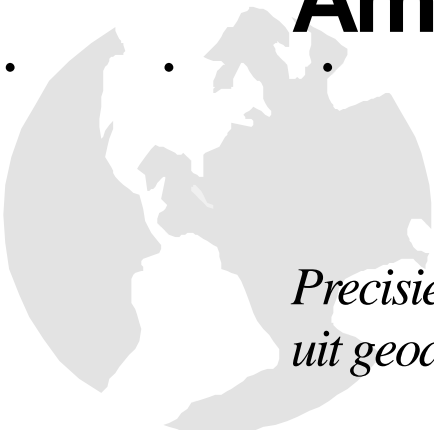




De Esstukken 18
9751 HB Haren (GN)
Tel: 050-5341532
E-mail: houtenbos@home.nl

ir. a.p.e.m. houtenbos

Bodemdalingsanalyse: Ameland 1986-2007



*Precisie en betrouwbaarheid
uit geodetische metingen*



⋮

Bodemdalingsanalyse: Ameland 1986-2007

*Precisie en betrouwbaarheid
uit geodetische metingen*

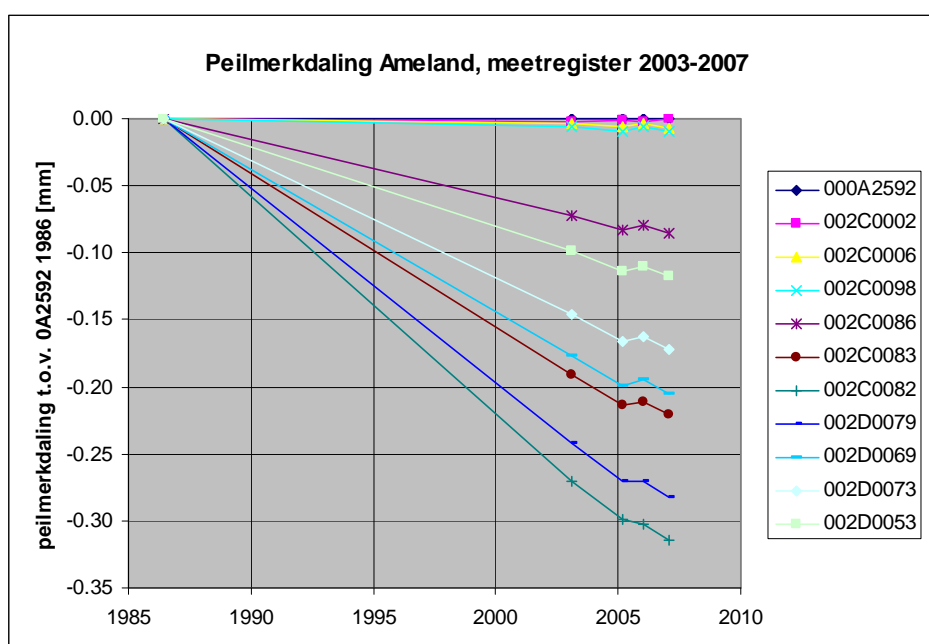
Inhoudsopgave

Inleiding	4
Analyse	5
Resultaten	6
Bodembeweging ongeacht oorzaak.....	Error! Bookmark not defined.
Bodembeweging t.g.v. gaswinning als functie van plaats	6
Verloop bodembeweging t.g.v. gaswinning in de tijd.....	7
Parameters schadepotentieel.....	8
Verticale daling.....	8
Dalingsvolume.....	8
Scheefstelling	8
Meting en prognose	8
Nog te verwachten daling	9
Conclusies en aanbevelingen	10
Bijlage 1: Van meting tot bodemdaling	1
Beschikbare metingen	1
Iteratieve vereffening	2
Onzekerheden	3
Statistische toetsing	5
Bodembeweging.....	8
Bijlage 2: Prognose.....	1
Bijlage 3: Referenties.....	1

Inleiding

In opdracht van de Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (NAM) zijn in de perioden januari/februari/maart in de jaren 2005, 2006 en 2007 nauwkeurigheidswaterpassingen verricht. De metingen zijn uitgevoerd om te kunnen vaststellen in welke mate er bodemdaling optreedt door mijnbouwactiviteiten van NAM op en rond Ameland.

Het betreffende meetregister [7] is op 14-08-2007 gepubliceerd op de NL Olie en Gasportaal website [3]. Dit register is opgemaakt conform de procedure [5] vervat in SodM brief 5052482 van 18-8-2005. Deze procedure maakt geen gebruik van de geleidelijkheid van de bodemdaling in ruimte en tijd. Hierdoor blijven onregelmatigheden in (voorgaande) metingen onontdekt en 'zwabbert' het netwerk rond het ene, absoluut stabiel veronderstelde, referentiepunt. Het meetregister Ameland 2005-2007 wekt daardoor onterecht de indruk, dat de bodem tot 2005 gestaag is gedaald, vervolgens tussen 2005 en 2006 is gestegen om ten slotte na 2006 weer met de oude snelheid verder te dalen:



Figuur 1: Gerapporteerde daling van geselecteerde peilmerken vanaf Nes tot de Hon

Het meetregister in de door SodM opgelegde vorm geeft weliswaar een globale indruk van de beweging van de peilmerken, maar blijft een precies en betrouwbaar antwoord op de belangrijkste vragen over de beweging van de bodem schuldig:

1. Hoeveel bedroeg de totale bodemdaling sinds het begin van de winning?
2. Wat was daarin het aandeel van de delfstofwinning?
3. Was de daling in overeenstemming met de prognose?
4. Moet de prognose worden bijgesteld?

In dit rapport worden de nieuwe metingen integraal met alle beschikbare voorgaande metingen geanalyseerd met als doel antwoord te geven op deze meest prangende vragen van belanghebbenden bij de gevolgen van de veroorzaakte bodemdaling.

Analyse

De gasvelden waarvan de bodemdaling wordt onderzocht zijn:

Veld	Activiteit	Operator	Start	Eind
Ameland Oost	winning	NAM	1986	2018
Ameland-Westgat	winning	NAM	1993	2018
Ameland Noord	nog geen winning	NAM	?	?

Tabel 1: Gasvelden

De analyse wordt begrensd door:

Parameter	Minimum	Maximum
RD X coördinaat	176000	200000
RD Y coördinaat	600000	617000
Tijd	01-06-1984	01-06-2007

Tabel 2: Onderzoeksbegrenzing

Binnen deze begrenzingen waren 32 relevante meetcampagnes (bijlage 1) beschikbaar met 1802 metingen tussen 701 peilmerken.

In de analyse wordt uitgegaan van een a priori dalingsaanname. Waar mogelijkheden tot wederzijdse bijstelling van geomechanische prognoses en geodetische analyses bestaan, verdienen prognoses van geomechanische oorsprong de voorkeur. Waar dat niet het geval is, moet genoeg worden genomen met uit analytische componenten samengestelde aannames.

De metingen en de a priori kennis van peilmerkstabiliteit en bodembeweging worden samen vereffend met in achtname van de onzekerheidsmarges in de verschillende types van gegevens. Dit levert vereffende waarden op voor zowel de metingen, de peilmerkstabiliteit en de bodembeweging. De correcties worden statistisch getoetst op meetfouten en onregelmatigheden in het peilmerk gedrag in ruimtelijke en temporale zin. De initiële aannames van de onzekerheden in de metingen, peilmerkstabiliteit en prognosekwaliteit worden ten slotte bijgesteld aan de hand van patronen in de berekende correcties. Het proces van vereffening, correctie van onregelmatigheden en bijstelling van de onzekerheidsmarges wordt herhaald tot dat metingen, a priori bodemdalingaanname en onzekerheidsmarges onderling consistent zijn.

Als in de berekende prognosecorrecties nog geomechanisch of analytisch modeleerbare patronen te ontdekken zijn, wordt de prognose bijgesteld en het hele proces opnieuw doorlopen.

In de Ameland berekening (bijlage 1) is begonnen met de aanname, dat er geen bodembeweging was opgetreden. In de correcties op deze aanname tekende zich één enkele kom af, die zich nagenoeg lineair in de tijd verdiepte. Deze kom is analytisch geparametriseerd en in de tweede iteratie als prognose gebruikt. Na deze iteratie werd een lichte knik in de bodemdalingssnelheid in 1993 waargenomen. Deze is in de laatste iteratie in de a priori bodemdalingaanname meegenomen. Los daarvan is de periode 1997-2007 zonder voorgaande metingen geanalyseerd ter controle op het mogelijk wegfilteren van een afname in de dalingsnelheid. Dat bleek niet het geval.

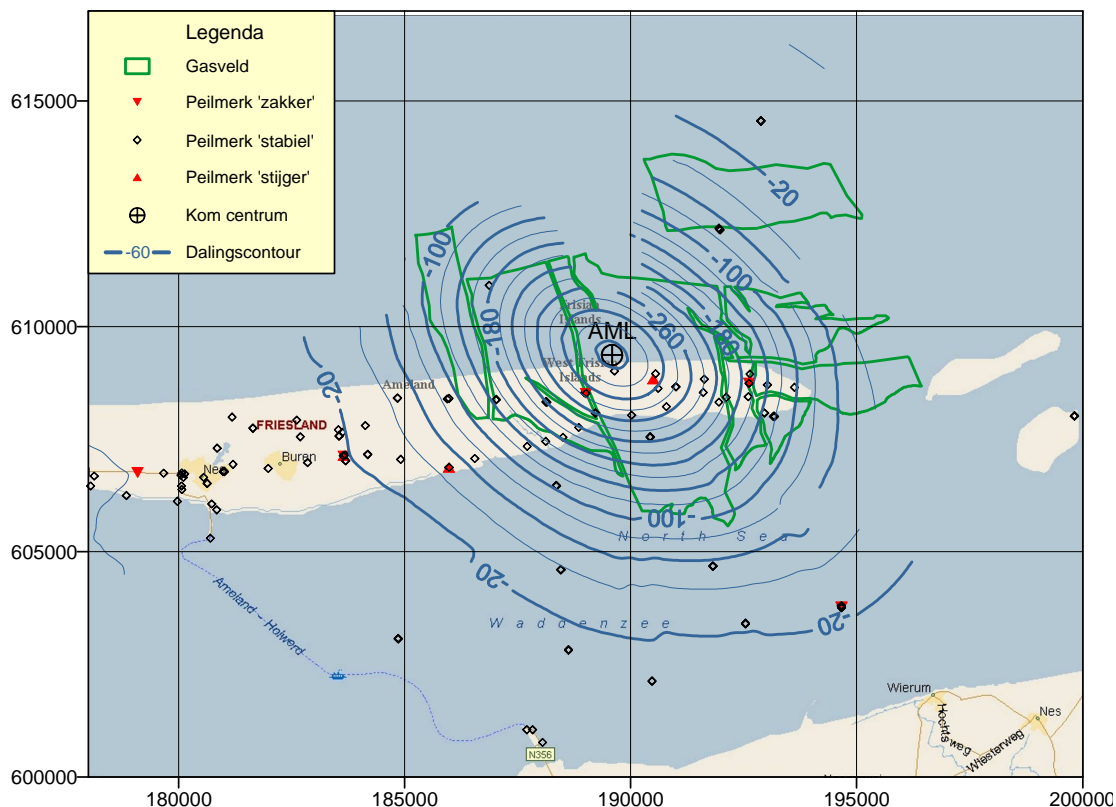
Resultaten

Totale bodembeweging

In het onderzochte gebied is geen significante bodembeweging geconstateerd, anders dan die gerelateerd aan gaswinning. De totale beweging verschilt daarom hooguit marginaal van de bodembeweging door gaswinning (bijlage 1, Figuur 2).

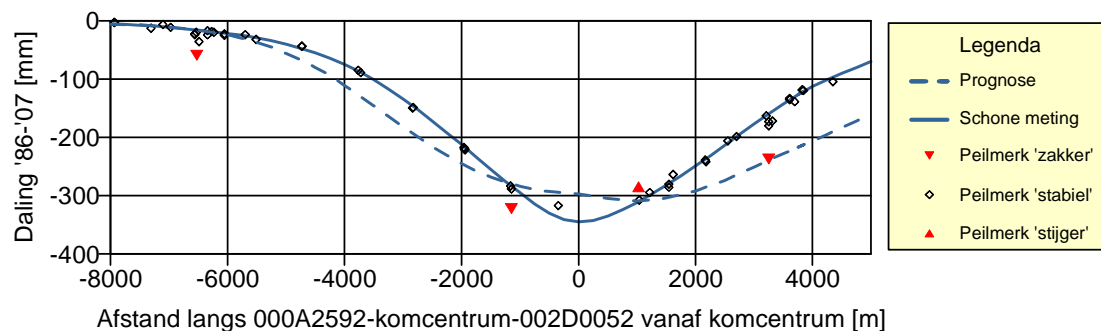
Bodembeweging t.g.v. gaswinning als functie van plaats

De aan gaswinning toegeschreven (bijlage 1) bodembeweging in mm over de periode 1986-2007 is d.m.v. contourlijnen in onderstaande kaart weergegeven:



Figuur 2: Bodemdaling 1986-2007 in mm t.g.v. gaswinning Ameland

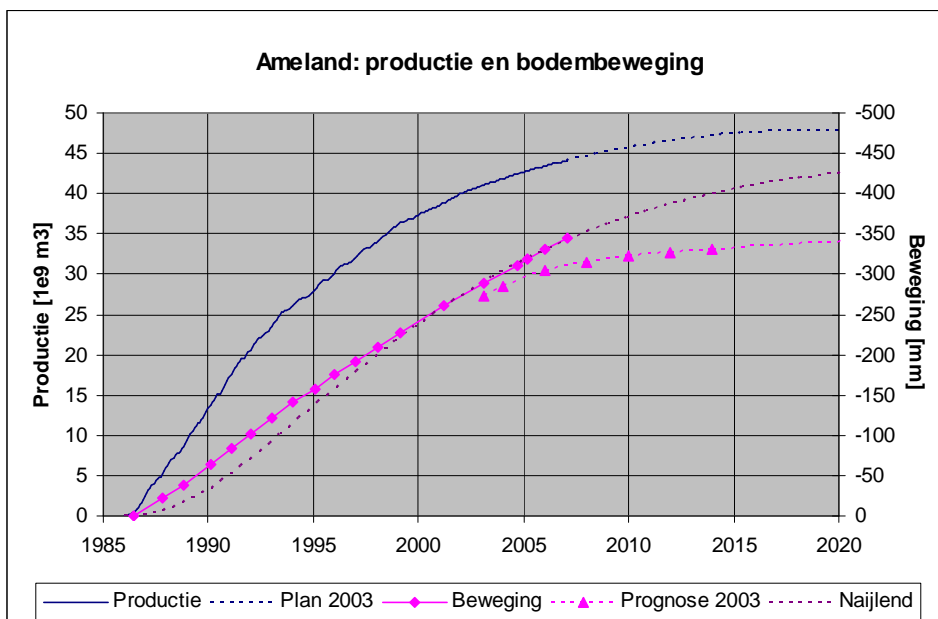
De beweging van bodem en peilmerken langs een profiel van het ondergrondse merk 000A2944 in Nes via het diepste punt van de kom (AML in figuur 2) naar peilmerk 002D0052 op de Hon is met de NAM prognose weergegeven in onderstaande figuur:



Figuur 3: Profiel bodem- en peilmerkbeweging tegen prognose uit 2003

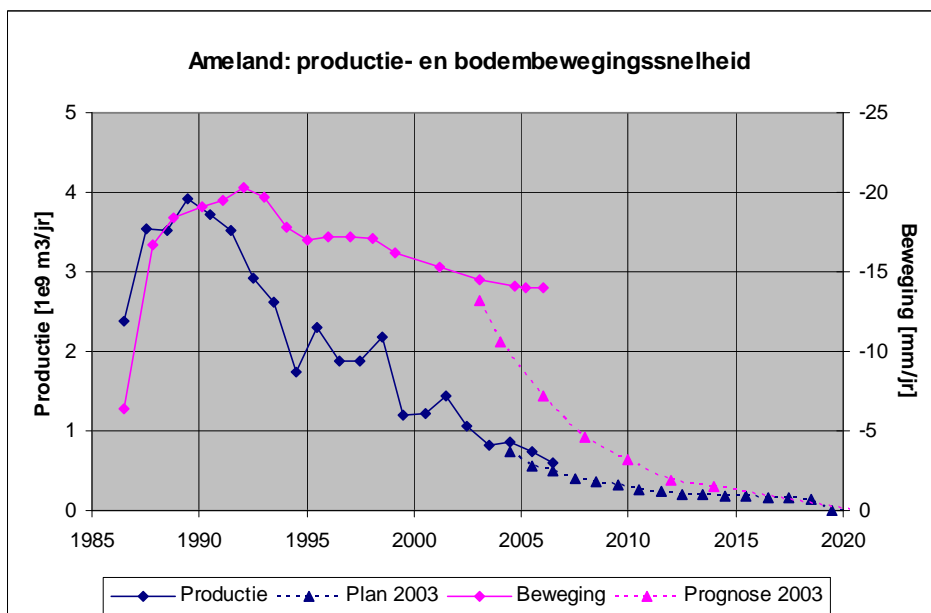
Verloop bodembeweging t.g.v. gaswinning in de tijd

De gemeten bodemdaling vertoont nog geen tekenen van afvlakking en is duidelijk niet proportioneel met de productie:



Figuur 4: Productie en bodembeweging in de tijd

Uitgedrukt in snelheden komt deze disproportionaliteit nog scherper naar voren:



Figuur 5: Productie- en bodembewegingssnelheid in de tijd

Parameters schadepotentieel

Verticale daling

De bodemdaling bedraagt maximaal 345 mm. Het diepste punt ligt ongeveer 200 m uit de kust, ten noorden van peilmerk 002C0082. De 20 mm contour ligt op ongeveer 8 km van het diepste punt in NW-ZO richting en op 5 km in NO-ZW richting.

Dalingsvolume

Het volume van de bodemdaling vanaf de start van de gaswinning tot de laatste meting (03-02-2007) wordt geschat op 14.0 miljoen m³.

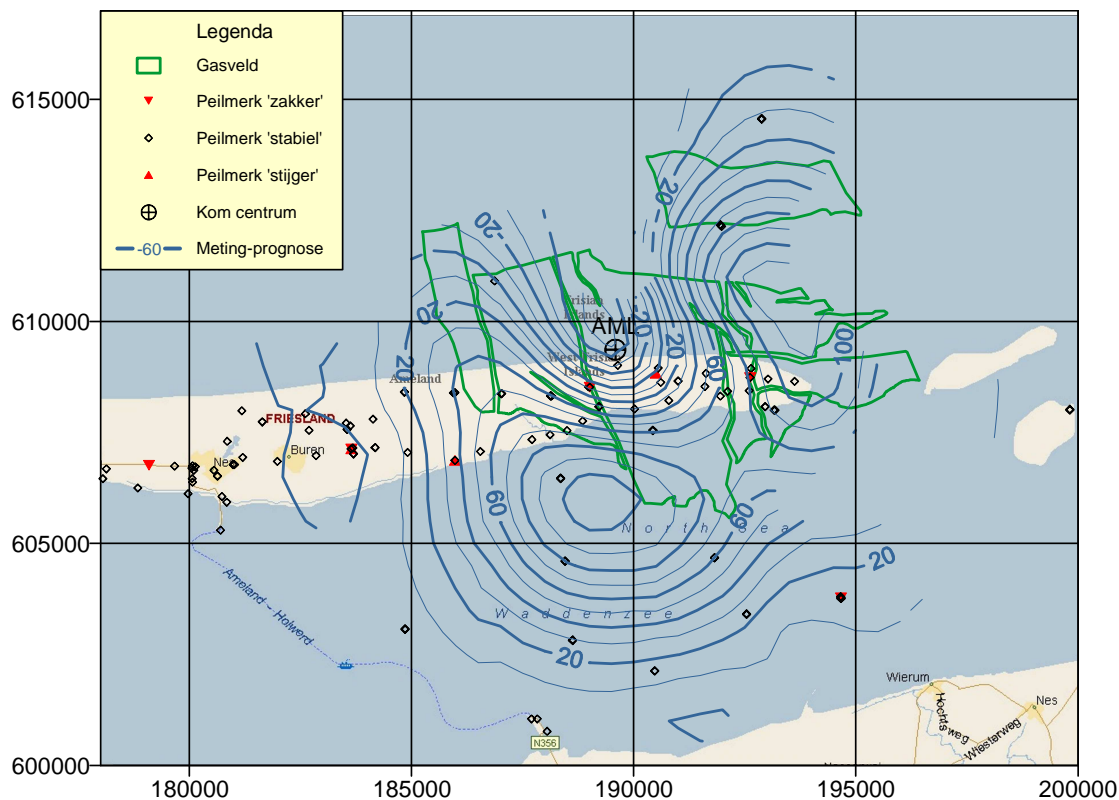
Scheefstelling

Aan de randen en in het hart van de bodemdalingschotel is de scheefstelling nul. Rond de 220 mm contour is de scheefstelling maximaal: ten noordoosten van het hart van de kom bereikt de scheefstelling over de periode 1986-2007 een waarde tussen 105 en 110 mm per km ten zuidwesten een waarde tussen 90 en 95 mm per km.

Meting en prognose

De uit de metingen afgeleide maximale daling bedraagt 11% meer dan uit de NAM prognose 2003 (bijlage 2) is af te leiden. Daarbij moet worden opgemerkt dat het diepste punt volgend uit de metingen 1 km meer naar het noordwesten ligt dan waar de 2003 prognose het voorspeld had.

Bodemdaling op de Waddenzee ten zuiden van Ameland is flink overschat. Weliswaar is de dichtheid van relevante metingen minimaal, maar de metingen, die er zijn (2 maal naar clusters 2C33/34/35, 2D88/89/90 en 2D59/60/61) wijzen op beduidend minder bodemdaling dan was voorspeld. Dit is ook het geval voor het veelvuldig gemeten cluster 2D52/53/54 op de zuidoost punt van de Hon.



Figuur 6: Gemeten min voorspelde bodemdaling in mm

De, sinds 2003 gemeten, maximale bodemdaling (56 mm) heeft de voorspelde daling (26 mm) met meer dan 100% overschreden (Figuur 4). De dalingssnelheid in het komcentrum is nog 14 mm per jaar, terwijl de NAM prognose 2003 een afname tot 6 mm per jaar impliceert (bijlage 2). Deze discrepantie zet forse vraagtekens bij het vermogen natuurlijke effecten voldoende betrouwbaar te voorspellen.

Een deel van de overschrijding kan mogelijk worden toegeschreven aan een 20% hogere productiesnelheid (Figuur 5) dan waar in het winningsplan 2003 [6] van was uitgegaan.

De gevonden verschillen tussen gemeten en voorspelde bodemdaling, t.w.:

1. de disproportionaliteit tussen productie en bodemdalingssnelheid
2. het uitblijven van een significante vertraging in de dalingssnelheid
3. het verschil van 1 km in de locatie van het hart van bodemdaling
4. de meer trechtervormige bodemdaling (achter blijvende flanken)

vormen in hun onderlinge samenhang wellicht de sleutel tot een geomechanische verklaring en een meer betrouwbare voorspellingsmethodiek.

Nog te verwachten daling

Vooralsnog blijkt de geomechanische kennis onvoldoende om de te verwachten bodemdaling met een onzekerheidsmarge kleiner dan 100% te voorspellen. Ook de 'gradual response' hypothese [10] met parameters, berekend door kleinste kwadraten aanpassing van de bodemdalingreactie aan de gehele meethistorie, voorspelt een significante vermindering van de dalingssnelheid en is daarmee niet in staat het gemeten gedrag over de hele monitoringsperiode te verklaren. Wel kan door extrapolatie van de relatie tussen de productie en de meest recent gemeten bodemdalinghistorie het toekomstig gedrag worden ingeschat. Parametrizing van de productie/dalingsrelatie over de periode 2001-2007 levert een dempingperiode van 5.74 jaar en een schaal van 9.13 mm per miljard m³ gaswinning op. Deze parameterwaarden leveren een beeld van de bodemdaling (Figuur 4), dat aanvankelijk afwijkt van de metingen, over de meest recente monitoringsperiode van 1999 tot 2007 nauw aansluit bij de metingen en in 2025 uitkomt op een bodemdaling van 434 mm. Daarna zal de daling asymptotisch naar een einddaling van 437 mm naderen.

Het significante verschil met de einddaling die in de NAM 2003 prognose [6] op 340 mm met een marge van 30 mm gesteld is, vraagt om aanpassing van de prognose.

Ook de forse discrepanties in de bodemdaling op de Waddenzee vragen om een reactie. Enerzijds kunnen de conclusies door toevoeging van extra metingen, zoals de GPS metingen die in het kader van de nulmeting Waddenzee zijn verricht, nader worden geverifieerd. Anderzijds kan nader geomechanisch onderzoek nieuw licht werpen op de ook elders waargenomen overschatting van de breedte van de bodemdalingsskom ten gevolge van gaswinning.



Conclusies en aanbevelingen

1. Meetregisters, opgesteld volgens de SodM richtlijn 5052482 van 18-8-2005, geven geen betrouwbaar beeld van de bodemdaling. Hierdoor wordt onnodig veel verwarring gesticht. De afleiding van de bodemdaling uit de metingen is onvoldoende robuust en de rapportage onvoldoende informatief.
2. Het verdient aanbeveling de bodemdaling door integrale vereffening en toetsing van alle metingen in de periode en het gebied van de delfstofwinning af te leiden.
3. Het verdient aanbeveling in de publieke rapportage minimaal op te nemen:
 - a. een contourkaart van de bodemdaling door delfstofwinning ten tijde van de laatste meting.
 - b. een grafiek met het verloop van de bodemdaling door delfstofwinning van het begin van de winning tot de laatste meting
 - c. een vergelijking van de gemeten met de voorspelde bodemdaling door delfstofwinning. Hierbij zouden zowel verschillen in het kaartbeeld als in het verloop in de tijd moeten worden toegelicht..
4. De bodemdaling door gaswinning bedroeg bij de laatste meting (februari 2007) 345 mm in het diepste punt. Dit is 35 mm meer dan uit de NAM prognose 2003 kan worden afgeleid. Het diepste punt werd gevonden op 1 km ten noordwesten van waar het werd voorspeld.
5. Elders en in het bijzonder in de Waddenzee is de bodemdaling door gaswinning uit de Ameland velden veelal fors minder dan voorspeld in de NAM prognose 2003.
6. De dalingsnelheid vertoont nog geen significante tekenen van afvlakking. De snelheid in het diepste punt was bij laatste meting 14 mm per jaar. Uit de NAM prognose 2003 kan een snelheid van 6 mm per jaar worden afgeleid.
7. Een verklaring van de disproportionaliteit van de snelheid van bodemdaling met de snelheid van productie ontbreekt vooralsnog. Extrapolatie van de relatie tussen productie en daling over de laatste 6 jaar leidt tot een schatting van 437 mm voor de einddaling na 2025.
8. Om de waargenomen zwakkere bodemdaling op de flanken van de kom nader te verifiëren wordt aanbevolen meer metingen naar meer meetpunten op het Wad te verrichten. Geomechanisch, theoretisch onderzoek naar de ook elders waargenomen overschatting van de breedte van bodemdalingkommen kan mogelijk leiden tot aanscherping van de prognosemethodiek op dit punt.
9. De prognose van de einddaling dient te worden bijgesteld.

Bijlage 1: Analyse

Beschikbare metingen

Voor de analyse zijn primair de hoogteverschilmetingen gebruikt zoals die in de HIS database van Rijkswaterstaat (RWS-AGI) zijn opgeslagen. Hieraan ontbreken deformatiemetingen, die niet dienstbaar zijn bevonden aan de primaire doelstelling van bijhouding van het NAP referentienetwerk. Bodemdalingmetingen i.v.m. de winning en opslag van delfstoffen na 2005 zijn - afgezien van de exacte meetdatum – beschikbaar bij het NL Olie en Gasportaal [3].

Voor deze analyse waren 32 meetcampagnes met 1802 metingen tussen 701 peilmerken beschikbaar:

Bron	Project	Datum	nWrn	Km	Opmerking
HIS	262W19	01-06-1984	36	16	
NAM	BLIJ8510	15-10-1985	1	1	
HIS	279H05	24-06-1986	178	148	HARLINGEN-LAUWERSOOG = AML8606 (289W01) + wadpunten + golfpalen
HIS	289W05	03-11-1987	87	64	Conc Ameland: AML8711 + golfpalen
HIS	279H08	01-09-1988	39	31	HYDRO WP MIDDEN-WAD PP1: 78 obs, copied from 289W05, disabled
HIS	279H09	01-09-1988	34	25	#289W16, only wadpunten
HIS	289W16	15-10-1988	52	38	Conc Ameland: AML8810. bijna zelfde tijd, #279H08
HIS	289W20	08-02-1990	56	38	Conc Ameland: AML9002
HIS	289W26	16-02-1991	55	38	Conc Ameland: AML9102
HIS	289W34	18-01-1992	54	37	Conc Ameland: AML9201
HIS	279W22	16-05-1992	45	39	Conc Ameland hydro: hydro additions only
HIS	332W02	14-01-1993	64	49	Conc Ameland: AML9301
HIS	344W01	23-10-1993	37	23	Hydro Midden-Wadden 1994 PP2: Single AML traverse. Disconnected Wadpnt clusters
HIS	289W37	12-01-1994	53	38	Conc Ameland: AML9401
HIS	342W04	23-01-1995	54	37	Conc Ameland: AML9501
HIS	350W34-PMS	03-10-1995	9	5	Meting Nes Dijk-Pier-Wadpnt
HIS	342W05	12-01-1996	53	37	Conc Ameland: AML9601
HIS	342W10	10-01-1997	50	37	Conc Ameland: AML9701
HIS	358W04-PMS	15-11-1997	9	3	Meting Nes Dijk-Pier-Wadpnt + los Wadpnt
HIS	371W00	18-11-1997	69	57	Wadpunten linked to Nes & Holwerd

Bron	Project	Datum	nWrn	Km	Opmerking
HIS	342W13	30-01-1998	57	38	Conc Ameland: AML9801
HIS	362W16	10-02-1999	54	39	AML9909
HIS	375W02	01-05-1999	15	4	Single AML section + disconnected wadpunt cluster
NAM	GPS	26-12-1999	20	98	Corrected for undulations and hence with sd 6 mm/sqrt(km)
HIS	373W31	30-03-2001	98	89	AML0103 incl. wadpunten + golfpalen
HIS	376W61-SEC	02-02-2003	56	38	AML0302
NAM	AMEL 0409	15-09-2004	12	5	AML0409 mini-meting incl wadpnt
NAM	AMEL 0503	13-03-2005	65	43	AML0503
NAM	NAM_WM2005	13-07-2005	52	14	Wierumerwad: Ivm aanslibbing
NAM	NAM_AM2006	17-01-2006	65	44	Ameland: AML0601
NAM	NAM_WZ2006	07-06-2006	22	0	Waddenzee: Disconnected clusters wadpunten
NLOG	AML0702	03-02-2007	74	50	AML0702: Enkele startdatums in 2006 gecorrigeerd tot eind datum in 2007.

Tabel 1: Gebruikte meetcampagnes

De metingen van het project AML0702 zijn overgenomen uit het gepubliceerde meetregister [1]. Enkele meetdatums in 2006 zijn gecorrigeerd naar 2007.

Het 1988 project 279H08 bleek 78 hoogteverschilmetingen met aanpassing van de meetdatum gekopieerd te hebben van het 1987 project 289W05. Deze metingen zijn gedeactiveerd.

Na verwijdering van punten die slecht eenmaal zijn aangemeten resteerden 1236 ruimtelijke hoogteverschilmetingen tussen 137 peilmerken voor vereffening. Hiermee is de bodemdaling gemiddeld eens in de 2.3 jaar in tijd en eens per 1726 meter in ruimtelijke zin bemonsterd. Bodemdalingverschijnselen, die zich manifesteren over perioden korter dan 4.6 jaar of over afstanden korter dan 3.5 km zullen daardoor mogelijk onontdekt blijven.

Alle metingen over de totale periode en het totale gebied van monitoren zijn met SuRe [8] simultaan vereffend en getoets op meetfouten en onregelmatigheden in het gedrag van de peilmerken.

Iteratieve vereffening

De procedure is in detail beschreven in Houtenbos et al, 2005 [9]. In de vereffening wordt uitgegaan van een a priori bodemdalingaansname. Waar mogelijkheden tot iteratieve wederzijdse bijstelling van geomechanische prognoses en geodetische analyses bestaan, verdienen prognoses van geomechanische oorsprong de voorkeur. Waar dat niet het geval is,

moet genoeg worden genomen met uit analytische componenten samengestelde prognoses.

De metingen en de a priori kennis van peilmerkstabiliteit en bodembeweging worden integraal vereffend met in achtname van de onzekerheidsmarges in de verschillende gegevenscategorieën. Dit levert vereffende waarden op voor zowel de metingen, als de peilmerkstabiliteit en de bodembeweging. De correcties worden statistisch getoetst op meetfouten en onregelmatigheden in ruimtelijke en temporale zin in het peilmerkgedrag. De initiële aannames van de onzekerheden in de metingen, peilmerkstabiliteit en prognosekwaliteit worden zonodig bijgesteld aan de hand van patronen in de berekende dalingscorrecties. Het proces van vereffening, verwerping van onregelmatigheden en bijstelling van onzekerheidsmarges wordt herhaald tot dat metingen, prognose en onzekerheidsmarges onderling consistent zijn.

Als in de berekende prognosecorrecties nog geomechanische of analytisch modeerbare patronen te ontdekken zijn, wordt de a priori bodembewegingsaannames bijgesteld en het hele proces opnieuw doorlopen.

In dit geval was wel een geomechanische prognose voor handen, maar deze week zo sterk af van de metingen, dat hij zonder toegang tot geomechanische bijstellingsmogelijkheden feitelijk niet effectief bruikbaar was. Er is daarom uitgegaan van de veronderstelling dat bodembeweging zich binnen ruim gestelde marges rond een nul trend afspeelde. In de correcties op deze aanname tekende zich één enkele kom af, die zich nagenoeg lineair in de tijd verdiepte. Deze kom is analytisch geparametriseerd en in de tweede iteratie als prognose gebruikt. Na deze iteratie werd een lichte knik in de bodemdalingssnelheid in 1993 waargenomen. Deze is in de laatste iteratie in de a priori bodembewegingsaannames opgenomen. Los daarvan is de periode 1997-2007 zonder voorgaande metingen geanalyseerd ter controle op mogelijk wegfilteren van een afnemende dalingsnelheid. Dat bleek niet het geval.

Onzekerheden

Koppeling van de, tussen peilmerken gemeten, hoogteverschillen met de gezochte bodemdaling gaat gepaard met 3 soorten onzekerheden: meet-, punt- en modelruis.

Meetruis refereert aan de onvermijdelijke kleine variatie in meetwaarden ten gevolge van het meetproces zelf. Met puntruus wordt de instabiliteit van de peilmerken bedoeld ten opzichte van de bodem, waarin zij zijn verankerd. Ruimtelijk en temporaal consistente afwijkingen van de aangenomen bodemdalingstrend (het model) worden aangeduid als modelruis. Deze onzekerheden zijn als volgt geparametriseerd:

Component	StDev [mm]	Tijds exponent	Corr. lengte [m]	Variantie effect op dalingsverschil
Meetruis	σ_{obs}	-	-	$2\sigma_{obs}^2 \sigma_{wp}^2 (l/1000)$
Puntruus	σ_{stb}	p	-	$2\sigma_{stb}^2 t^{2p}$
Modelruis	σ_{mod}	q	L	$2\sigma_{mod}^2 t^{2q} \left(1 - e^{-(l/L)^2}\right)$

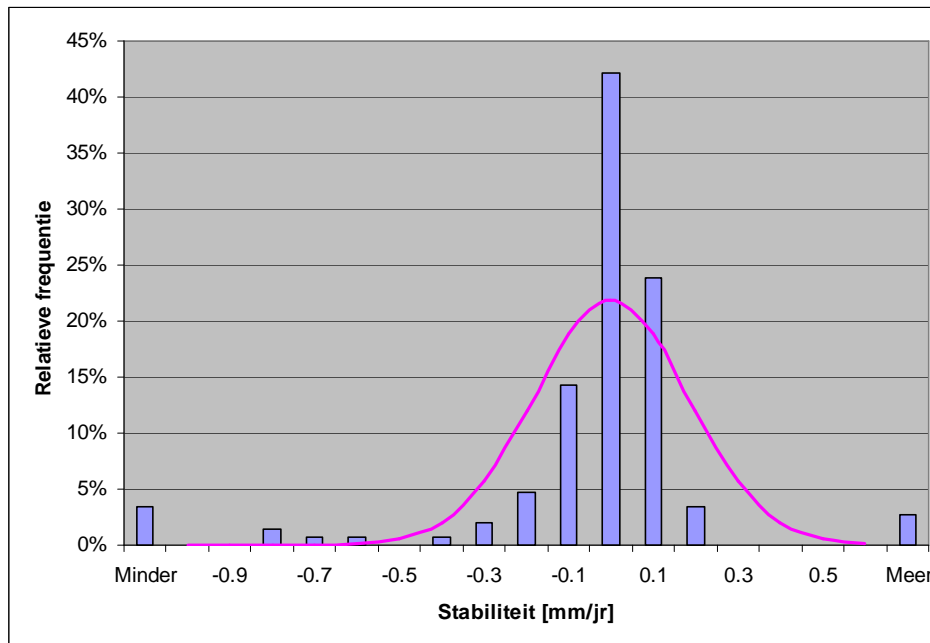
Tabel 2: Parametrisering ruiselementen

Deze onzekerheden zijn door middel van een variantiecomponentanalyse gekwantificeerd. De parameterwaarden in de 3 iteraties waren:

Run	SdObs (factor)	SdStb [mm]	ExpStb	SdMod [mm]	ExpMod	LenMod [m]
1	1.00	0.31	0.93	3.68	0.95	3300
2	1.00	0.27	0.92	1.63	0.60	1746
3	1.00	0.24	0.91	1.55	0.50	1963

Tabel 3: Onzekerheidsparameters

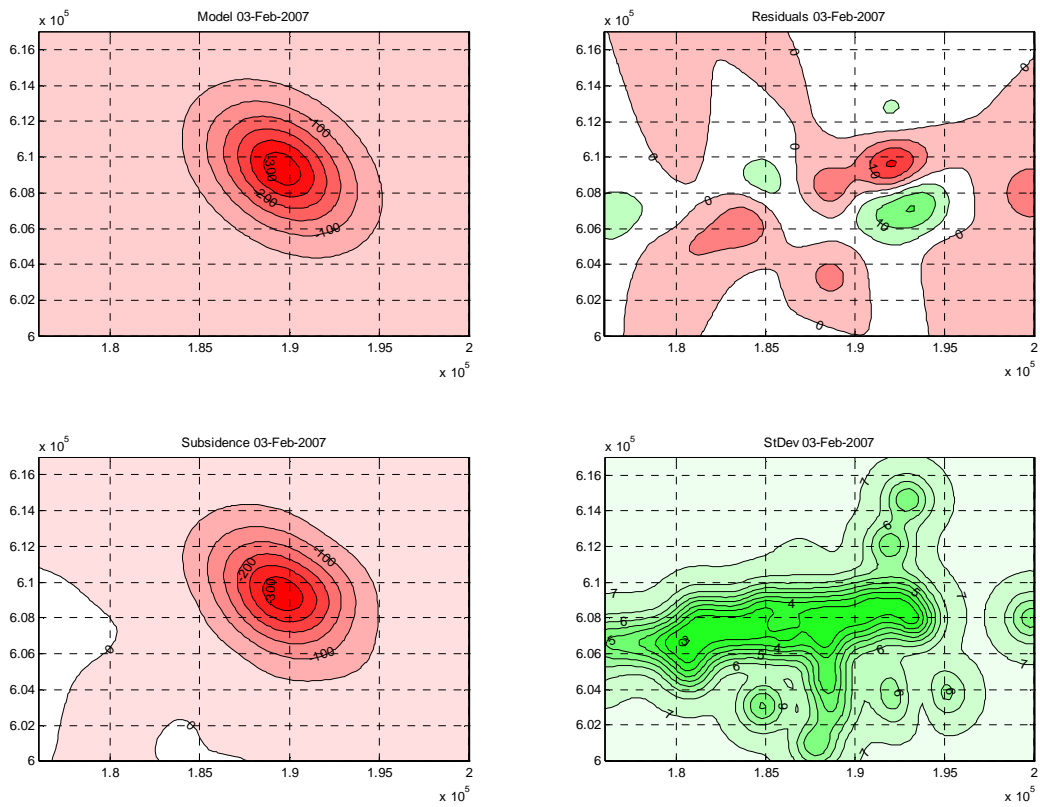
Hoogteverschilmetingen staan in de database geregistreerd met bijbehorende, op decennia lange ervaring geschoeide, meetprecisie. De meetruisparameter is daarom een schaalfactor met waarde 1, die feitelijk nooit aanpassing behoeft. Het effect van puntruïis, ook wel peilmerkinstabiliteit genoemd, op het verschil in bodemdaling over de gemiddelde meetafstand van 750 m over 5 jaar is doorgaans veel groter dan van de meetruis. Dat is ook hier nog het geval, terwijl die voor Nederlandse begrippen toch als goed mag worden aangemerkt: 91% van de peilmerken valt in de hoogste stabiliteitsklasse (+/- 0.5 mm/jaar).



Figuur 1: : Histogram en afgeleide kansdichtheidsfunctie relatieve peilmerkstabiliteit

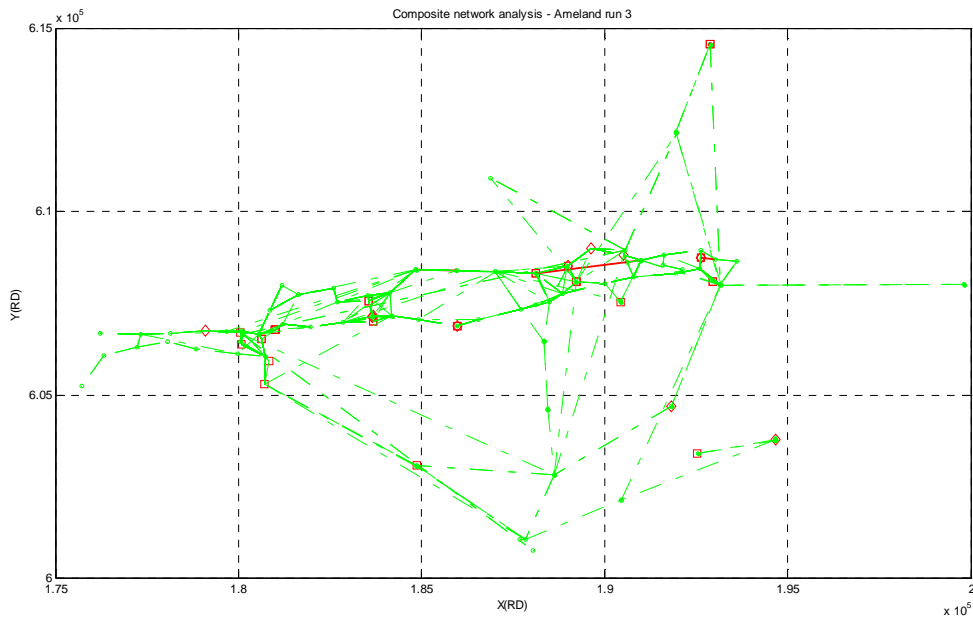
De initiële aanname, dat de bodembeweging rond een nul trend schommelt, bleek alleen houdbaar binnen flinke marges voor de modelruis. De aanname in de 2^e iteratie van één enkele kom, die zich lineair in tijd verdiept, en van de lichte knik in de bodemdalingssnelheid in 1993 in de 3^e iteratie leverde een bodemdalingstrend, die binnen veel kleinere modelruismarges bij de metingen past.

De correcties op de a priori aangenomen bodemdalingstrend en de modelruis in de 3^e iteratie zijn als functie van de plaats in Figuur 2 respectievelijk rechtsboven en rechtsonder gekarteerd:



Figuur 2: A priori trend, correctie, totale beweging en modelruis in de bodemdaling op 03-02-2007

Toetsing



Figuur 3: Overzicht van de gedetecteerde onregelmatigheden in het samengestelde netwerk

De geleidelijkheid van bodemdaling ten gevolge van diepe delfstofwinning in ruimte en tijd maakt bij korte intervallen tussen opeenvolgende herhalingsmetingen een bijzonder

•
•
•
•
•
•
•
•
•
•

scherpe toetsing op meetfouten en onregelmatig peilmerkgedrag mogelijk. Het is deze scherpte van toetsing, die de betrouwbaarheid van de berekende bodemdaling bepaalt.

De metingen en de daardoor geïmpliceerde relatieve peilmerkbewegingen worden getoetst op onregelmatigheden tegen de meet-, punt- en modelruismarges die hierboven zijn gekwantificeerd. Figuur 3 geeft een overzicht van de gevonden onregelmatigheden. Rode lijnen staan voor verworpen hoogteverschilmetingen, rode vierkantjes voor onregelmatigheden in het gedrag van een individuele peilmerken, zoals peilmerkverstoringen, puntverwisselingen en puntaanmeetfouten, rode diamantjes voor peilmerken die een sterk van nabije peilmerken afwijkende bewegingssnelheid vertonen. Deze laatste categorie peilmerken wordt ook wel instabiel genoemd.

Onregelmatigheden van voorbijgaande aard in de beweging van individuele peilmerken, ook wel peilmerkmisidentificaties genoemd, zijn onschadelijk gemaakt door het peilmerk op het tijdstip van de onregelmatig in de vereffening een andere naam te geven. Hierdoor behoudt het netwerk van metingen haar samenhang. Bij een blijvende sprong in de hoogte van een individueel peilmerk, kortweg peilmerkverstoring genoemd, krijgt het peilmerk vóór de verstoring een andere naam, ook resulterend in behoud van netwerksamenhang. Bij een ruimtelijk inconsistente bewegingssnelheid van een individueel peilmerk wordt het gewicht van deze informatie in de vereffening zodanig teruggebracht dat het van beeldbepalend beeldvolgend wordt. Alleen bij meetfouten wordt de betreffende metingen echt verworpen met een verzwakking van de netwerksamenhang als gevolg.

Extreem hoge toetsquotiënten markeren doorgaans onmiskenbare fouten van administratieve aard. In het 1984 project 262W19 zijn de namen XXX9208200, XXX9408200, XXX9608200, XXX9808200 tweemaal gebruikt voor verschillende punten. Voor het eerste en het tweede gebruik zijn de punten omgenummerd naar de vorm XXAnnnnnnn respectievelijk XXBnnnnnn. In het 2001 project 373W31 is het peilmerk 002C0102 een duidelijk ander, 25 cm lager gelegen, punt dan in alle andere projecten. In het betreffende project heeft het punt een andere naam gekregen.

Na correctie van bovengenoemde administratieve fouten werden er in totaal 66 (soms tamelijk kleine) onregelmatigheden geconstateerd in de 1236 gereduceerde hoogteverschilmetingen tussen de peilmerken: 5.3%. In 41 (62%) van deze gevallen betrof het een peilmerkmisidentificatie, in 10 gevallen (15%) een peilmerkverstoring, in 9 gevallen (14%) een abnormale peilmerksnelheid en in 6 gevallen (9%) een meetfout. In slechts 0.5% van de metingen is dus achteraf alsnog een 'meetfout' geconstateerd. Waar een onregelmatigheid werd gedetecteerd zonder voldoende gegevens om ook het soort fout vast te kunnen stellen, is deze aangemerkt en gecorrigeerd als de fout met het minste verlies aan informatie, doorgaans een abnormale peilmerksnelheid.

Ter verificatie zijn de gedetecteerde meetfouten, misidentificaties en peilmerkverstoringen groter dan 5 mm en peilmerksnelheidsafwijkingen groter dan 1 mm per jaar getraceerd in de database van metingen met inbegrip van de metingen die in eerste instantie buiten beschouwing zijn gebleven.

De verificatie resultaten betreffende meetfouten en onregelmatigheden in individuele peilmerken zijn weergegeven in Tabel 4 en Tabel 5 respectievelijk.

Van	Naar	Datum	Opmerking
002C0041	002C0108	03-11-87	2C41 in '77, '84, '87 aangemeten. 2C108 in '87 en '88. 2C41 in '87 vervangen door 2C108. '87 meting was 180 mm te hoog.
000G0096	000G0095	24-06-86	1987 en 1988 projecten hebben identieke metingen tussen Noordzee golfpalen 0G94-95-96-97. Feitelijk slechts 2x gemeten met 5 mm verschil. '86 of '87/'88 waarde juist?
002C0018	002C0039	01-06-84	17 mm fout in '84 meting, maar '84 klopt met '77 meting. Oorzaak ontraceerbaar in hulppuntnrijke '84 meting
002C0102	002D0076	13-10-93	7 mm fout in '93 meting gedetecteerd. Onregelmatigheid van 2C102 sluit verdere determinatie uit.
002C0041	002C0108	03-11-87	2C41 in '77, '84, '87 aangemeten. 2C108 in '87 en '88. 2C41 in '87 vervangen door 2C108. '87 meting was 180 mm te hoog.

Tabel 4: Verificatie onregelmatigheden hoogteverschilmetingen

Peilmerk	Opmerking
001H0017	Daalde '77-'87 3.5 mm/jr, '87-'97 1.4 mm/jr sneller dan omgeving
002C0016	In '77, '84, '86, '88 aangemeten. '77 klopt met '84, '86 met '88. '77/'84 21 mm hoger dan '86/'88. Inmiddels vervallen.
002C0065	In '86 48 mm lager dan '92, '93, '98, '01 en '06 trend
002C0082	Daalde gedurende '86-'07 0.9 mm/jr minder snel dan omgeving.
002C0102	Sterk afwijkende hoogte in 2001. Lange historie van onregelmatigheden, inmiddels vervallen
002C0106	In '86 26 mm, in '88 10 mm hoger dan '87-'97 trend 2C106-2C112 '92-'96 heeft 7 mm sprong van '94 naar '95.
002C0111	In '94, '96 7 mm lager, in '95 4 mm hoger '90-'97 trend
002C0112	Hoogte voor, in en na 1999 sterk verschillend. Vreemd gedrag vanaf 2001. In 2007 onbetrouwbaar verklaard
002C0121	Gedrag 2C112-2C121 is onregelmatig vnl door 2C112. 10 mm onregelmatigheid '01-'03 aan 2C112 of aan 2C121 te wijten?
002C0125	'98-'99 2C23-2C125 trend 9 mm lager en 14 mm/jr hoger dan '01-'07 trend
002D0049	In '84 44 mm hoger dan in '04 en '06
002D0063	Wadpunt, slechts 2x aangemeten, '86 ongelijk '05, 2D63/64/65 in 2005 vervangen door 2D102/103/104
002D0066	Wadpunt, in '86 41 mm hoger dan '05-'06 trend
002D0078	Hoogte voor, in en na 2001 sterk verschillend. In 2005 onbetrouwbaar verklaard
002D0079	Daalde gedurende '86-'07 1.1 mm/jr minder snel dan omgeving.

Tabel 5: Validatie puntonregelmatigheden

•
•
•
•
•
•
•
•

In het Ameland monitoring rapport 2005 [2] wordt berekend dat het peilmerk 002D0079 2.1 mm per jaar minder snel daalt dan de omgeving. Dit gedrag wordt toegeschreven aan opwaartse krachten, die het grondwater zou uitoefenen op het gebouw waarin 002D0079 verankerd zit. Deze krachten nemen toe naarmate het gebouw dieper in het grondwater zakt. Deze SuRe analyse vindt het hart van de bodemdalingsskom 900 m ten noordwesten van waar de NAM prognose 2003 [1] het voorspeld. Ten opzichte van het in deze analyse berekende bodemdalingpatroon blijft 002D0079 slechts 1.1 mm per jaar achter en is het fenomeen bovendien niet beperkt tot 002D0079. Ook 002C0082 blijft 0.9 mm per jaar achter. Door bijplaatsing van 2 peilmerken aan weerszijde maar los van 002D0079 langs de gradiënt van de bodemdaling kan eenvoudig worden geverifieerd welk van beide zienswijzen de juiste is.

De geleidelijkheid van de bodemdaling in ruimte en tijd wordt in de hier toegepaste integrale 4D vereffening en toetsing optimaal gebruikt voor de opsporing en ondervanging van onregelmatigheden. In de vereffening en toetsing per meetcampagne toetsing, als voorgeschreven in de procedure [5] bedoeld in SodM brief 5052482 van 18-8-2005, zijn vooral onregelmatigheden in tijd niet of nauwelijks te ontdekken. Deze fouten zullen de integriteit en betrouwbaarheid van de gevonden bodemdaling ongemerkt aantasten.

Bodembeweging

Voor de a priori veronderstelde bodemdaling zijn analytische modellen gebruikt van de vorm:

$$z(t) = z_{\max}(t) \cdot e^{-\frac{1}{2}r^{\delta}}$$

$$\text{met } r^2 = \left(\left((x - x_0) \sin \alpha + (y - y_0) \cos \alpha \right) / a \right)^2 \dots$$

$$\dots + \left(\left((x - x_0) \cos \alpha - (y - y_0) \sin \alpha \right) / b \right)^2$$

waarin x_0, y_0 de coördinaten van het komcentrum, a, b de maximum en minimum komstraal, α de kaarthoek van a , en δ de komvormparameter representeren.

Parameter	Run 1	Run 2	Run 3 '84-'93	Run 3 '93-'07
x centrum	-	189531	189768	189584
y centrum	-	609364	609317	609365
straal maximum	-	2740	2743	2623
straal minimum	-	1693	1894	1801
kaarthoek max	-	129	132	126
delta (vorm)	-	1.48	1.65	1.58
daling 01-06-1984	0.00	0.00	0.00	-
daling 01-06-1986	-	0.00	0.00	-
daling 14-01-1993	-	-	-122.66	-122.66
daling 01-06-2007	0.00	-342.71	-	-347.53

Tabel 6: A priori dalingsmodelparameters

De kom, afgeleid uit run 2, stond model voor de a priori aanname van run 3. Vorm, grootte en plaats van de kom afgeleid uit run 2 waren niet helemaal constant in de tijd zonder dat een eenduidige trend in de ontwikkeling viel te ontdekken.

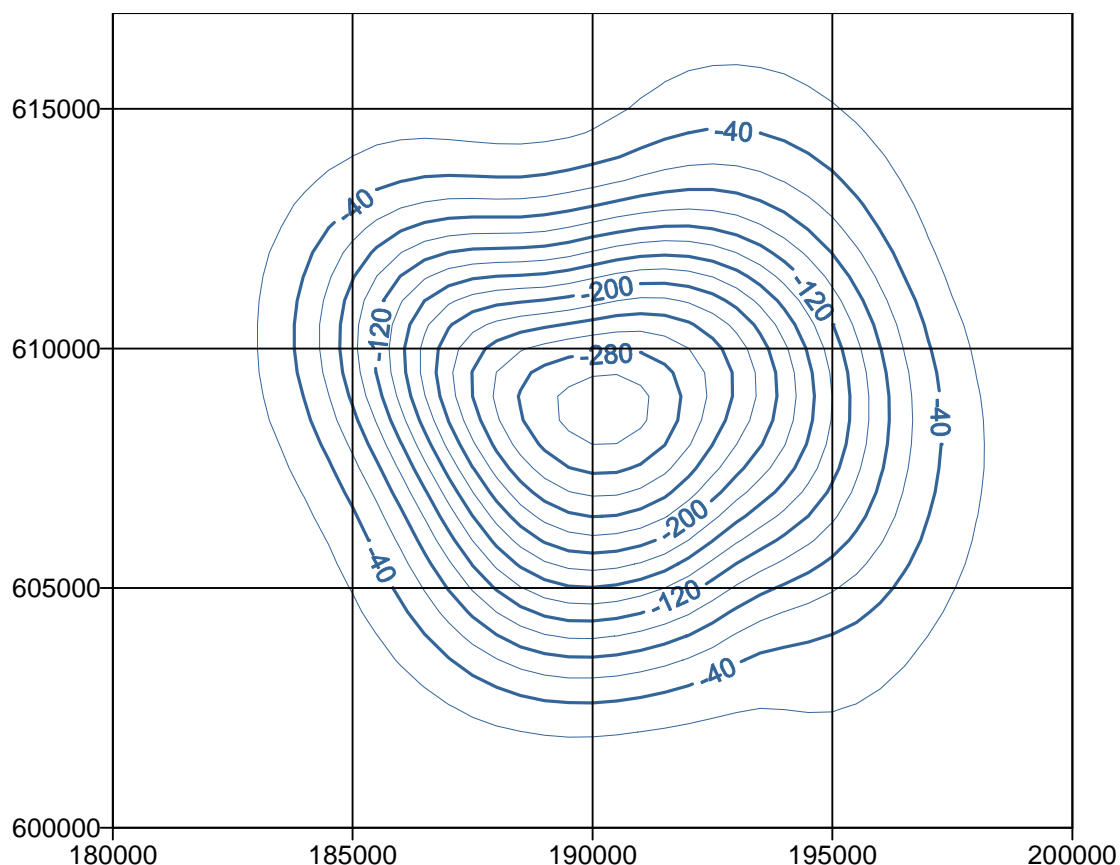
De vereffening resulteert in een correctie van het a priori dalingsmodel. De som van het a priori bodemdalingmodel en de correctie daarop is de totale bodembeweging. De correctie bedraagt maximaal 15 mm (5%, Figuur 2): een indicatie dat het a priori dalingsmodel nauw bij de metingen aansluit.

Het a priori kommodel is qua plaats, vorm en ontwikkeling in de tijd duidelijk gerelateerd aan de gaswinning uit de Ameland velden. Voor de restbeweging is de relatie met de gaswinning onduidelijk. Deze restbeweging is daarom in de verhouding ongecorrigeerde daling per oorzaak tot totale gecorrigeerde daling toegerekend aan gespecificeerde en overige oorzaken.

De hier berekende maximale daling is nagenoeg gelijk aan de voor 2007 in het meetregister [1] gerapporteerde daling van 002D0079 na correctie voor de in het Ameland monitoring rapport 2005 [2] afgeleide snelheidsafwijking, $282 + 20.5 * 2.1 = 325$ mm, zij het dat deze op een andere plaats wordt gevonden.

Bijlage 2: Prognose

Artikel 24 lid 1.n van het mijnbouwbesluit schrijft voor, dat het winningsplan een overzicht met het verloop van de verwachte mate van bodemdaling in de tijd bevat. Dit overzicht van het verloop in de tijd ontbreekt in het winningsplan Ameland van 2003. In deze lacune is voorzien via figuur 2.4 van het Ameland monitoringrapport 2005 [2]. Met behulp daarvan is de in het winningsplan gespecificeerde prognose voor 2010 terugschaald tot de laatste meetdatum.



Figuur 1: Prognose 2007, afgeleid uit het winningsplan Ameland 2003

Het is opmerkelijk dat het in bijlage 1 gevonden analytische model vele malen beter bij de metingen past dan dit geomechanische prognosemodel na optimale schaling aan de metingen.

Voor bestudering van de relatie tussen gaswinning en bodemdaling zijn productie gegevens beschikbaar in het Ameland monitoring rapport 2000 [1] en bij het NL Olie en Gasportaal [3].

Bijlage 3: Referenties

1. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2000: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. Evaluatie na 13 jaar gaswinning
2. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. Evaluatie na 18 jaar gaswinning
3. Ministerie van Economische Zaken:
NL Olie en Gasportaal.
www.nlog.nl
4. Ministerie van Verkeer en Waterstaat:
NAPInfo.
<http://www.rdnap.nl/napinfo/naplogin.php>
5. Staatstoezicht op de Mijnen:
ProceduresWPsArt31Mbb.doc.
<http://dinolks01.nitg.tno.nl/dinoLks/nlog/Downloads/Meetregisters/ProceduresWPsArt31Mbb.doc>
6. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV:
Winningsplan Ameland 2003
http://dinolks01.nitg.tno.nl/wipla/Public_Winningsplan_Ameland.pdf
7. Nederlandse Aardolie Maatschappij BV, 2007:
Meetregister Ameland 2005, 2006, en 2007.
<http://dinolks01.nitg.tno.nl/dinoLks/nlog/Downloads/Meetregister%20Ameland%2005,%202006%20en%202007.pdf>
8. Houtenbos, A.P.E.M. 2005, Subsidence Residual Modelling, SuRe User Manual
9. Houtenbos, A., Hounjet, M.W.A. & Barends F.B.J., 2005:
Subsidence from geodetic measurements in the Ravenna area. Proceedings SISOLS 2005, Millpress Rotterdam, Special Volume, p:79-99.
10. Houtenbos, Adriaan P.E.M. 2007,
Subsidence and gas production: an empirical relation.

•
•
•
•
•
•
•
•
•
•



• • • • • • • • • •

