



2 Bodemdaling

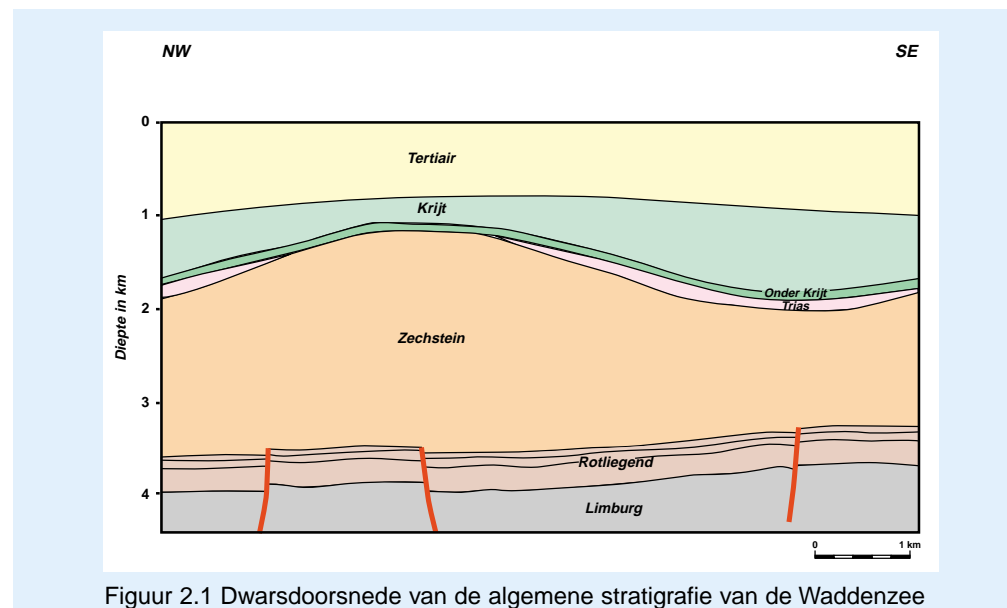
2.1 Voorspellingsmethode

Bodemdaling in Nederland is een veel voorkomend natuurlijk proces dat al gedurende lange tijd optreedt. Te denken valt hierbij aan natuurlijke inklinking en de isostatische bewegingen, waarbij Nederland als geheel daalt en Scandinavië stijgt. Het gaat hier om enkele millimeters per jaar voor geheel Nederland tot lokaal ca. 20 mm/jaar in de IJsselmeerpolders.

Door menselijke activiteiten, zoals ontwatering, winning van grondwater, ontginning van vaste delfstoffen (kolen, zout en zand) en gaswinning, treedt ook bodemdaling op. Bij de winning van de vaste delfstoffen (zout en kolen) wordt materiaal uit de ondergrond gehaald, waardoor in de betreffende lagen holle ruimten ontstaan. Wanneer deze ruimten instorten kan het aardoppervlak ter plaatse aanzienlijk dalen. Bij de winning van gas ligt dat duidelijk anders. Er wordt geen gesteentemateriaal weggehaald. De lagen waarin gas voorkomt blijven intact; ze worden slechts door de drukdaling in de laag door het gewicht van de bovenliggende lagen enigszins in elkaar gedrukt.

Het aardgas wordt in Noord-Nederland hoofdzakelijk aangetroffen in zandsteenlagen van het Rotliegend op zo'n 3000 m diepte of van het Onder Krijt (Vlielandformatie) op zo'n kleine 2000 m diepte (figuur 1). Deze gesteenten bestaan uit aan elkaar gekitte zandkorrels met plaatselijk klei waartussen zich kleine ruimtes, de poriën, bevinden. In deze poriën bevindt zich het gas (en water) onder hoge druk. Het reservoir bestaat uit min of meer afgesloten blokken waarbinnen de poriën van de gesteentelaag met elkaar in verbinding staan. De blokken zijn gescheiden door breuken. In sommige gevallen zijn deze breuken doorlatend, zodat ook de druk in de aangrenzende blokken kan meedalen. Het reservoir is afgedekt door ondoorlatende lagen als zout en kleisteen, die ervoor zorgen dat het gas niet naar boven kan ontsnappen.

De winning van aardgas veroorzaakt een vermindering van de poriëndruk in de gasvoerende gesteentelaag. Hierdoor moet het deel van het gewicht van de bovenliggende sedimenten, dat eerst door de gasdruk werd gedragen, nu ook via



de korrelspanning in de zandsteenlaag naar de diepere ondergrond worden overgebracht. Omdat de zandsteen onder de hoge druk al optimaal is gepakt, zal de hogere korrelspanning (vrijwel) alleen nog kunnen leiden tot elastische vervorming van dit gesteente. De zandsteenlaag zal zich hierdoor als een stijve veer gedragen, waarbij de veerstijfheid wordt bepaald door de elasticiteit van het gesteente en de dikte van de laag. De stijfheid neemt toe met het afnemen van de dikte van de laag. De lokale samendrukking of compactie van de zandsteenlaag kan bij ongewijzigde bovenbelasting worden berekend met de volgende formule, als de afname van de gasdruk, de laagdikte en de elasticiteitscoëfficiënt van

$$D_h = cm \cdot h \cdot D_p$$

waarin:

- D_h : verticale samendrukking of compactie van het reservoir (m)
- cm : compactiecoëfficiënt (= 0,5 à 0,8 10^{-5} bar $^{-1}$ voor Groningen)
- h : laagdikte gasvoerend gesteente (m)
- D_p : afname gasdruk (bar)



de zandsteenlaag bekend zijn:

Een complicerende factor is dat een deel van het gewicht van de bovenliggende sedimenten via schuifspanningen zijdelings wordt overgedragen naar de aangrenzende ondergrond. Hierdoor wordt de gasvoerende laag iets ontlast en treedt de bodemdaling aan het oppervlak over een groter gebied op en zal gemiddeld ook geringer zijn. Bij een groot gasveld zijn deze randverschijnselen relatief gering en zal de bodemdaling in het midden van het gasveld vrijwel overeenkomen met de compactie volgens bovenstaande formule. Bij een klein gasveld op grote diepte zal de bodemdaling door zijdelingse krachtoverdracht slechts een fractie van de theoretische compactie zijn, omdat lokaal het verlies aan draagkracht door de gasdrukvermindering niet volledig door de korrelspanning in het gesteente hoeft te worden overgenomen.

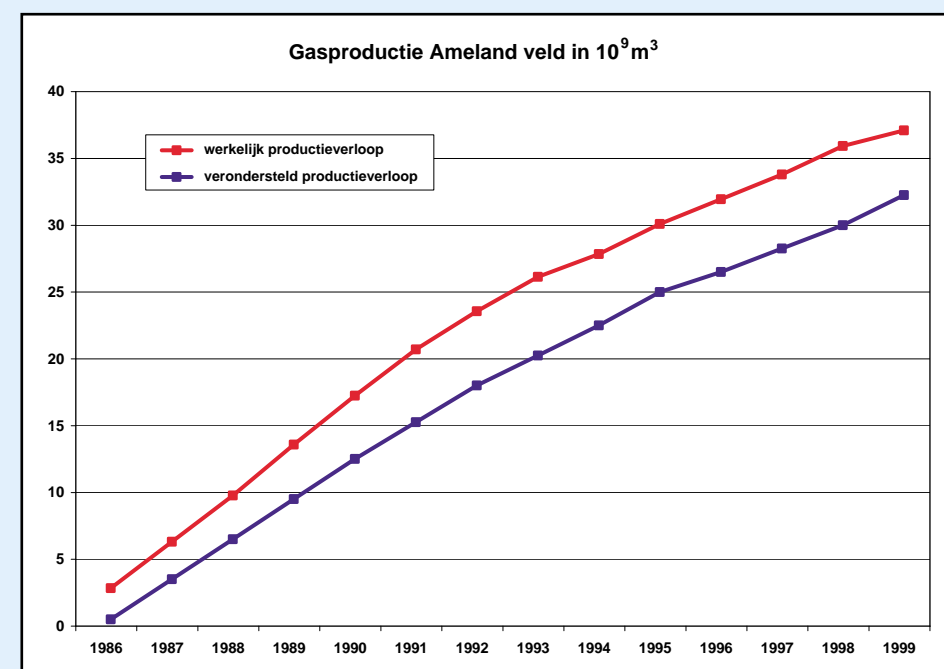
Een ander aspect is het verloop van de bodemdaling in de tijd. Hierbij speelt ook mee of er plastische vervorming optreedt in de lagen boven de gasvoerende laag, waardoor de verdeling van de bovenbelasting op de gasvoerende laag in de tijd kan veranderen en hoe groot de gasdoorlatendheid van het gesteente is, op hoeveel plaatsen gas wordt onttrokken en hoeveel. Bij de NAM wordt reeds vele jaren research verricht en veldonderzoek gedaan om tot een zo nauwkeurig mogelijke voorspelling van de bodemdaling door gaswinning te komen (NAM, 1990a). Enerzijds is de techniek van het seismologisch onderzoek sterk verbeterd, waardoor de afmetingen en locaties van gasvoerende lagen steeds beter kunnen worden bepaald (drie-dimensionale seismiek), anderzijds wordt voortdurend steeds meer kennis verzameld van de gesteente-eigenschappen, waardoor de betrouwbaarheid van de mathematische voorspellingsmodellen sinds 1991 belangrijk is toegenomen.

2.2 Voorspelde bodemdaling

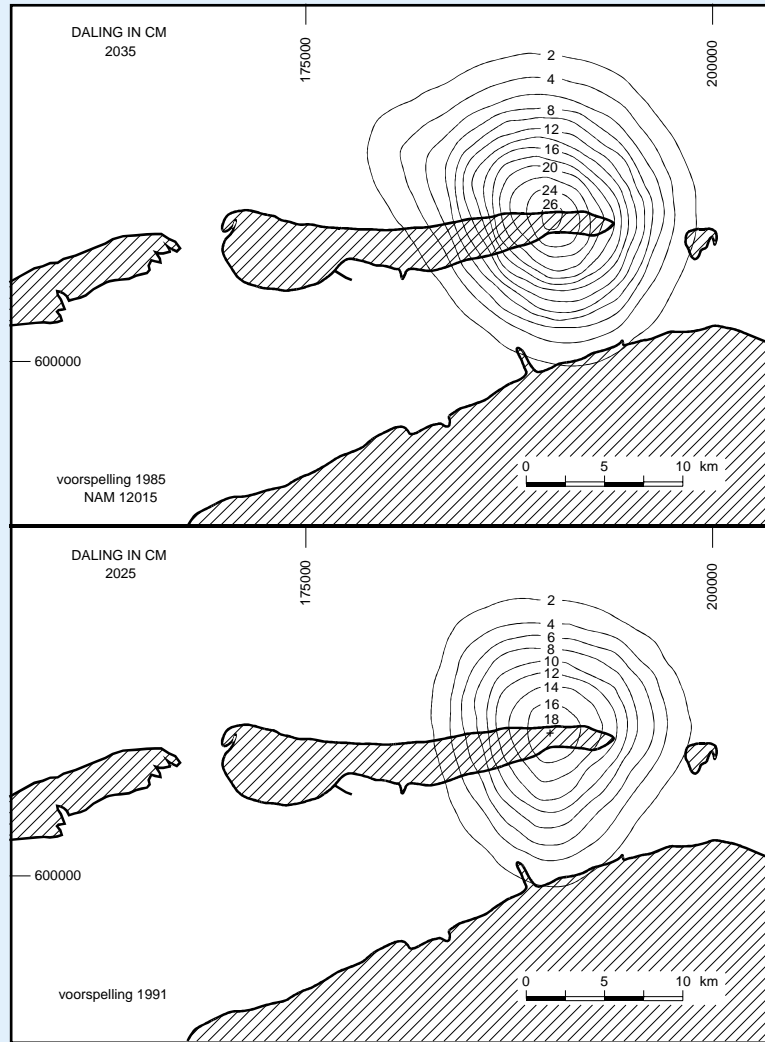
Het Ameland-gasveld is ontdekt in 1962. Het Boven-Slochterenzandsteen, waaruit het gas geproduceerd wordt, is gelegen op een diepte van ongeveer 3400 meter. Voor de berekening is ervan uitgegaan dat de productie zou starten in januari 1986 via 6 putten, die op het eiland gelegen zijn. Het gas

wordt afgevoerd naar het voor de kust gelegen productieplatform en na behandeling via de nabij lopende NGT-leiding naar land gevoerd.

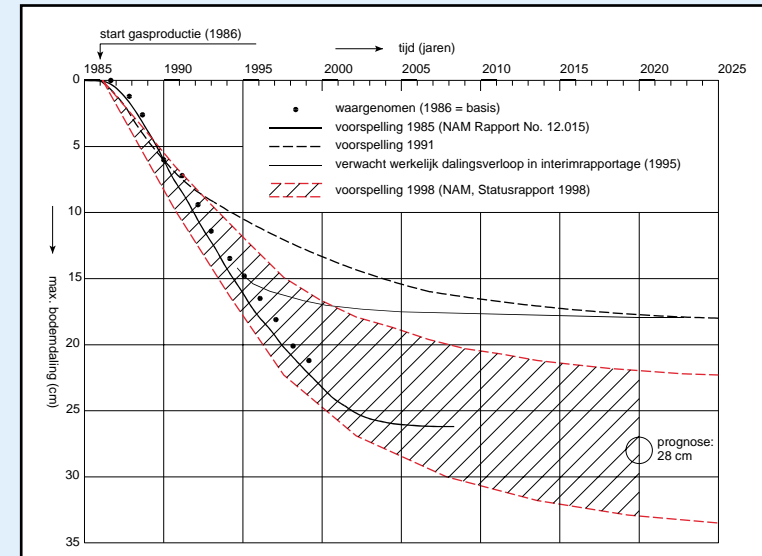
In Figuur 2.2 wordt de actuele productie getoond.



Figuur 2.2 Gasproductie van het Ameland-veld van 1986-2000



Figuur 2.3 Bodemdalingsvoorspellingen Ameland 1985 en 1991



Figuur 2.4 Maximum bodemdaling Ameland als functie van de tijd (1998)

De in 1985 berekende daling (NAM, 1985), was gebaseerd op een aangenomen productievoorspelling en de toen beschikbare kennis. Dit leidde tot een waarde van circa 26 centimeter in het centrum van het bijna 250 vierkante kilometer grote gebied aan het einde van de productie. Sindsdien nam de kennis van de modelparameters echter toe op basis van de ervaring in het Groningerveld. Daarom werd in 1991 opnieuw de eindsituatie voor een drukvermindering van ongeveer 500 bar berekend (NAM, 1991a); deze kwam nu uit op 18 ± 4 centimeter (Figuren 2.3 en 2.4). Voor het verloop in de tijd (de snelheid waarmee deze waarde wordt bereikt) werd ervan uitgegaan dat deze eindsituatie omstreeks het jaar 2025 ook daadwerkelijk zou worden bereikt.

Omdat de in een bodemdalingstudie gebruikte parameters niet exact bekend



kunnen zijn, is aan elke voorspelling een onzekerheid verbonden. Van het Ameland-reservoir zijn op dit moment goede kwaliteit 3D-seismische data beschikbaar, die een nauwkeuriger beschrijving van de geologische structuur mogelijk maken dan voorheen. Door de informatie uit de geboorde putten kunnen de diktes goed met elkaar worden gecorreleerd. De grootste onzekerheid in de schatting van de eindwaarde is gelegen in de samendrukbaarheid van het reservoir (afhankelijk van de compactiecoëfficiënt en de dikte van het gasvoerend gesteente) en het gedrag van de bovenliggende lagen. De onzekerheid in het verloop wordt bepaald door de gasvraag en de beschikbaarheid van gasvelden om daaraan te voldoen.

2.3 Meettechnieken en waargenomen bodemdaling

Het voorspellingsmodel voor de bepaling van de te verwachten bodemdaling is een belangrijk hulpmiddel om de gevolgen van gaswinning aan het oppervlak van te voren goed in te schatten. Verificatie achteraf via monitoring is echter noodzakelijk om de feitelijke bodemdaling vast te stellen. Problemen, die hierbij een rol kunnen spelen, zijn de meeton nauwkeurigheid, de inklinking van de jonge sedimenten boven de gasvoerende laag en de optredende erosie of sedimentatie aan het aardoppervlak.

Op het land kan de bodemdaling door middel van optische nauwkeurigheidswaterpassingen met voldoende nauwkeurigheid worden bepaald. Voor hoogtebepaling van in de Waddenzee of in de Noordzee verankerde meetpunten wordt hydrostatische waterpassing of GPS-hoogtemeting toegepast. De praktische nauwkeurigheid van deze methodes van hoogtemeting is weergegeven in Tabel 2.1:

Table 2.1 Nauwkeurigheid van hoogtemetingen

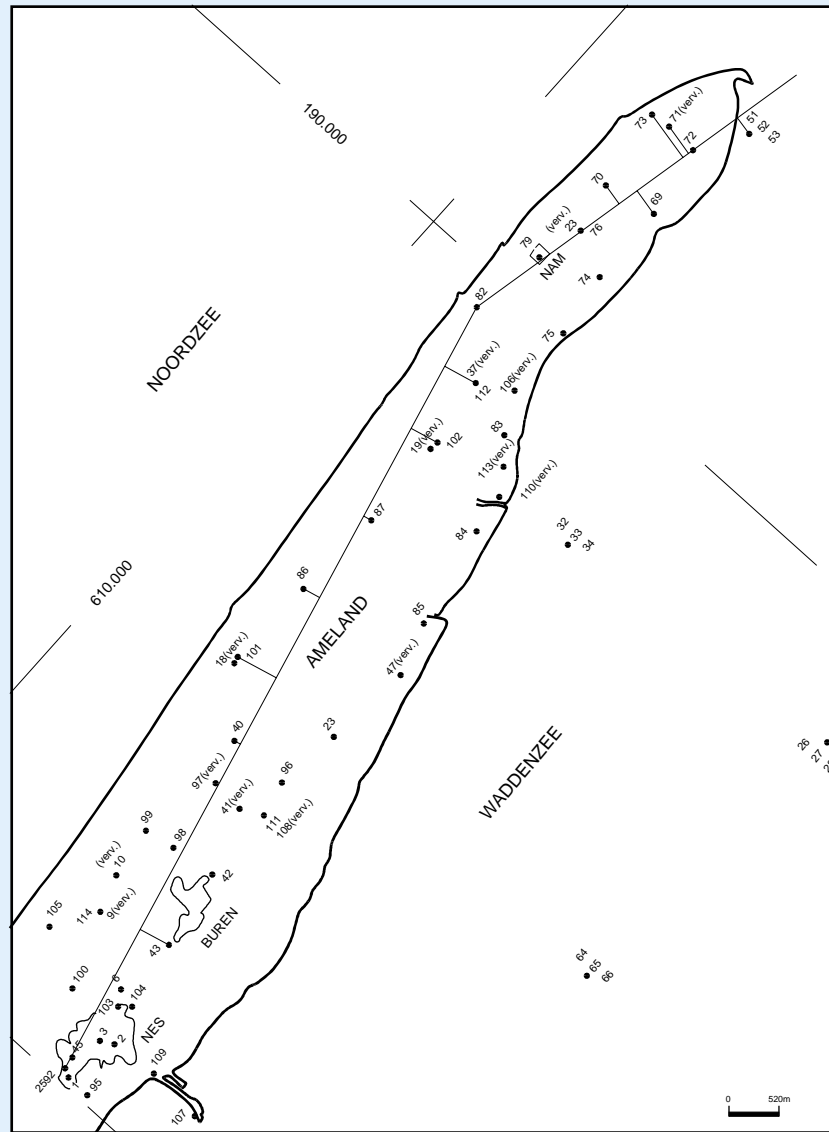
Methode	Nauwkeurigheid (2σ)
Optisch	$1,2 \text{ mm} \times \sqrt{\text{afstand in km}}$
Hydrostatisch	$0,4 \text{ mm} + 0,05 \text{ mm} \times \text{afstand in km}$
GPS	$2,0 \text{ mm} + 2,00 \text{ mm} \times \text{afstand in km}$

Hoogtes in het centrum van de bodemdaling kom bepaald ten opzichte van het merk OA2592 in Nes hebben - ten gevolge van accumulatie van meetruis - een nauwkeurigheid van $\pm 4 \text{ mm}$.

Voor een betrouwbare afleiding van bodembeweging over de tijd mogen alleen hoogtes bepaald ten opzichte van hetzelfde referentiepunt van elkaar worden afgetrokken. De beschikbare gegevens uit het databestand van ondergrondse peilmerken in de Waddenzee van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (RWS) van voor 1998 blijken een nauwkeurigheid te hebben, die een orde minder nauwkeurig is namelijk in de orde van centimeters. De belangrijkste oorzaak hiervan bleek dat de gegevens niet steeds aan hetzelfde referentiepunt waren gekoppeld. In het kader van dit onderzoek is in 1998 voor een aantal punten deze koppeling aangebracht, waardoor nu ook in de meetpunten in de Waddenzee een vergelijkbare nauwkeurigheid wordt gehaald als op het land.

In 1993 is de NAM begonnen met het meten van hoogtes van meetpunten op de platforms Ameland-Westgat (AWG-1) en het nabij gelegen satellietplatform (AME-2) via GPS-metingen (NAM, 1993a). Door de wat moeilijke bepaling van het hoogteverschil tussen fasecentrum van de GPS-antenne (Global Positioning System) boven het platform en het meetwerk net boven de waterlijn ligt de nauwkeurigheid van deze hoogteverschilmetingen tussen 1 en 3 cm.

Inklinking van de jonge sedimenten boven de gasvoerende laag is hier niet relevant. De bodem is in het algemeen oud en geconsolideerd en in elk geval vrij homogeen in horizontale zin. Indien er al compactie optreedt, dan zijn in elk geval de compactieverschillen verwaarloosbaar. De bodemdaling wordt bepaald via waterpassingen, die doorlopen tot aan referentiepunten buiten het bodemdalingsgebied. Door de bodemdaling te bepalen ten opzichte van deze referentiepunten wordt eventuele bodemdaling door natuurlijke compactie of tektonische beweging van de aardkorst geëlimineerd. De waterpassingen worden uitgevoerd door het aanmeten van een net van meetpunten (Figuur 2.5) die zijn gefundeerd op een vaste ondergrond. Hierdoor spelen veranderingen in het maaiveld door sedimentatie, erosie of andere oorzaken geen rol in de meetresultaten en wordt alleen de invloed



Figuur 2.5 Nauwkeurigheidswaterpassing Ameland peilmerkenkaart

van de gaswinning op de bodemligging bepaald. De resultaten zijn direct vergelijkbaar met de voorspelde bodemdaling.

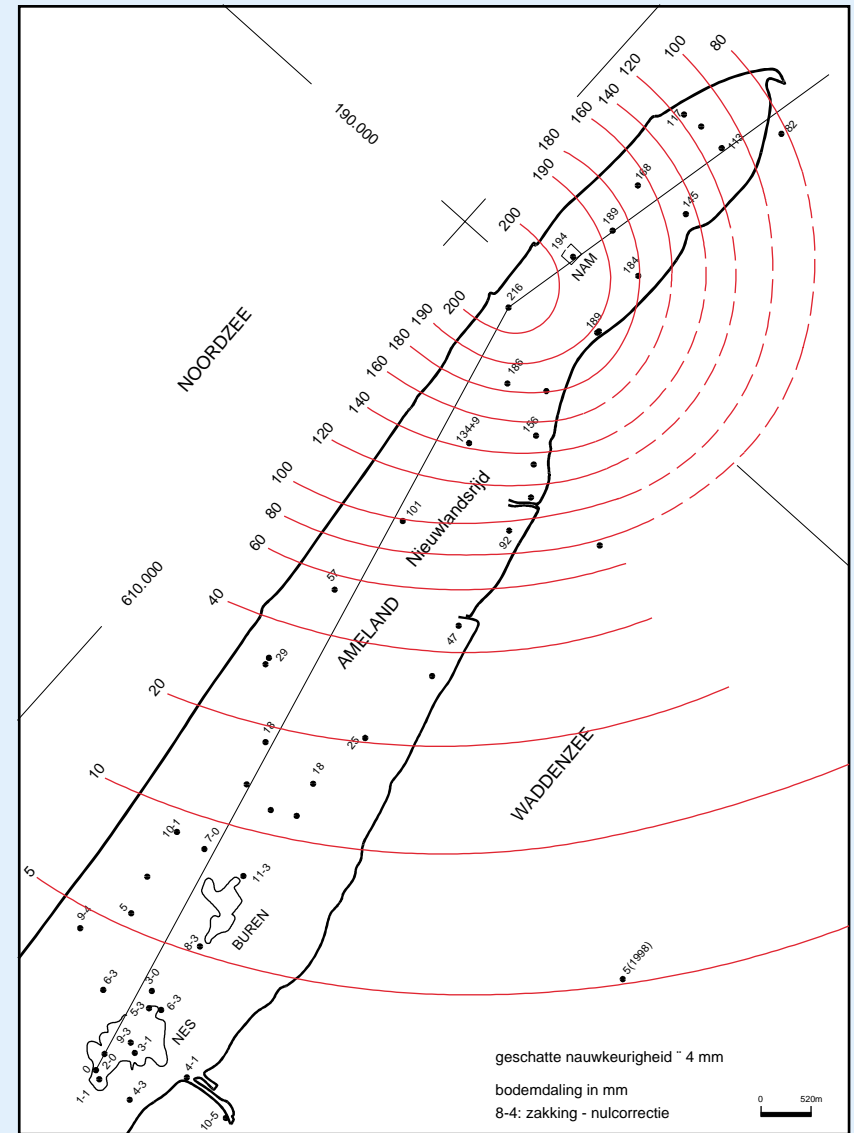
De nauwkeurigheidswaterpassingen op Ameland zijn gestart in maart 1986 en sindsdien herhaald in oktober/november 1987, oktober 1988, januari/februari 1990 en daarna jaarlijks in januari of februari (NAM, 1988, 1990b, 1991b, 1992, 1993b, 1994 t/m 1999). Voor het bepalen van de bodemdaling zijn de gegevens van 1986 gekozen als ongestoorde situatie, hetgeen niet volledig juist is, omdat de gasproductie al in januari 1986 is gestart. De fout is echter op enige afstand van het hart van de schotel verwaarloosbaar en maximaal in de orde van 3 mm in het hart zelf.

Het meetnet is via het ondergrondse merk OA2592 in Nes aangesloten op het NAP-net. De metingen zijn allemaal uitgevoerd volgens de richtlijnen van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat inzake meetwijze en toleranties voor 2e orde nauwkeurigheidswaterpassingen. De hoogte van het meetpunt OA2592 is als referentiehoogte gekozen voor het bepalen van de bodemdaling. In 1993 is éénmalig gecontroleerd of het referentiepunt werkelijk stabiel is door ook Ameland-West te waterpassen en de veranderingen ten opzichte van 1987 te bepalen (geen gegevens van 1986 beschikbaar). De verschillen tussen 1987 en 1993 voor Ameland-West waren "zakkingen" van 1 à 5 mm in plaats van relatieve stijgingen. Dit laatste had kunnen wijzen op een daling van het referentiepunt; nu is geconcludeerd dat het referentiepunt stabiel is en dat de afwijkingen te wijten zijn aan meetonauwkeurigheid (NAM, 1993b).

Op basis van de gemeten hoogteverschillen rond Buren en verder naar het westen in de beginfase van de gaswinning, toen daar nog geen bodemdaling kon worden verwacht, kan worden geconcludeerd dat de meetnauwkeurigheid beter is dan circa 4 mm. Het is echter opvallend dat de verschillen ten opzichte van 1986 en 1987 daar overwegend een "daling" laten zien. Door de waarnemingen in de verschillende punten in dit gebied tegen de tijd uit te zetten blijkt, dat die van 1987 en vooral die van 1986 relatief hoog zijn. De waarden van 1990 zijn in het algemeen relatief laag. Door de

Tabel 2.2 Gecorrigeerde en herleide nulniveaus voor bodemdaling

Peilmerk Nr	Coördinaten		Hoogte maart 1986		Correctie 1986
	X [m]	Y [m]	Gemeten [m+NAP]	Herleid [m+NAP]	Herleid [mm]
OA2592	180110	606700	3.7722		
2C1	180050	606650		2.9803	-1
2C2	180630	606520	4.0077		-1
2C3	180550	606650	5.5114		-3
2C6	181200	606940	4.1971		
2C9	181640	607740	5.6537		
2C18	184840	608410	3.8498		
2C19	188130	608320	3.1720		
2C23	184910	607050	3.6191		
2C37	188980	608530	2.5744		
2C40	184130	607800	2.7072		
2C42	182850	606980	3.1651		-3
2C43	181980	606850	3.2531		-3
2C45	180130	606730	3.5086		
2C47	185980	606870	2.2511		
2C82	189640	609010	3.2178		
2C83	188850	607760	7.0668		
2C84	187710	607340	2.0899		
2C85	186550	607070	3.4040		
2C86	185940	608390	2.3321		
2C87	187020	608370	2.3037		
2C95	180070	606380	2.5610		-3
2C96	184180	607160	2.8329		
2C97	183530	607710	3.6912		
2C98	182690	607550	3.7118		
2C99	182610	607920	5.9036		-1
2C100	180450	607300	4.1112		-3
2C101	184840	608410	3.6916		
2C102	188130	608330	3.0401		
2C103	181010	606780	4.8502		-3
2C104	180980	606780	4.9462		-3
2C105	181180	607990	18.6619		-4
2C106	189220	608080	20.8457		-23
2C107	180700	605300	2.0507		-5
2C109	180730	606060		2.2772	-1
2C110	188120	607450	1.9838		
2C111	183690	607020		2.2730	
2C112	188980	608530	3.6319		
2C113	188500	607540		2.5370	
2C114	181640	607740		5.6600	
2D23	191000	608660	2.0152		
2D51	193170	608010	0.5602		
2D52	193170	608000	0.4470		
2D53	193170	608000	0.5638		
2D69	191640	608320	2.2626		
2D70	191630	608830	2.7614		
2D71	192620	608740	2.1557		
2D72	192600	608440	1.9124		
2D73	192640	608940	1.6661		
2D74	190790	608220	2.1760		
2D75	190020	608030	1.8171		
2D76	191000	608660	2.8452		
2D78	192625	608750	3.2020		
2D79	190500	608830	2.9293		



Figuur 2.6 Nauwkeurigheidswaterpassing Ameland Bodemdaling 1986-1999



referentiemeetwaarden in deze punten te corrigeren naar de gemiddelde waarden is de meetfout in het "nul"-niveau geëlimineerd. Daarnaast zijn er in de loop der jaren enige meetpunten vervallen en zijn er enkele vervangen door andere meetpunten. In het laatste geval is het "nul"-niveau van de nieuwe punten herleid uit koppeling met het vervallen punt in de directe omgeving of met één of twee punten met vergelijkbare bodemdaling in de buurt. De herleide referentieniveaus hebben een hoge betrouwbaarheid (orde millimeters). De gecorrigeerde en herleide nulniveaus zijn gegeven in Tabel 2.2. De waargenomen bodemdaling in februari 1999 is gegeven in Figuur 2.6 en het werkelijk verloop van de maximale bodemdaling in de tijd is samen met de voorspelling weergegeven in Figuur 2.4.

Voor de waargenomen bodemdaling is steeds het punt 2C-82 net ten westen van de NAM-locatie aangehouden. Uit Figuur 2.6 met de doorsnede over de bodemdalingsschotel blijkt echter een wat afwijkend gedrag van meetpunt 2D-79 op de NAM-locatie. Dit punt lijkt in de tijd steeds iets verder in zakking achter te blijven (afwijking geschat op 15 % van de gemeten zakking). De reden hiervan is niet volledig duidelijk, maar het zou kunnen worden veroorzaakt door (gedeeltelijke) opdrijving van het gebouw waarin het meetpunt is verankerd. Dat gebouw steekt met zijn kelder in het grondwater en zakt door de bodemdaling daar steeds dieper in. De werkelijke maximum bodemdaling kan daardoor nu circa 1 cm groter zijn dan nu aangenomen gebaseerd op punt 82.

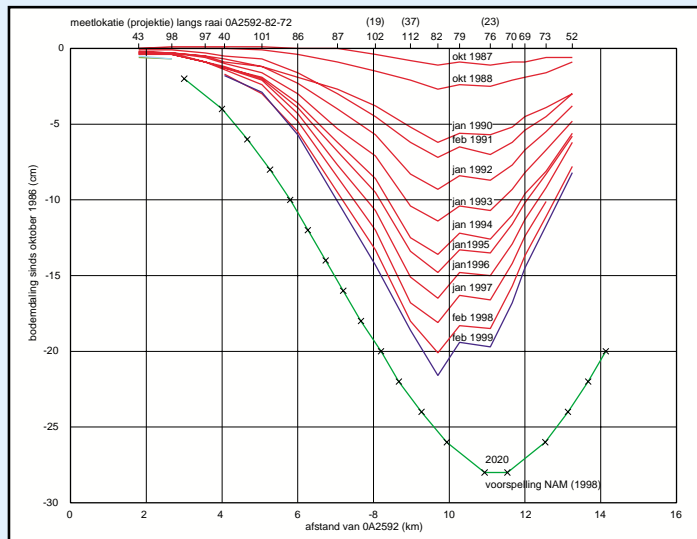
Sinds 1986/87 zijn er in april/mei 1992 en in mei 1998 weer hydrostatische waterpassingen in de Waddenzee uitgevoerd (RWS, 1992; NAM, 1999). Hierbij zijn in 1992 slechts drie groepen van ondergrondse merken in de Waddenzee aangemeten, die niet via de optische waterpassing worden aangemeten. Dit zijn de punten OM68 (merkpunten 2C-64, -65, -66), OM102 (= OM76; merkpunten 2C-26, -27, -28) en een nieuw punt (merkpunten 2D-88, -89, -90). Via het punt OM107 (merkpunten 2D-51, -52, -53) op de oostpunt van Ameland is doorgemeten tot de golfmeetpaal Wierumergrond (merkpunten OG-93, -94) in het Westgat. De punten OM68 en OM102 gaven

oorspronkelijk een daling van 21 mm respectievelijk 19 mm, waar op grond van de nauwkeurigheidswaterpassing een zakking van minder dan 1 cm mag worden verwacht. De golfmeetpaal Wierumergrond gaf een stijging van 4 mm, waar geen bodemdaling verwacht mag worden (fout binnen meetnauwkeurigheid). De meetresultaten van de punten OM68 en OM102 zijn zorgvuldig nagelopen en op de juiste wijze vereffend naar het hier geldende referentievlak. Na herberekening op basis van het gemeenschappelijke referentiepunt OA2592 in 1998 werd voor de merken OM68 en OM107 in 1992 een zakking gevonden van respectievelijk 7 mm en 8 mm. In 1998 bedroegen de gemeten zakkingen in die punten respectievelijk 5 mm en 11 mm. De waargenomen zakking in de nieuwe puntgroep 2D-88, -89, -90 bedroeg in de periode 1992-1998 gemiddeld 18 mm.

2.4 Vergelijking voorspelde en gemeten bodemdaling

Een belangrijke vraag is hoe de werkelijke bodemdaling verloopt in vergelijking tot de voorspelde bodemdaling. In dit kader is in eerste instantie gekeken naar het gemeten en voorspelde verloop van de maximum bodemdaling in de tijd. De voorspelling van 1991 berustte op een verbeterde inschatting van de compactie-coëfficiënt. Uit vergelijking van de voorspellingen met de metingen blijkt echter (zie Figuur 2.3) dat, de waargenomen bodemdaling zeer goed aansluit bij de oorspronkelijke voorspelling van 1985, vooral als rekening wordt gehouden met een correctie van de waargenomen bodemdaling met maximaal 3 mm voor de zakking in de periode januari tot maart 1986.

In de interim-rapportage (Eysink et al, 1995) is naar oorzaken van deze afwijking gezocht en er werden ook op het eerste gezicht plausibele verklaringen gevonden. Extrapolatie van de bodemdaling met de in paragraaf 2.1 gegeven formule en de toen bekende bodemdaling en bijbehorende afname van de gasdruk in het reservoir bevestigde in 1994 de verbeterde voorspelling van 1991. Na 1995 bleek de snelheid van bodemdaling tegen de verwachting in echter niet af te nemen, waardoor er onzekerheid ontstond over de juistheid van de voorspelling.



Figuur 2.7 Nauwkeurigheidswaterpassing Ameland peilmerkenkaart

Een andere vergelijking tussen voorspelde en waargenomen bodemdaling is gemaakt door de groei van de schotel in de tijd te vergelijken met de eindwaarden volgens de oorspronkelijke (1985) en de laatste (1998) voorspelling. Hiertoe is een doorsnede over de bodemdalingsschotel gemaakt langs de raai door het referentiepunt OA2592 in Nes, het meetpunt 2C-82 en het meetpunt 2D-72. De raai is geknikt in meetpunt 2C-82 waar de grootste bodemdaling optreedt. Beide takken van de raai staan min of meer loodrecht op de iso-zakkingslijnen. De meetpunten, die op niet al te grote afstand van deze raai liggen, zijn hierop geprojecteerd. Op deze wijze kan een gedetailleerde dwarsdoorsnede over de schotel worden gemaakt en de ontwikkeling hiervan in de tijd worden weergegeven (zie Figuur 2.7). In het algemeen zien de meetresultaten er betrouwbaar uit. De bodemdaling gemeten in 1990 is in het algemeen iets aan de hoge kant en ten westen van meetpunt 87 in elk geval (iets) te hoog.

De ontwikkeling van de schotel sloot in 1994 op het eerste gezicht redelijk goed aan bij het beeld van de voorspelling van 1991. De bodemdaling verliep in het hart van de schotel ten opzichte van de voorspelling relatief sneller dan op enige afstand ervan. De ontwikkeling van de bodemdaling in het Pinkegat bleef het meest achter.

In 1999 bereikte de bodemdalingsschotel een volume van $9.0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Hiervan bevond zich $1.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ onder het eiland en het resterend deel onder de Noordzeekustzone, het zeegat en de Waddenzee.

2.5 Bijgestelde voorspelling bodemdaling

De NAM heeft in 1997 en 1998 veel extra inspanning gestoken in het zoeken naar een verklaring waarom de waargenomen bodemdaling in het hart van de dalingschotel groter is geworden dan in 1991 was voorspeld. Daartoe zijn drie benaderingen gevolgd:

- Een hernieuwde berekening met het oorspronkelijke bodemdalingsschotelmodel (Model SubCal) van NAM met de meest recente kennis van de bodemopbouw en de werkelijke gaswinning uit de gasvoerende lagen (het geëxploiteerde gasveld is kleiner dan oorspronkelijk in rekening is gebracht) en gesteenteparameters die zijn bijgesteld op basis van de gemeten bodemdaling. Uit analyses van meerdere nieuwe gesteentemonsters bleek de samendrukbaarheid in het gasveld niet uniform te zijn. In het hart van het veld bleek de porositeit en daarmee de samen drukbaarheid van het gesteente hoger te zijn dan in 1991 was aangenomen. Langs de rand van het veld was die juist lager. Tevens bleek de dikte van de zout-laag boven de gasvoerende laag sterk in dikte te variëren, waardoor plastische effecten in deze zoutlaag een sterkere invloed op de spreiding van de bovenlast naar de ondergrond hebben en dus ook op de bodemdaling.
- Een berekening met een verbeterd analytisch bodemdalingsschotelmodel Extended Subcal van NAM, waarin ook het gedrag van de zoutlaag boven het gasveld kan worden gesimuleerd.
- Berekeningen door TNO met hun eindige elementenmodel Fem-Diana, waarin de complexe structuur van de bodemopbouw gedetailleerd kan worden weergegeven. Met dit model is naast het meest waarschijnlijke

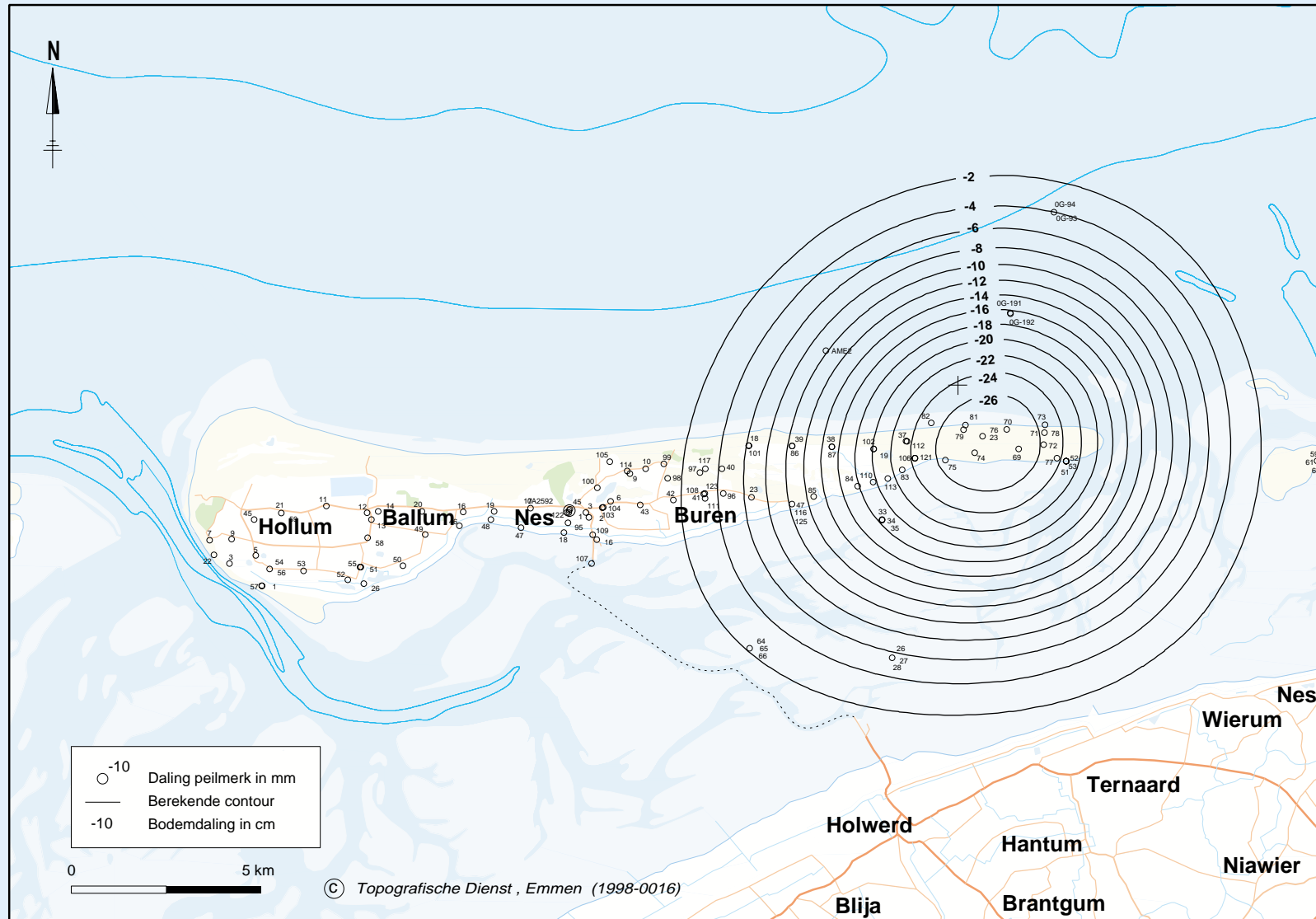


scenario (base case) ook een extreem scenario (worst case) doorgerekend (Schreppers, 1998).

De resultaten van al deze studies zijn samengevat in een NAM-rapport (NAM, 1998). Met verbeterde modelbeschrijving en niet-lineair gedrag van de bodemlagen boven het gasreservoir bleek de waargenomen bodemdaling uiteindelijk beter te kunnen worden weergegeven. De resultaten van de verschillende modellen liggen dicht bij elkaar. Gebaseerd op deze modelresultaten wordt verwacht dat de maximum eindszakking in de buurt van de NAM-locatie in de orde van 28 cm zal zijn met een onzekerheidsmarge van ± 6 cm (Figuren 2.3 en 2.8).

De bodemdaling zal zich minder ver naar het westen uitbreiden dan in 1985 was voorspeld, doordat niet uit alle delen van het Amelandveld gas wordt gewonnen (zie Figuren 2.2 en 2.8). De voorspelde inhoud van de ondiepe bodemdalingsschotel is daardoor ook teruggelopen van 28 miljoen m³ tot 14 à 18 miljoen m³.

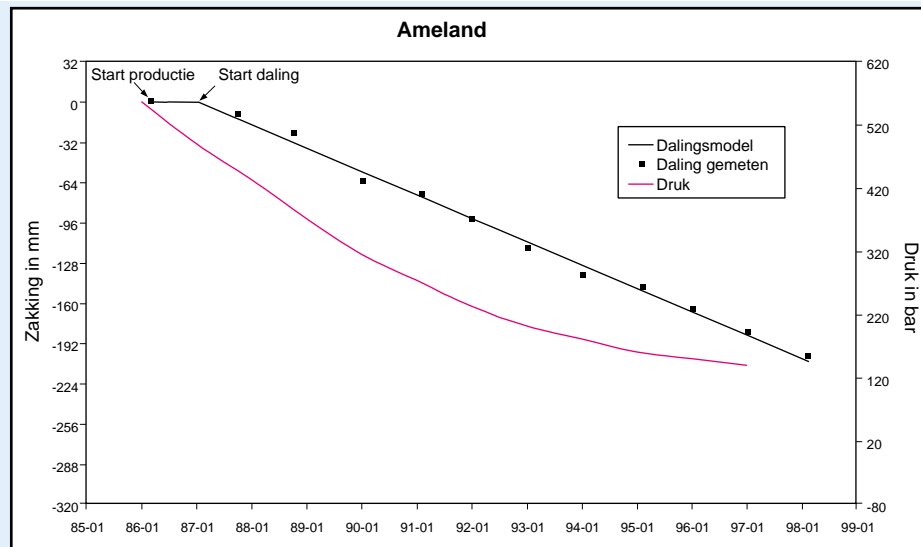
Volgens deze laatste voorspelling zal de meest waarschijnlijke einddaling in Buren en verder naar het westen minder dan circa 1 cm gaan bedragen. In de Buurderduinen en de polder Buurdergrie zal dit naar het oosten toe gaan oplopen tot circa 6 à 8 cm (vergelijkbaar met de voorspelling uit 1991) en op het Nieuwlandsrijd loopt het verder op tot circa 20 à 22 cm nabij Het Oerd (vergelijkbaar met de voorspelling uit 1985). De nu verwachte zakking op De Hon is vergelijkbaar tot iets groter dan voorspeld in 1985.



Figuur 2.8 Bodemdaling Ameland prognose 2020



Het niet-lineaire gedrag en de grote dikte van de bovenliggende zoutlagen en het relatief kleine gasreservoir leidt er ook toe dat de maximum bodemdaling in het Amelandveld, in tegenstelling tot die in het Groningenveld, niet rechtevenredig verloopt met de drukafname in het centrale deel van het veld (Figuur 2.9). Uit dit laatste volgt ook waarom de in de interim-rapportage toegepaste extrapolatie niet geldig is voor het Amelandveld.



Figuur 2.9 Verloop van de bodemdaling (mm) en de druk (Bar) in het centrale deel van het veld in de tijd.

2.6 Conclusies

Uit het voorgaande blijkt dat via nauwkeurigheidswaterpassingen op het eiland een betrouwbaar beeld van de werkelijke bodemdaling door gaswinning wordt verkregen (meetnauwkeurigheid ca. 4 mm). Op zee bleek de meetnauwkeurigheid van het oorspronkelijke databestand lager te zijn en lag afhankelijk van de meetmethode in de orde van één centimeter (GPS-metingen platforms) tot meerdere centimeters (hydrostatische waterpassing

ondergrondse merken). Na herberekening van de hydrostatische waterpassingen werd voor de daling van de ondergrondse peilmerken in de Waddenzee een nauwkeurigheid van 0,5 á 1 cm bereikt. De met GPS bepaalde dalingen hebben een nauwkeurigheid van 1 tot 3 cm.

Uit de meetgegevens op Ameland bleek duidelijk dat de werkelijke bodemdaling in het hart van de schotel beter aansluit bij de oorspronkelijke voorspelling uit 1985 dan bij de herziene voorspelling uit 1991, dit ondanks het feit dat niet het gehele Amelandveld wordt geëxploiteerd. Wel blijft de daling aan de rand van de schotel duidelijk achter bij de oorspronkelijke voorspelling, die is gebruikt voor de effectvoorspelling van de bodemdaling door gaswinning (Eysink et al., 1987). Dit is niet gedaan voor de polder Buurdergrie; daar is de voorspelling van 1991 gebruikt (Boer en Eysink, 1993). Het algemene beeld is dat de bodemdaling (in cm) op De Hon dicht in de buurt van de voorspelling uit 1985 zal komen te liggen of iets groter zal worden. Op Nieuwlandsrijd zal de werkelijke daling waarschijnlijk gemiddeld iets lager uitkomen en in de polder Buurdergrie zal hij in de buurt van de voorspelling uit 1991 komen te liggen. In de Waddenzee en de Noordzee zal de daling in het algemeen minder zijn dan in 1985 voorspeld. De inhoud van de bodemdalingsschotel in de Waddenzee en de Noordzee zal naar verwachting aanzienlijk minder zijn dan in 1985 werd voorspeld. Van het totale zakkingsvolume (tabel 2.3) zal 80% plaatsvinden in de Noordzee en de Waddenzee

Table 2.3 Bodemdaling van het Ameland-veld

Prognose	Maximum daling (cm)	Volume schotel (10 ⁶ m ³)
1985	26 (21-31)	28
1991	18 (14-22)	18
1998	28 (22-34)	14-18



In 1999 bereikte de bodemdalingsschotel een volume van $9.0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Hiervan bevond zich $1.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ onder het eiland en het resterend deel onder de Noordzeekustzone, het zeegat en de Waddenzee.

Uit eerdere ervaring is gebleken dat het voorspellen van de bodemdaling bij Ameland niet eenvoudig is, omdat bij dit kleine veld niet-lineaire effecten in de bovenlagen een belangrijke rol spelen in de overdracht van de bovenbelasting naar de gasvoerende laag en de omringende ondergrond (vorm van gewelfwerking). Hierdoor bestaat er in dit geval geen lineaire relatie tussen drukafname in de gas-voerende laag en de maximum bodemdaling en leidde een lineaire extrapolatie van de maximum einddaling op basis van een momentane situatie tot een verkeerde verwachting. Bij de laatste voorspelling is door de NAM (Model SubCal) en TNO (Model Fem-DIANA) van de meest recente kennis en gegevens uitgegaan, en zijn de modellen zo goed mogelijk afgeregeld op de resultaten van twaalf jaarlijkse waterpassingen. De bodemdalingssnelheid zal naar verwachting pas vanaf het jaar 2002 duidelijk gaan afnemen en rond 2010 zijn eindwaarde dicht genaderd zijn.

Om deze reden wordt aanbevolen om de waterpassingen voort te zetten totdat de bodemdalingssnelheid in het hart van de schotel minder is geworden dan $0,5 \text{ cm/jaar}$. Tot die tijd volstaat een meting per 2 jaar. Daarna kan worden overgegaan op een lagere frequentie.