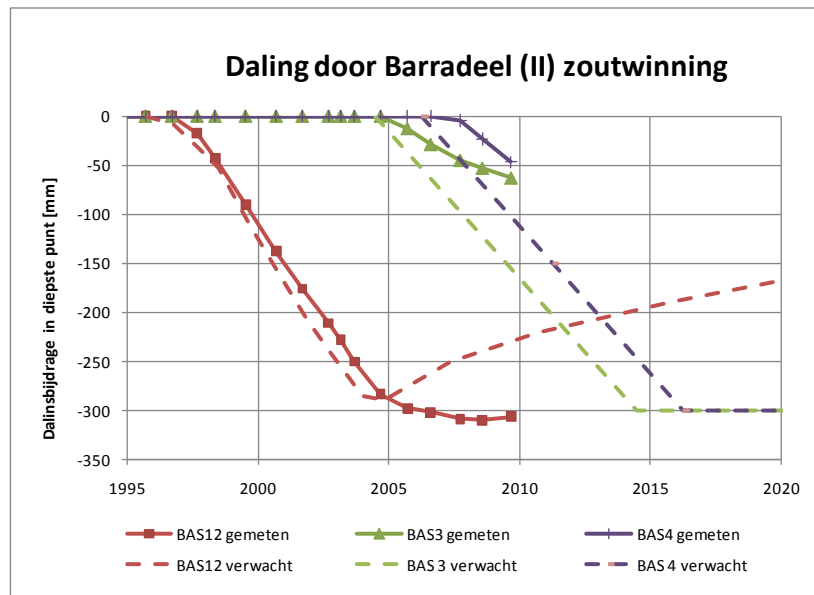


FIGUUR 11: BODEMDALING DOOR ZOUTWINNING UIT BAS1, 2, 3 EN 4 CAVERNES 1988-2009

Figuur 12 toont de ontrafeling van de totaal gemeten bodemdaling langs een lijn (bruin in Figuur 11) door het hart van de BAS1/2, BAS3 en BAS4 kommen (rad symbolen). De hoogteverandering van peilmerken binnen een kilometer van de lijn is langs de bodemdalingcontouren geprojecteerd op de lijn.

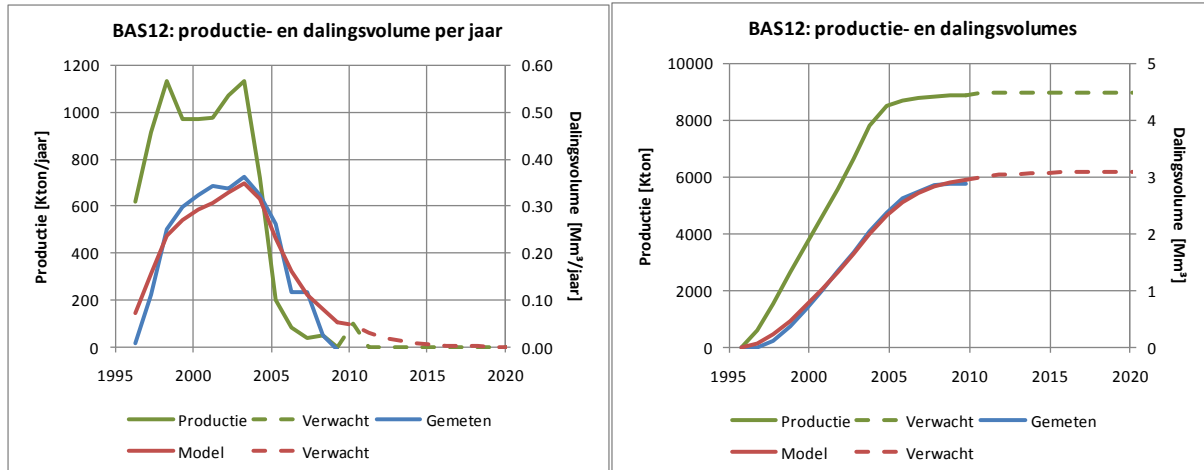


FIGUUR 12: OORZAKELIJKE ONTRAFELING LANGS DE LIJN BAS1/2-BAS4



FIGUUR 13: GEMETEN EN VERWACHTTE BODEMDALING DOOR BARRADEEL (II) ZOUTWINNING

In 2003 werd verondersteld dat de bodem boven de BAS1/2 cavernes na stopzetting van de productie substantieel zou terugveren (TNO, 2003). Zoals destijds al voorzien op grond van de integrale analyse van productiecijfers en metingen tot 2003 (Houtenbos A. , 2004) is dit niet gebeurd. De BAS3 en BAS4 komen zijn nog weinig geprononceerd. De nog korte meethistorie en vervloeiing met naburige kommen resulteren in minder nauwkeurige parameters voor deze kommen.



FIGUUR 14: (CUMULATIEVE) BAS1/2 PRODUCTIE EN DALINGSVOLUMES

De relatie tussen BAS12 productie en daling is historisch geijkt met behulp van de procedure uit (Houtenbos A. , 2005). Elke ton zoutproductie levert met een retardatie constante van 2,4 jaar uiteindelijk 0,35 m³ daling op. Na winning van de in januari 2010 vergunde 100 kton extra zout zal het bodemdalingvolume naar verwachting groeien tot 3,09 miljoen m³ in 2016. Door de nog magere bemonstering van de bodemdaling kon de relatie tussen productie en bodemdaling voor BAS 3 en 4 niet betrouwbaar worden berekend. De parameters voor deze kommen in Tabel 4 zijn daarom slechts indicatief.

Ongespecificeerde bodembeweging

Figuur 15 toont de totaal gemeten bodemdaling sinds 1988 na aftrek van bodemdaling door gas- en zoutwinning.



FIGUUR 15: TOTALE DALING MIN DALING DOOR GAS EN ZOUTWINNING = ONGEÏDENTIFICEERDE BODEMBEWEGING, 1988-2009

De ongeïdentificeerde restbeweging over de periode 1988-2009 varieert tussen -15 en +11 mm. Het patroon vertoont een gelijkenis met dat van de beweging vóór aanvang van delfstofwinning (Figuur 5 links boven). De magnitude van de verschillen - minder dan 0,8 mm op jaar basis - weerspiegelt de kwaliteit van de scheiding naar oorzaak.

AANVERWANTE ZAKEN

GPS metingen

Sinds 2004 wordt de bodemdaling door gas- en zoutwinning ook in de gaten gehouden met behulp van continue GPS metingen. Deze metingen zijn bedoeld als *early warning system* voor onverwacht gedrag. De metingen zijn maar zeer ten dele gepubliceerd en onduidelijk is hoe de metingen worden verwerkt en wanneer er op grond van dit soort metingen actie wordt ondernomen. Reden om te onderzoeken of deze metingen nieuwe inzichten verschaffen.

Voor deze kwantitatieve analyse waren de volgende uurgemiddelden in digitale vorm beschikbaar:

GPS station	BAS1/2	HRL4	HRL7
RD x coördinaat	160579 m	163989 m	162186 m
RD y coördinaat	579890 m	578303 m	578391 m
van	01-05-2004 02:00	15-07-2008 00:59	15-07-2008 02:59
tot	01-01-2007 00:00	15-01-2010 06:59	15-01-2010 06:59

TABEL 5: DIGITAAL BESCHIKBARE GPS METINGEN

Deze data geven de gemiddelde lengte, breedte en hoogte van een station over een uur, berekend uit GPS fasemetingen ten opzichte van het referentiestation Minnertsga. De standaardafwijking van hoogte uurgemiddelden ligt rond de 10 mm. Millimeter nauwkeurigheid kan voor deze metingen dan ook niet worden geclaimd.

Om de best mogelijke *real time* indicatie van de daling te krijgen zijn de metingen gefilterd met een Kalman filter en getoetst op uitschieters. De hiervoor gebruikte techniek is beschreven in (Houtenbos A. , Prediction, filtering and smoothing of offshore navigation data, 1982). De filter is zodanig ingesteld dat een snelheidsafname van 20 mm tot 0 mm per jaar binnen 3 maanden nog tot de reële mogelijkheden behoort. Tussen de 3 en 4% van de uurgemiddelden wordt verworpen. In de HRL GPS metingen komen uitschieters ter grootte van 20 mm voor.

De gemeten daling van de GPS antenne verschilt om een aantal redenen van de bodemdaling in het diepste punt van de dalingskom:

- De daling van de GPS antenne weerspiegelt behalve de bodemdaling onder het GPS station ook de beweging van de GPS antenne ten opzichte van de bodem, zoals door warmte uitzetting of zetting van de antennefundering.
- Het referentiepunt wordt in de berekening bewegingsloos verondersteld. De werkelijke beweging van referentiepunt vertaalt zich in een tegengestelde beweging van het GPS station. Bij voorkeur dienen om deze reden meerdere referentiestations tegelijk te worden gebruikt.

- Omdat het GPS station nooit precies in het centrum van de dalingskom staat, meet deze slechts een percentage van de daling in het diepste punt.

Om de metingen representatief te houden voor de daling in het diepste punt moet deze regelmatig worden gekalibreerd tegen de resultaten van de laatste vlakdekende (waterpas-)meting. Door onzekerheden in de bepaling van de bodemdaling in het diepste punt zal de relatie tussen GPS hoogte en daling sinds de start van de winning nooit veel nauwkeurig kunnen worden bepaald dan 5% van de daling in het diepste punt of - als dit minder is - 1 cm.

GPS station	BAS1/2 GPS	HRL4 GPS	HRL7 GPS
kalibratie datum	12-05-2004	11-09-2008	11-09-2008
kalibratie hoogte	7.544 m+NAP	4.309 m+NAP	4.807 m+NAP
kalibratie daling	-296.2 mm	-170.7 mm	-208.6 mm
% van daling in diepste punt	97% BAS1/2	70% HRL	85% HRL

TABEL 6: GPS KALIBRATIE GEGEVENS

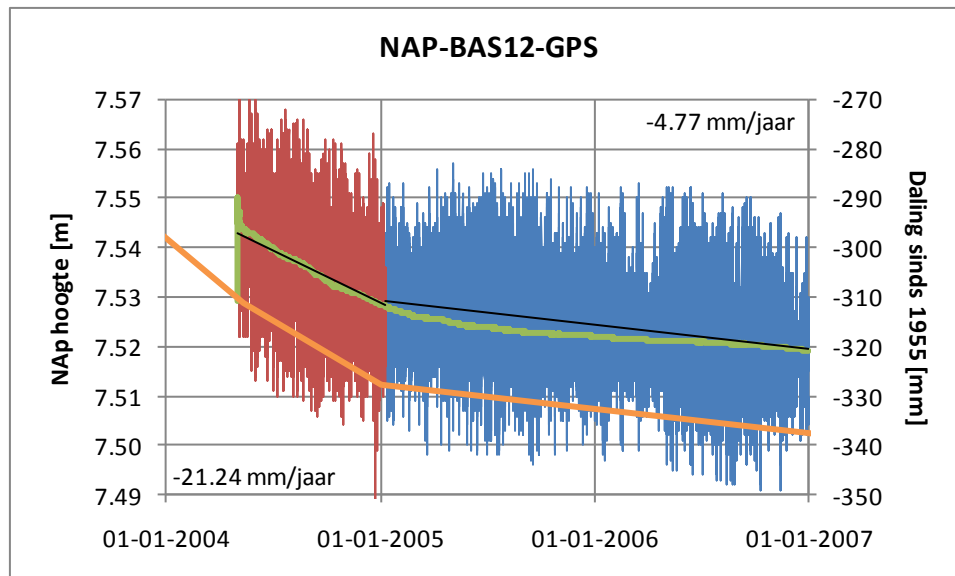
In Tabel 7 zijn de GPS metingen vergeleken met de resultaten uit de integrale analyse van de waterpasmetingen. Beide zijn relatief ten opzichte van Minnertsqa. De overeenstemming is redelijk. Dat geldt niet voor de geïmpliceerde bodemdaling in het diepste punt van de Harlingen kom. De GPS stations liggen op verschillende afstand van het diepste punt van de cumulatieve bodemdalingkom. De locatie van het zwaartepunt van de daling is in het geval van het Harlingenveld alles behalve stabiel. Het verschil in geïmpliceerde bodemdaling in het centrum van de HRL kom kan zijn verklaring vinden in een verschuiving van het zwaartepunt van de daling na het einde van de productie van de omgeving van de HRL-7 put in de richting van HRL-4.

GPS station	BAS1/2 GPS	HRL4 GPS	HRL7 GPS
Vergelijkingsperiode	12-05-2004 11-09-2006	11-09-2008 12-09-2009	11-09-2008 12-09-2009
Bodemdaling uit WP	-24.4 mm	-14.4 mm	-9.4 mm
Antennedaling uit GPS	-23.3 mm	-14.8 mm	-11.7 mm
Implicatie diepste punt	-24.0 mm @ BAS1/2	-21.3 mm @ HRL	-13.7 mm @ HRL

TABEL 7: VERGELIJKING DALING UIT WATERPASSING EN GPS

Figuur 16 illustreert het verloop van GPS hoogtemetingen op het station BAS1/2. Voorafgaande aan filtering en toetsing is eerst de trend (zwarte lijn) bepaald uit de

ruwe data. Daarbij zijn twee afzonderlijke periodes onderscheiden, een voor en een na het einde van de zoutproductie. De dalingssnelheid na eind productie (-4.77 mm/jaar) lijkt aan de hoge kant.



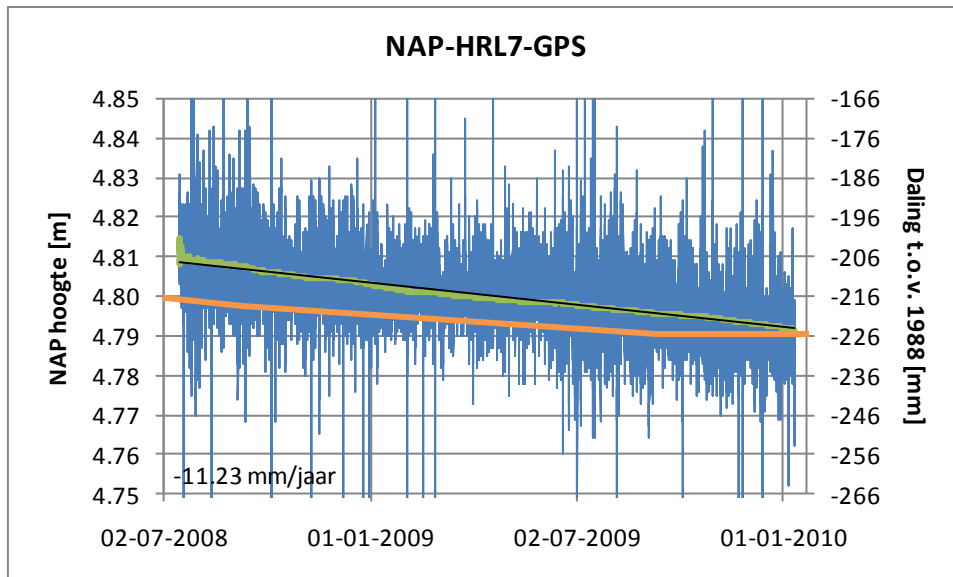
FIGUUR 16: CONTINUE GPS HOOGTEMETINGEN BIJ BAS1/2

Het resultaat na filtering en toetsing is aangegeven met een groene lijn. Deze begint wild, maar is stabiel na 4 weken. Het verloop van de gefilterde daling rond het einde van de productie (2004) is realistisch en de precisie aan het eind van de meetserie hoog. De oranje lijn is een aangenomen alarmniveau. Overschrijding ervan door de groene lijn impliceert een (dreigende) overschrijding van de 35 cm limiet in het diepste punt. In dat geval dient de productie onmiddellijk te worden stopgezet.

In verband met extra winning van stroozout uit de BAS-1 caverne meldt de minister van EZ in haar brief van 29 januari 2010 aan de tweede kamer: “De bodemdaling ter plaatse wordt continu gemonitord (met een GPS-systeem) en zodra deze de grenzen overschrijdt, dient Frisia de productie te stoppen. Hiervan is echter nog niets gebleken. Staatstoezicht op de Mijnen houdt hier toezicht op.” Gezien de onnauwkeurigheid van de metingen (1 cm), de onzekerheid in de daling tussen het begin van de zoutwinning (1995) en het begin van de GPS metingen (2004) (1.5 cm), de vertraging op het traject vanaf winning via bodemdaling en meting tot aan beoordeling door SodM (minimaal 2 maanden) en de geodetische deskundigheid/capaciteit van SodM (onvoldoende) is het zeer de vraag of overschrijding van de 35 cm tijdig en betrouwbaar kan worden vastgesteld.

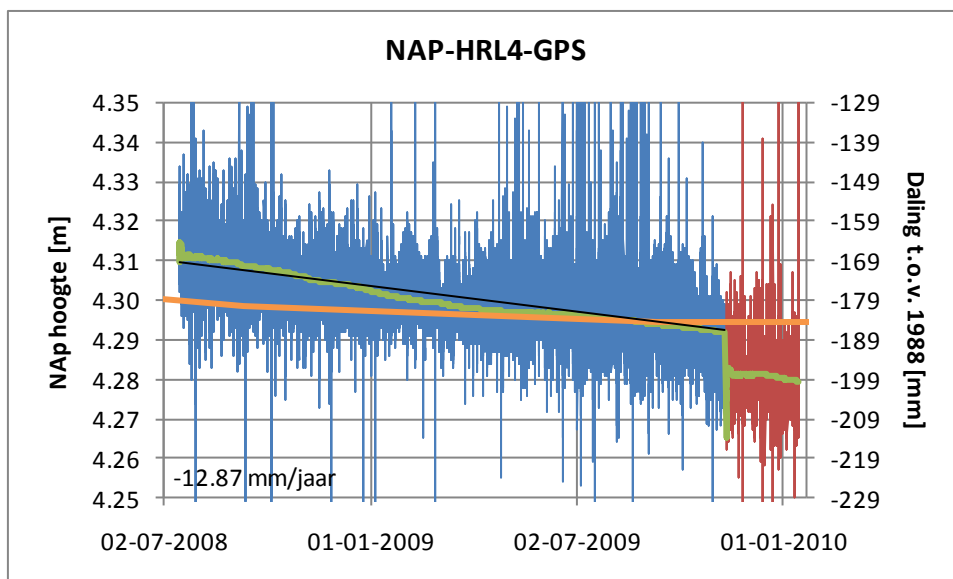
Zonder vooraf afgesproken alarmniveau en regelmatige en tijdige deskundige controle leveren continue meetsystemen niet de bescherming, die ervan verwacht mag worden,

Figuur 17 toont het verloop van GPS hoogtemetingen op het station HRL7. Het alarm niveau is hier gericht op overschrijding van 2 cm extra bodemdaling in het diepste punt na het stilleggen van de productie (2008). Dit niveau was bij de laatste meting (15-01-2010) nagenoeg bereikt.



FIGUUR 17: CONTINUE GPS HOOGTEMETINGEN BIJ HRL-7

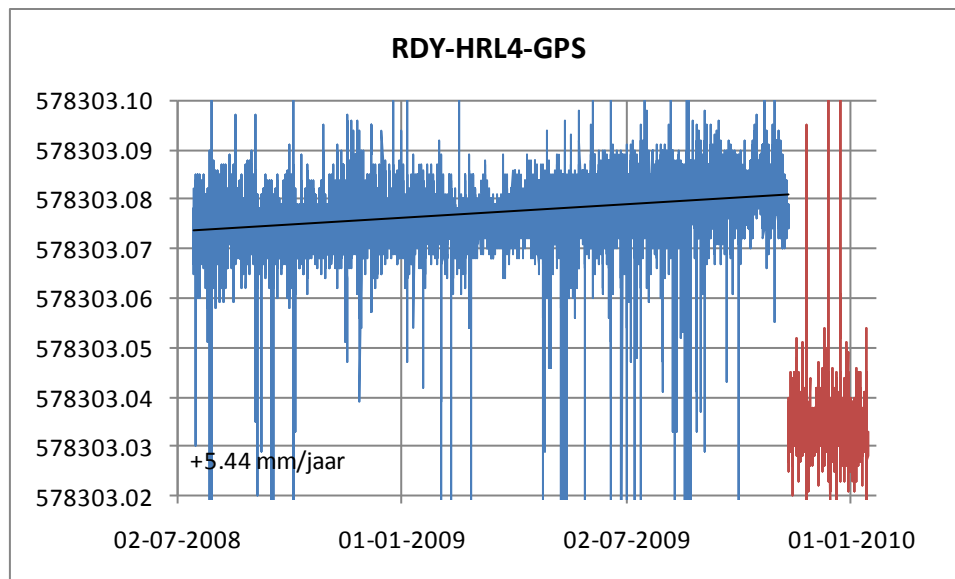
Figuur 18 laat het verloop van hoogtemetingen op GPS station HRL4 zien. Ook bij HRL4 was het alarm niveau gericht op overschrijding van 2 cm extra bodemdaling in het diepste punt na het stilleggen van de productie. Dit niveau werd al in juni 2009 bereikt.



FIGUUR 18: CONTINUE GPS HOOGTEMETINGEN BIJ HRL-4

Op 11-11-2009 tussen 8:00 en 18:00 is de HRL4 GPS antenna kennelijk verstoord. Dat is zonder het hier aangebrachte kleurverschil aan de hoogtegrafiek nauwelijks te zien. Het verloop van de X coördinaat laat aan duidelijkheid echter niets te wensen (Figuur 19). Zonder herijking van het verstoorde GPS station tegen een vlakdekkende waterpassing is het station niet meer bruikbaar als *early warning system* voor onverwacht gedrag van de bodemdaling door gaswinning.

Figuur 19 toont ook een horizontale beweging van het GPS station aan. Deze is voor alle 3 de GPS stations samengevat in Tabel 8.



FIGUUR 19: CONTINUE GPS Y COORDINAAT METINGEN BIJ HRL-4

GPS station	BAS1/2 GPS	HRL4 GPS	HRL7 GPS
Waarnemingsperiode	01-05-2004 01-01-2007	15-07-2008 15-01-2010	15-07-2008 15-01-2010
Horizontale verplaatsing	5.75 mm/jaar @ 85°	6.26 mm/jaar @ 330°	8.56 mm/jaar @ 64°
Interpretatie	naar BAS3 & HRL	naar HRL	naar HRL

TABEL 8: HORIZONTALE VERSCHUIVING GPS STATIONS

De horizontale bewegingen zijn significant. Volgens de theorie (Geertsma, 1973) zijn deze bewegingen gericht naar het centrum van bodemdalingkom. Dit gegeven kan worden gebruikt om de plaats van het zwaartepunt van de bodemdaling in de betreffende meetperiode te bepalen. In dit geval leidde ook een dergelijke berekening vanuit de twee GPS stations boven het HRL-veld niet tot een consistente schatting van de daling in het diepste punt.

Theoretisch is er geen horizontale beweging in het centrum van de kom. Hierdoor kan de relatieve horizontale beweging tussen tegenover elkaar liggende flanken van de kom hoog oplopen. Het is niet ondenkbaar dat behalve bodemdaling ook horizontale bodembeweging tot schade kan leiden.

Radar metingen

Op 17 november 2009 introduceerde de minister van Economische Zaken radarmetingen om de bodemdaling in NW-Friesland vast te stellen (MinEZ, 2009). Het betrof een onderzoek van TNO (TNO, 2009) in opdracht van het Staatstoezicht op de Mijnen met als doel na te gaan of “Persistent Scatterer Interferometry” (PSI) een bijdrage kan leveren aan een beter inzicht in de omvang en laterale verdeling van de bodemdaling in Noordwest-Friesland en de snelheid waarmee de bodemdaling in het gaswinningsgebied bij Franeker verloopt.

Aanleiding tot het TNO onderzoek was een 4 cm verschil tussen twee methoden om bodemdaling uit waterpasmetingen te berekenen, niet de kwaliteit van de waterpasmetingen zelf. In het TNO onderzoek zijn de onbetwiste waterpasmetingen echter vervangen door radarmetingen en is de zelfde betwiste methode gebruikt om bodemdaling uit de metingen te berekenen. Hierbij wordt onvoldoende rekening gehouden met de verschillende manieren waarop meetruis, peilmerkspecifieke beweging en bodemdaling in de metingen doorklinken. Ook wordt veelal voorbij gegaan aan het feit dat metingen en resultaten alleen in relatieve zin, d.w.z. in termen van een hoogteverschil of beweging tussen twee meetpunten over een bepaalde periode, met elkaar vergeleken kunnen worden.

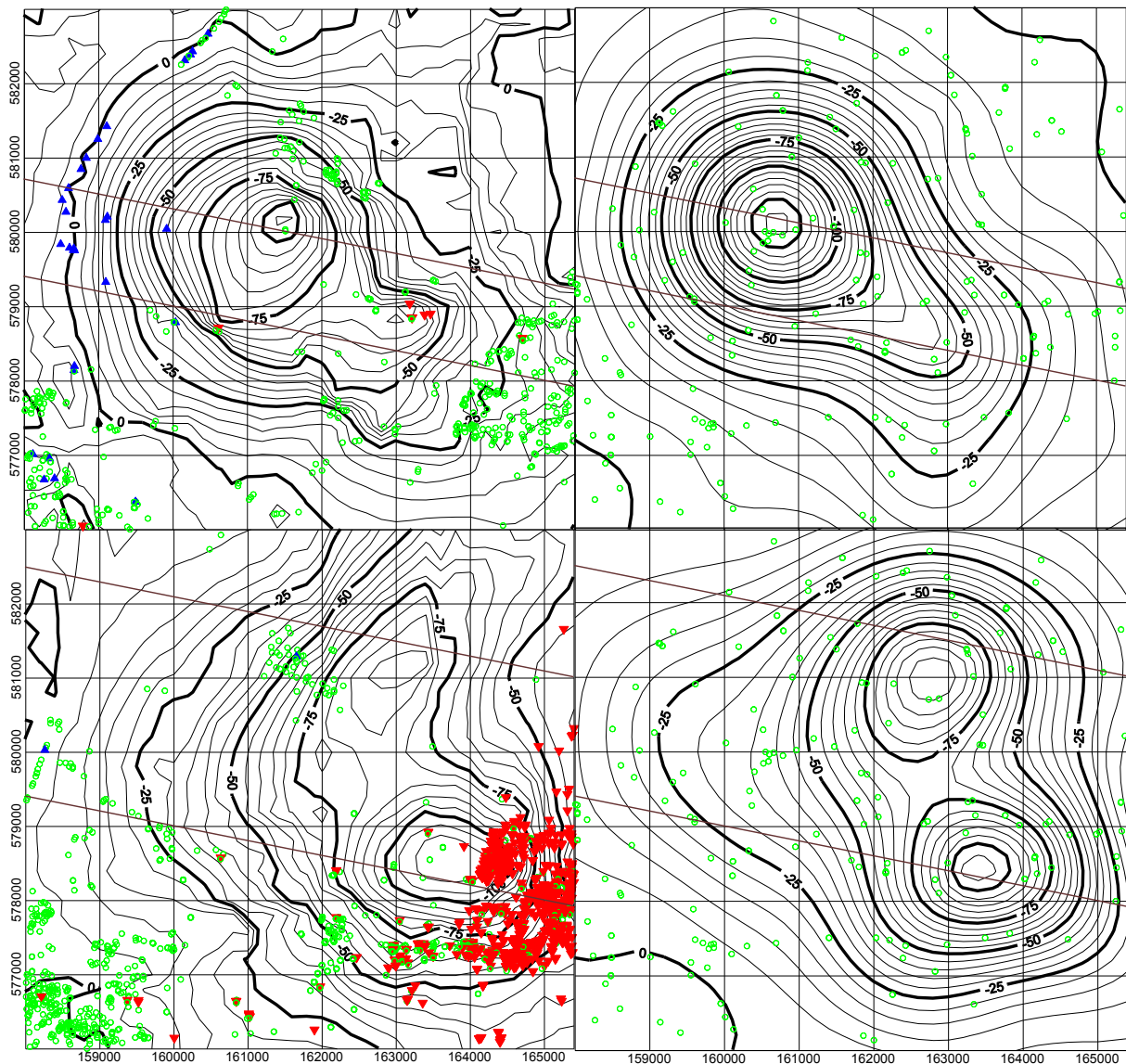
In het TNO onderzoek zijn de resultaten van de radartechniek vergeleken met die van conventionele waterpassing. De vergelijking bleek door een gebrek aan bruikbare radarmetingen niet mogelijk voor het centrale gebied van de zoutwinning en voor de helft van de periode van gaswinning. Doordat waterpasmetingen na 2006 en belangrijke, speciaal ter versterking van het netwerk bijgeplaatste, peilmerken buiten beschouwing zijn gebleven zijn conclusies over de dekkingsgraad bovendien onzuiver gebleven.

Wel werden eerder door Vermilion en SodM betwiste conclusies van de analyses na de waterpassingen van 2003, 2006, 2007 en 2008 door TNO bevestigd: de bodemdaling door gaswinning versnelt rond 1997 en door Vermilion en SodM op grond van inconsistentie met het geomechanische model als onstabiel verworpen peilmerken blijken toch stabiel.

Figuur 20 vergelijkt de resultaten van de radarmetingen met die van de integrale analyse van waterpassingen tot en met 2008: boven de resultaten van de ERS satelliet over de periode 1995-2000, onder die van de Envisat satelliet over de periode 2003-2008, links de radar resultaten, rechts die van de integrale analyse van de waterpasmetingen. Meetpunten die meer dan 20 mm zijn gedaald of gestegen ten opzichte van het lokale gemiddelde zijn aangegeven in rood respectievelijk blauw.

Bodemdaling door diepere oorzaken, als gas- en zoutwinning verloopt heel geleidelijk. Extra metingen binnen de correlatielengte van het bodemdalingssignaal in ruimte en tijd voegen weinig toe aan de nauwkeurigheid waarmee het patroon van bodemdaling kan worden bepaald. Bij waterpassing kan plaats en dichtheid van peilmerken nauwkeurig op de behoefte worden afgestemd. Bij GPS metingen stuit dit al snel op excessieve kosten. Bij radar metingen is de ruimtelijke verdeling van de meetpunten niet beïnvloedbaar en voldoet deze in het algemeen niet aan de preci-

sie- en betrouwbaarheidseisen van bodemdalingmetingen. Figuur 20 illustreert de conclusie dat de grotere meetdichtheid van radarmetingen in ruimte (1-4 maal waterpassing) en tijd (~ 40 maal waterpassing) niet noodzakelijkerwijs leidt tot een scherpere definitie van de bodemdaling.



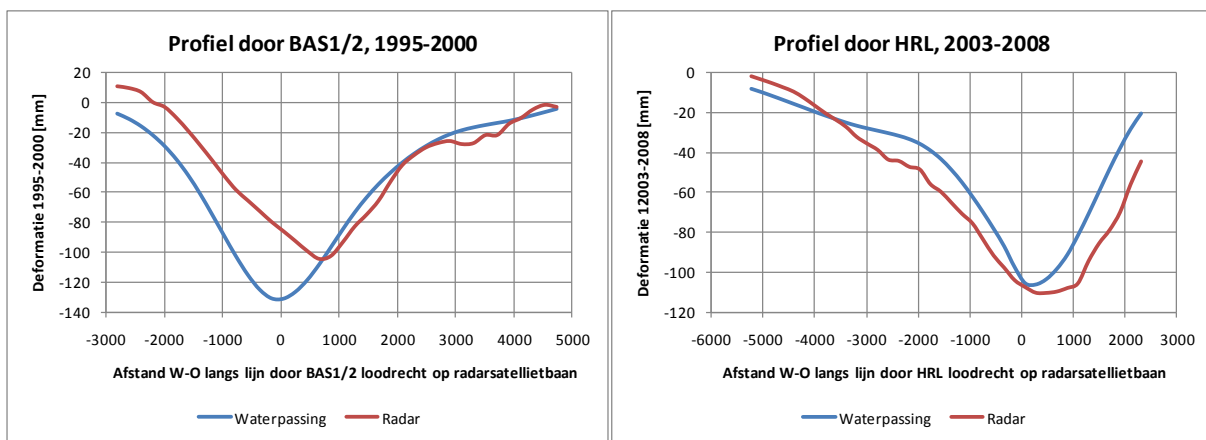
**FIGUUR 20: BOVEN 1995-2000, ONDER 2003-2008. LINKS RADAR, RECHTS WATERPASSING.
BLAUW: MEETPUNT-BODEM > 20 MM, ROOD: MEETPUNT-BODEM < 20 MM.**

Radarmetingen registreren alleen bewegingen in de kijkrichting van de satelliet. Deze zijn in het TNO onderzoek onder de aanname van verwaarloosbare horizontale beweging omgezet in verticale bewegingen. De bewerking resulteert in een fout in de afgeleide verticale beweging ter grootte van 40% van de horizontale beweging. In de configuratie van het TNO onderzoek wordt de bodemdaling op de west flank van een kom onderschat, op de oost flank overschat. De effecten daarvan zijn in de kaartbeelden van Figuur 20, de profielen van Figuur 21 en de ontwikkeling in de tijd aan de Waddenzeekust en op de oost flank van de kommen van Figuur 22 duidelijk herkenbaar. Deze fouten lopen op tot ongeveer 6 mm/jaar of te wel 175% van de gemiddelde dalingsnelheid in NW-Friesland over de periode 2008-2009.

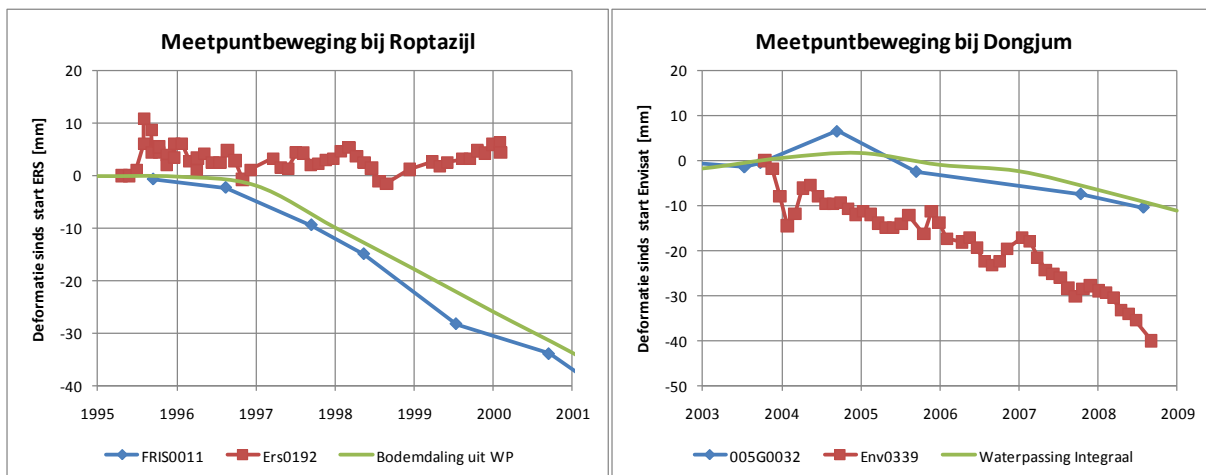
Verwaarlozing van horizontale beweging in het referentiegebied, waar de bodembeweging per definitie op nul wordt gesteld, leidt tot systematische over of onderschatting van bodemdaling. In de TNO studie met het referentie gebied aan de oostkant van Harlingen is sprake van structurele overschatting van de bodemdaling.

Na combinatie met de resultaten van (Houtenbos A. , 2008) voor de periode zonder radarmetingen is het netto resultaat van de verwaarlozing van de horizontale beweging in de TNO studie – een onderschatting van de bodemdaling aan de Waddenzeedijk met 2 cm en een overschatting in het westelijk deel van Franeker met 3 cm.

De rekenmethode, gebruikt in het TNO radaronderzoek, is niet geschikt om verticale bodembeweging betrouwbaar in beeld te brengen.



FIGUUR 21: BODEMDALING UIT WATERPASSING EN RADARMETINGEN LANGS PROFIELEN



FIGUUR 22: PEILMERK-, RADARMEETPUNT- EN BODEMBEWEGING AAN WAD/LANDZIJDE VAN DE KOM

In het TNO rapport zijn de verschillen tussen de waterpas- en radarresultaten geïnterpreteerd en verwerkt als reële extra bodemdaling. Dit impliceert een fout in de historische waterpasresultaten. De keuze om - zonder nader onderzoek - de oorzaak van de verschillen niet bij de verwerking van de relatief nieuwe radarmetingen, maar bij de tot dusverre onomstreden waterpasmetingen te leggen is wetenschappelijk niet verantwoord geweest.

TCBB advies

Eind november 2009 bracht de Technische Commissie Bodembeweging (TCBB) haar definitieve advies (TCBB, 2009) uit aan de minister van Economische Zaken over de manier waarop bodemdaling door gas- en zoutwinning moet worden gecontroleerd. De TCBB stelde een onderzoek in naar aanleiding van publieke onrust over verschillen in gemeten bodemdaling en overschrijding van voorspelde bodemdaling. De onrust betrof met name de daling door gaswinning in NW-Friesland.

Deze gaswinning startte in 1988. Met vooruitziende blik werd het bestaande netwerk van NAP peilmerken voor aanvang uitgebreid met ondergrondse en daardoor meer stabiele meetmerken. Dit netwerk is in 1997 verder versterkt door bijplaatsing van meetmerken in het centrum van de bodemdalingkom. Na de waterpassing van 2003 kwamen verschillen in, uit de metingen berekende, bodemdaling aan het licht. Deze verschillen zijn terug te voeren op manier waarop metingen naar later bijgeplaatste merken zijn geïntegreerd in de totale meethistorie vanaf 1988. In de standaard rekenwijze moesten onvolledige meethistories noodgedwongen buiten beschouwing worden gelaten. Inmiddels verder ontwikkelde rekenmethoden, als SuMo (Odijk & Kenselaar, 2003) en SuRe (Houtenbos A. , 2004), konden deze onvolledige meethistories wel aan. Daarmee werd de definitie van de bodemdaling in het centrum van de kom ten westen van Franeker veel scherper. Het gedrag van de peilmerken bleek ruimtelijk en temporaal consistent, maar verschillend van dat voorspeld met het vigerende geomechanische model van de mijnbouwonderneming.

Latere integrale analyses van waterpassingen bevestigden steeds het beeld van 2003: een na 1997 sterk versnelde bodemdaling. De verschillen met het geomechanische model namen toe, maar werden telkens zonder degelijke probleemanalyse toegeschreven aan onvolkomenheden in de 'gemeten' bodemdaling, niet aan mogelijke fouten in het geomechanische model. Op grond van een visuele inspectie werden alle in 1997 doelgericht bijgeplaatste peilmerken binnen een kilometer van het komhart onstabiel verklaard. Wijzend op een afwijking in het geotechnische plaatsingsrapport (Grondmechanica Delft, 1988), die destijds geen aanleiding vormde voor afwijzing, werd ook het ondergrondse merk het dichtst bij het komcentrum onstabiel verklaard. Alhoewel nergens anders, buiten de invloedssfeer van de gaswinning, melding werd gemaakt van significante bodemdaling door andere oorzaken dan delfstofwinning werden de afwijkingen van het geomechanische model rond het komhart, toegeschreven aan 'autonome' daling. Op grond van laboratoriumproeven (Norwegian Geotechnical Institute, 2007) werd een fout in het geomechanische model uitgesloten geacht als oorzaak van de verschillen.

Pas in het TNO radaronderzoek (TNO, 2009) werd erkend dat de bodemdaling boven het gasveld rond 1997 versnelde en dat de peilmerken nabij het zwaartepunt van die daling toch stabiel waren. De gevolgtrekking, dat de bewijsvoering bij de eerdere verwerping van deze bevindingen niet deugdelijk was, is echter uitgebleven. Daarmee zijn ook de ogen gesloten voor belangrijke leerpunten, die de controle op bodemdalingvoorspellingen in de toekomst hadden moeten verbeteren.

Terugkijkend zijn de oorzaken van de elkaar tegensprekende bodemdalingcijfers scherp aan te geven:

- Onvoldoende extractie van bodemdalinginformatie, besloten in het totaal van de deformatiemetingen.
- Onvoldoende afstand tussen de geometrische analyse van de metingen en het te controleren geomechanische model van de mijnbouwonderneming.

De maatregelen ter voorkoming van herhaling zijn even helder:

- Berekening van werkelijk opgetreden bodemdaling uit metingen door geodetisch specialisten met 'state of the art' analysemethodieken.
- Strikte onafhankelijkheid tussen de geometrische analyse van de metingen enerzijds en het te controleren geomechanische model anderzijds.

De analyse van de TCBB is echter een geheel andere geweest. De verschillende methodieken zijn primair beoordeeld op aanvaardbaarheid voor de mijnbouwsector. De betrouwbaarheid van de met elk van de methodes naar oorzaak gescheiden bodemdaling is niet getoetst tegen voorbeelden uit de praktijk. Een dergelijke toetsing zou hebben aangetoond, dat:

- de inrichting van het meetnetwerk en het aantal ondergrondse merken slechts van marginaal belang zijn voor de nauwkeurigheid van de eindresultaten,
- peilmerkspecifieke beweging en bodembeweging via een geostatistische vergelijking met omringende peilmerken zonder geomechanisch model betrouwbaar gescheiden kunnen worden,
- bijdrages van verschillende oorzaken aan de totale bodemdaling betrouwbaar gescheiden kunnen worden m.b.v. een flexibel generiek model,
- voorspellingen via extrapolatie van een gekalibreerde, directe relatie tussen productie en bodemdaling in de praktijk consequent betrouwbaarder blijken te zijn dan die met een gekalibreerd geomechanisch model als tussenstap.

De TCBB adviseert een rekenmethode in drie stappen:

- in de eerste stap worden de metingen opgeschoond. Deze stap is gelijk aan de toetsing beschreven in het hoofdstuk 'Berekening totale daling' van dit rapport met dien verstande dat in de TCBB procedure alleen excessieve peilmerkspecifieke beweging wordt verwijderd en in de hier gevolgde procedure elke peilmerkspecifieke beweging.
- in stap twee worden per epoche relatieve hoogteveranderingen van de peilmerken (peilmerkbeweging) berekend uit de in stap één opgeschoonde metingen en als discrete waarde per peilmerk en epoche gerapporteerd in een differentiestaat. De in dit rapport gevolgde procedure maakt optimaal gebruik van de geleidelijkheid van bodemdaling in ruimte en tijd. Daarvoor is in stap één de niet ruimtelijk interpoleerbare peilmerkspecifieke beweging verwijderd. Het resultaat is een voor elk tijdstip en plaats interpoleerbare gemeten bodembeweging.
- in stap drie wordt de peilmerkdaling uit stap twee door de mijnbouwondernemingen zelf gescheiden naar oorzaak. Het eigen geomechanische model wordt vervolgens gekalibreerd aan dat deel van de peilmerkdalingen dat de mijnbouwonderneming aan zich zelf heeft toegerekend. Het gekalibreerde model wordt tenslotte als 'gemeten' daling t.g.v. de activiteiten van de mijn-

bouwer gepresenteerd. Deze procedurestap is niet objectief en onzuiver. Het geeft de neiging tot zelfbevestiging, die de eerdere voorspellingsfouten voor het Harlingenveld veroorzaakten, ruim baan. De procedure in dit rapport scheidt de totaal gemeten bodemdaling naar oorzaak op objectieve, statistische gronden. De scheidingscriteria worden aan de metingen zelf ontleend, het geomechanisch verwachte eindresultaat heeft daar geen invloed op.

Ongeacht de te volgen procedure blijft de erosie van de benodigde specialistische geodetische kennis een belangrijk probleem. Het is nodig dat Staatstoezicht op de Mijnen, mijnbouwondernemingen en potentiële kennisleveranciers investeren in het creëren en onderhouden van voldoende specialistische kennis voor een effectieve, onafhankelijk controle op bodemdalingvoorspellingen en de implementatie van nieuwe meettechnieken.

Zonder investeringen in opbouw en onderhoud van specialistische geodetische kennis, geen effectieve controle op bodemdalingvoorspellingen.

De TCBB legt de scheiding van de gemeten bodemdaling naar oorzaak expliciet in handen van de mijnbouwondernemingen. Het resultaat van die scheiding is bepalend voor de vraag wie aansprakelijk is voor schade, veroorzaakt door bodemdaling. De mogelijkheden voor mijnbouwondernemingen om zichzelf bij deze impliciete toewijzing van aansprakelijkheden te bevoordelen ten koste van waterschappen, de natuur en andere, potentieel schadelijkende, partijen zijn met het TCBB advies verruimd.

De verleiding om winningvergunningen met te rooskleurige bodemdalingvoorspellingen binnen te halen zal toenemen. Het is nodig dit te ontmoedigen door het risico van foute voorspellingen eenduidig bij de delfstofwinner te leggen: overschrijding van de voorspelde bodemdaling moet einde winvergunning betekenen. Nu de TCBB stelt dat bodemdaling door delfstofwinning alleen door de delfstofwinners zelf kan worden bewezen, is omkering van de bewijslast bij een dispuut over schade de enig juiste consequentie. Met de introductie van nieuwe meettechnieken, is het minder vanzelfsprekend geworden dat de metingen ook tijdig worden gepubliceerd om controle op mogelijk aantasting van belangen van derden mogelijk te maken. Deze controlemogelijkheid zou gewaarborgd moeten worden door tijdige openbaarheid van productievolumes en bovengrondse meetgegevens wettelijk vast te leggen.

Gebiedsproces noordwest Friesland

Op 15 januari 2010 publiceerde de Stuurgroep Franekeradeel – Harlingen een concept ontwerp inrichtingsplan voor het gebied Franekeradeel – Harlingen (Stuurgroep Franekeradeel - Harlingen, 2009). Behalve bodemdaling door gas- en zoutwinning maken ook meer extreme pieken in neerslag en zeespiegelstijging - beide door klimaatverandering - een ingreep op dit moment noodzakelijk. Tot de (potentiële) problemen behoren:

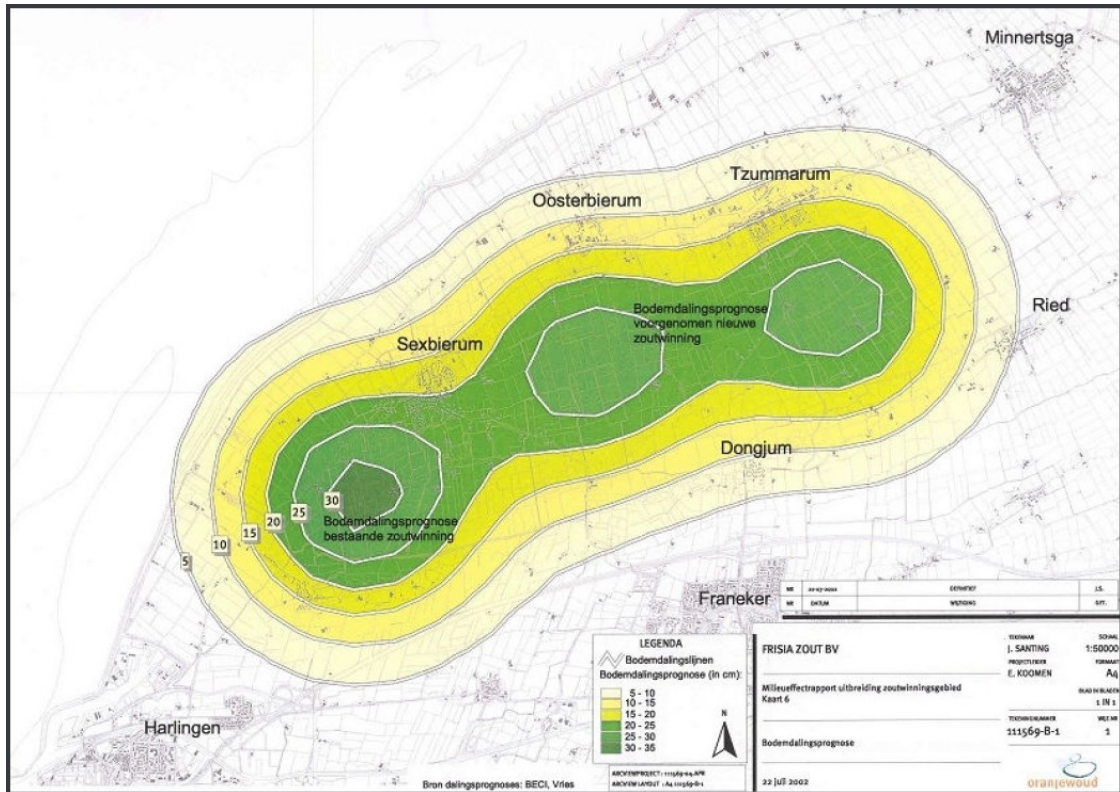
- vernatting en verzilting van percelen met o.a. oogstschade als gevolg
- overstroming van oevers en kades
- verminderde doorvaarthoogte van bruggen
- schade aan en capaciteitsvermindering van rioleringen
- aantasting van de integriteit van zeeweringen
- scheurvorming in bouwwerken

De al opgetreden en nog te verwachten bodemdaling is bepalend voor de maatvoering van de schadebeperkende maatregelen en voor de vraag wie dat moet betalen.

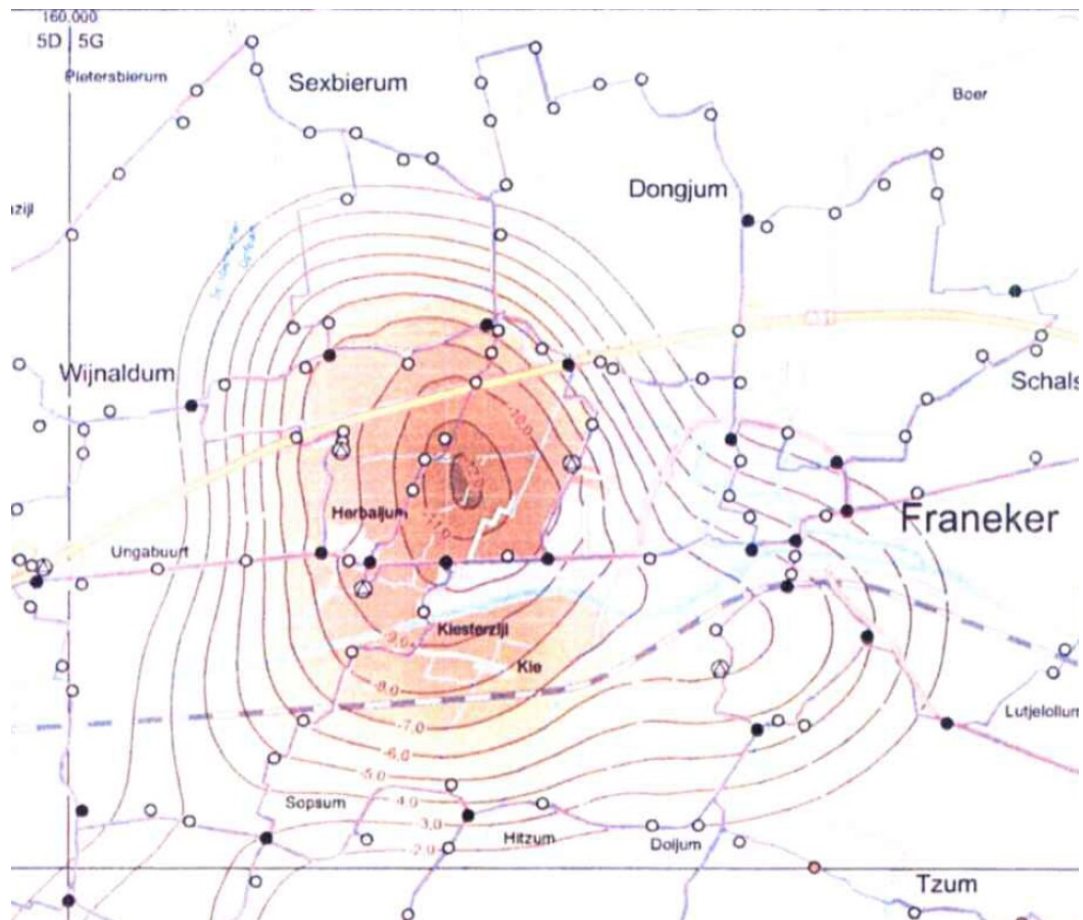
Gezien de voorgeschiedenis (zie hoofdstuk 'TCBB advies') is een kritische houding ten opzichte van meetgegevens verstrekt door mijnbouwondernemingen en SodM op zijn plaats. In het bijzonder waar deze de grondslag vormen voor een herinrichtingsplan en de verdeling van de kosten daarvan. Het concept plan meldt gebruik van de 'metingen van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) van november 2009'. Dit betreft waarschijnlijk de resultaten van het TNO onderzoek over de periode van gaswinning tot aan het staken van de productie. De studie heeft geen gebruik gemaakt van metingen over de periode van bodemdaling na staking van de productie. Door verwaarlozing van de invloed van horizontale beweging zijn deze resultaten onbruikbaar geworden voor de maatvoering van de herinrichting van NW-Friesland (zie hoofdstuk 'Radar metingen' in dit rapport). De continuïteit van de reeks waterpassingen van 1988 tot een jaar na staking van de productie (2009) levert een veel betrouwbaarder grondslag voor die maatvoering. De resultaten daarvan zijn weergegeven in de figuren 3, 6 en 11 van dit rapport. Volgende vraag resteert op dit punt:

- Hoe beïnvloeden eventuele fouten in de tot nu toe geaccumuleerde bodemdaling de te nemen maatregelen en de kostentoedeling daarvan? Is bijvoorbeeld de 3 cm onderschatting van de daling bij Ropta (Figuur 22) in een 5 jaar periode van invloed op de herinrichting van het watersysteem Ropta?

Ook ten aanzien van de voorspellingen van mijnbouwondernemingen past gezien de voorgeschiedenis een kritische houding. In het concept plan is rekening gehouden met een marge van circa 5 centimeter ten opzichte van de bodemdalingprognose 2016. Onduidelijk is welke prognose hier precies bedoeld wordt. De laatst gepubliceerde prognoses zijn weergegeven in de Figuur 23 en Figuur 24. De tot nu toe geaccumuleerde bodemdaling door gaswinning bedraagt al bijna het dubbele van de in Figuur 24 aangegeven waarde. Mogelijk is de 28 cm, genoemd in de brief van 17 november van de minister van Economische zaken aan de Tweede Kamer (MinEZ, 2009) als uitgangspunt genomen.



FIGUUR 23: UITEINDELIJKE BODEMDALING DOOR ZOUTWINNING (STAATSTOEZICHT OP DE MIJNEN, 2003)



FIGUUR 24: VERWACHTE BODEMDALING DOOR GASWINNING TOT 2016 (VERMILION, 2007)

Voor een goed inzicht in de afdekking van risico's is antwoord op de volgende vragen gewenst:

- Hoeveel waterbergingscapaciteit was er vóór aanvang van de gas- en zoutwinning om extreme neerslagpieken op te vangen?
- Hoe luiden de prognoses voor de bodemdaling door gas- en zoutwinning in 2016, die als uitgangspunt voor de te nemen maatregelen zijn gebruikt?
- Hoeveel extra waterberging is er nodig ter compensatie van de bodemdaling door gas- en zoutwinning, als voorspeld in deze prognoses?
- Hoeveel extra waterberging is er nodig ter compensatie van de effecten van klimaatverandering?
- Heeft de vorm van de extra benodigde waterberging, geconcentreerd rond een komhart of uniform of het hele gebied, gevolgen voor de (kosten van) de te nemen maatregelen?

De toekomstige ontwikkeling van de bodemdaling in het gebied ten noorden van Herbayum is buitengewoon onzeker. Op grond van de tijdsrelatie tussen productie en bodemdaling tot nu toe is een verdubbeling van de bodemdaling tot 2038 (Figuur 10) het meest waarschijnlijke scenario. Dit vormt een ernstig risico voor de duurzaamheid van de te nemen maatregelen:

- Wat zijn de technische en financieringconsequenties, als de bodemdaling vóór, tijdens of na uitvoering van het plan de prognose 2016 overschrijdt?
- Welke afspraken zijn er gemaakt die de aansprakelijkheid van Vermilion en/of Frisia voor schade beperken?

Ter beperking van schade door gas- en zoutwinning zijn peilveranderingen gepland. Peilveranderingen verhogen de kans op scheurvorming in gebouwen (Verruit, 2000):

- Hoeveel hoger wordt de kans op scheurvorming als de geplande peilveranderingen worden doorgevoerd?
- Welke verhoging vindt de stuurgroep acceptabel?

Het TNO radaronderzoek is onder geheimhouding tot stand gekomen en de resultaten van deze nieuwe meettechniek zijn vóór publicatie niet aan externe deskundigen, zoals de subcommissie Bodembeweging en Zeespiegelvariatie van de NCG/KNAW, voorgelegd. De waterpasmetingen van september 2009 en de digitale GPS metingen bevatten in tegenstelling tot de radarmetingen wel informatie over de bodemdaling na het staken van de productie. Alhoewel cruciaal voor de maatvoering van het voorliggende plan zijn deze pas na publicatie van het concept ontwerp inrichtingsplan in januari 2010 vrijgegeven. Door deze *getimede* openheid zijn de bestuurlijke achterbannen in hun besluitvorming verstoken gebleven van eventuele andere zienswijzen op de juistheid van de grondslag voor kostentoedeling.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies

Bodemdaling

- De bodemdaling door zoutwinning verloopt als voorspeld. De cumulatieve daling boven de BAS1/2, BAS3 en BAS4 cavernes bedroeg in september 2009 respectievelijk 33, 13 en 5 cm. Het door zoutwinning veroorzaakte dalingsvolume bedraagt 3,41 miljoen kubieke meters en groeit met 0,16 miljoen kubieke meters per jaar.
- De cumulatieve daling boven het gasveld ten westen van Franeker bedroeg in september 2009 26 cm. Het door gaswinning veroorzaakte dalingsvolume bedraagt 2,42 miljoen kubieke meters en groeit met 0,19 miljoen kubieke meters per jaar. Na stopzetting van de gaswinning is de bodemdaling onverminderd door gegaan. De onzekerheid in voorspellingen is groot. Het meest waarschijnlijke scenario is een verdubbeling van het dalingsvolume in de periode tot 2038.
- De metingen bevatten geen aanwijzingen voor bodemdaling, anders dan door gas- en zoutwinning.
- Gezien de moeizame voorgeschiedenis is een kritische houding van lokale overheden ten aanzien van meetgegevens en voorspellingen verstrekt door mijnbouwondernemingen en SodM geboden.

GPS metingen

- De continue GPS metingen komen goed overeen met de waterpasmetingen.
- Door verstoring van het GPS station bij de gasput HRL-4 is zijn de metingen niet meer direct bruikbaar.
- De locatie van de bodemdalingkom ten westen van Franeker is niet stabiel. Daardoor kunnen uit de metingen op de GPS stations geen eenduidige conclusies worden getrokken over de bodemdaling in het diepste punt.
- De GPS metingen tonen horizontale bewegingen met snelheden tot 8,5 mm/jaar aan. Het is denkbaar dat ook deze bewegingen schade veroorzaken.

Radar metingen

- Vanaf 1988 tot nu werd delfstof gewonnen. De radar metingen beslaan daarvan slecht 2 periodes van 5 jaar. Zij bevatten geen informatie over het dalingsgedrag na het stopzetten van de gaswinning in 2008.
- Verwaarlozing van horizontale beweging resulteerde in fouten tot 6 mm/jaar. De resultaten zijn niet bruikbaar als grondslag voor de herinrichting van noordwest Friesland.

TCBB advies

- De TCBB bracht advies uit over de berekening van bodemdaling uit de metingen. De gebeurtenissen rond de bodemdaling door gaswinning ten westen van Franeker brengen het probleem en de oplossing scherp in beeld.

- Het probleem is een onjuiste rekenmethode, niet een onjuiste meetmethode, in combinatie met te rigide vasthouden aan het theoretisch model van de mijnbouwondernemer.
- De oplossing is berekening van de opgetreden bodemdaling door geodetisch specialisten, totaal onafhankelijk van de mijnbouwondernemingen.
- Door de berekening exclusief toe te vertrouwen aan mijnbouwondernemingen, verruimt de TCBB de mogelijkheden voor mijnbouwondernemingen om zichzelf bij deze berekening te bevoordelen ten koste van waterschappen, de natuur en individuele burgers.

Gebiedsproces noordwest Friesland

- De 'SodM metingen van november 2009' zijn onbruikbaar als basis voor de maatvoering van te nemen maatregelen. Het gaat hier in feite om de TNO analyse van bovengenoemde radarmetingen tot 2008 in opdracht van SodM.
- De waterpasmetingen van september 2009 bevatten wel informatie over de bodemdaling na het stilleggen van de gaswinning, maar zijn niet meegenomen in de planning. Zij werden pas in januari 2010 vrijgegeven.
- De maatregelen zijn ingestoken op niet gepubliceerde bodemdalingvoorspellingen voor het jaar 2016 van Vermilion en Frisia zelf. Elke centimeter minder bodemdaling reduceert de aansprakelijkheid van de mijnbouwonderneming met 3%.
- De bodemdaling ten gevolge van gaswinning heeft zich na staking van de gaswinning onverminderd doorgezet. Het is waarschijnlijk dat de genomen maatregelen al voor 2016 onvoldoende blijken. Onduidelijk is of overschrijding van de 2016 prognose ook leidt tot aanpassing van de kostentoedeling in verhouding met de veroorzaakte, extra benodigde waterberging.

Aanbevelingen

Bodemdaling

- De oorzaken van het afwijkend dalingsgedrag bij Franeker zijn nog onbekend. Onderzoek naar de diepte, plaats, grootte en afplatting van de dalingskom voor elk van de periodes tussen opeenvolgende waterpassingen afzonderlijk kan inzichten in het feitelijk gedrag aanscherpen.

GPS metingen

- Rapporteer behalve daling, ook de horizontale bewegingscomponenten.
- Herijk na elke waterpassing de relatie tussen op het GPS station gemeten daling en de daling in het diepste punt.
- Leg voor elk GPS station vooraf het niveau vast, waarop actie moet worden ondernomen.

Radar metingen

- Waarborg een rekenmethode voor radarmetingen, waarin horizontale bodembeweging correct wordt verwerkt en meetpuntgebonden verticale beweging wordt gescheiden van bodembeweging.

TCBB advies

- Creëer en onderhoud voldoende geodetisch specialistische kennis voor een effectieve, onafhankelijk controle op bodemdalingvoorspellingen en de implementatie van nieuwe meettechnieken.
- Laat de opgetreden bodemdaling per oorzaak uit de metingen berekenen door onafhankelijke geodetisch specialisten met *state of the art* analysemethoden. Sluit hierbij invloed van het te controleren geomechanische model van de mijnbouwonderneming uit.
- Ontmoedig het met te rooskleurige bodemdalingvoorspellingen binnen halen van winningvergunningen, door het risico van foute voorspellingen eenduidig bij de delfstofwinner te leggen: overschrijding van de voorspelde bodemdaling betekent einde winvergunning.
- Voorkom uitbuiting van het kennismonopolie van de mijnbouwonderneming door omkering van de bewijslast bij een dispuut over schade.
- Waarborg een onafhankelijk controlemogelijkheid door tijdige openbaarheid van productievolumes en bovengrondse meetgegevens wettelijk te regelen.

Gebiedsproces noordwest Friesland

- Verschaf cijfermatige duidelijkheid omtrent de mate van bodemdaling waar plan en kostentoedeling vanuit gaan.
- Pas de maatvoering en kostentoedeling van het plan aan aan de resultaten van de laatste waterpasmetingen, d.w.z. tot en met september 2009.
- Verschaf duidelijkheid omtrent de consequenties van verdere bodemdaling tijdens en na uitvoering van het plan.
- Verschaf duidelijkheid over de verhoogde kans op scheurvorming in bouwwerken door peilaanpassingen.

GEciteerde werken

- Frisia Zout B.V. (2007). *Analysis of Levelling Survey September 2006 v3*.
- Geertsma, J. (1973). *A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogenous case*. Verhandelingen van het Koninklijk Nederlands geologisch mijnbouwkundig Genootschap, Deel 28, pp. 43-62.
- Grondmechanica Delft. (1988). *Constructie van 7 ondergrondse merken in de omgeving van Franeker ten behoeve van Petroland*.
- Houtenbos, A. (2008). *Bodemdalinganalyse NW-Friesland 1982-2006*.
www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Dossiers/Energie/pdf/NWFR06Sum.pdf.
- Houtenbos, A. (2004). *e-mail verkeer Oranjewoud/SodM/TNO okt 2004*.
- Houtenbos, A. (1982). Prediction, filtering and smoothing of offshore navigation data. *The Hydrographic Journal*, July 1982, pp. 5-16.
- Houtenbos, A. (2005). *Subsidence and gas production: an empirical relation*.
- Houtenbos, A. (2007). *Subsidence and gas production: an empirical relation*. Haren:
www.novatv.nl/uploaded/FILES/Bijlage%20Rapport%20Houtenbos.doc.
- Houtenbos, A. (2004). *Subsidence residuals modelling. SuRe users manual (Draft version)*.
- MinEZ. (2009). Brief aan Tweede Kamer betreffende Onderzoek bodemdaling Noordwest-Friesland. kenmerk ET/EM / 9207970, 17-11-2009.
- Norwegian Geotechnical Institute. (2007). *Uniaxial Compaction Coefficient of Chalk*.
- Odijk, D., & Kenselaar, F. (2003). *SuMo. User's manual of the SuMo software (revised version)*. Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology.
- Pollmann, H. (1984). *Markscheiderische Probleme bei der Bearbeitung von Ölkaverne*. Das Markscheidewesen 91, nr 2, pp. 375-382.
- Staatstoezicht op de Mijnen. (2003). Sakjen fan 'e Boaiem yn Fryslan. *Minisymposium Delfstofwinning in Fryslan 2004-2014*. Leeuwarden.
- Stuurgroep Franekeradeel - Harlingen. (2009). *Concept Ontwerp Inrichtingsplan Franekeradeel - Harlingen*.
[Rapport_gebiedsontwikkeling_Franekeradeel_en_Harlingen_klein.pdf](#).
- TCBB. (2009). *Van meting naar daling (Finale versie)*. Technische Commissie Bodembeweging. www.tcbb.nl.
- TCBB. (2008). *Van meting naar Daling (Groene versie)*. Technische Commissie Bodembeweging. www.tcbb.nl.
- TNO. (2003). *Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining. The Barradeel Case*. Richmond, Texas, USA: Solution Mining Research Institute.

TNO. (2009). *PS-InSAR-analyse van de bodemdaling in Noordwest-Friesland*.

Vermilion. (2007). *Subsidence Study - Harlingen Upper Cretaceous (Chalk)*. Vermilion Oil & Gas Netherlands BV.

Verruit, P. A. (2000). *Schade bij gelijkmatige daling*. *Geotechniek*, januari 2000, pp. 15-18.