

Bodemdalingsprognose van Ameland

- Bodemdaling door Aardgaswinning - STATUS RAPPORT 1998

**Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
Subsidence Team (PEB)**

December 1998

The copyright of this document is vested in Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, The Netherlands. All rights reserved. Neither the whole, nor any part of this document may be reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner.

SAMENVATTING

Voor het Ameland veld zijn in voorgaande jaren een tweetal bodemdalingsprognoses uitgebracht. In 1985 is een prognose uitgebracht welke gebaseerd was op de veronderstelling dat alle velden in het Ameland gebied geproduceerd zouden worden tot een einddruk van 115 bar. Tevens maakte dit model gebruik van het zogenaamde "Rate Type Compaction Model" om de reservoir compactie te beschrijven. Deze studie resulteerde in een uiteindelijke maximale bodemdaling van 26 ± 5 cm.

De tweede studie werd in 1991 aan de Inspecteur-generaal der Mijnen aangeboden en had als uitgangspunt dat alleen Ameland-Oost en –Westgat zouden worden geproduceerd tot een uiteindelijke druk van 40 bar in het centrum (kompessie). Verder werd gebruik gemaakt van het inmiddels volledig geaccepteerde gegeven dat reservoir compactie plaatsvindt volgens het lineaire compactie model met in achtname van de ervaringen van de 1990 Groningen bodemdalingsstudie, wat resulteerde in een lagere compactie coëfficiënt (C_m) ten opzichte van die zoals gebruikt in 1985. De resultaten van deze studie leidden tot een te verwachten bodemdaling van 18 ± 4 cm.

Inmiddels is gebleken dat de 1991 bodemdalingsprognose achterblijft bij de in 1997 en 1998 gemeten bodemdaling op het diepste punt. Derhalve is besloten naast de SUBCAL studie een uitgebreide bodemdalingsstudie uit te voeren met behulp van een voor NAM ontwikkeld analytisch model: ExtendedSubcal. Met behulp van ExtendedSubcal is het mogelijk een zoutlaag te modelleren, zoals aanwezig boven het Ameland reservoir. Tenslotte is door TNO - Bouw en Constructie Research een eindig element analyse (DIANA) uitgevoerd waarmee de compacterende laag en alle bovenliggende lagen in detail kunnen worden beschreven.

De bovenstaande studies hebben geleid tot de volgende conclusies:

- Wanneer een 20% onzekerheid in de bodemdalingsberekening wordt verondersteld, zal de uiteindelijke bodemdaling boven het Ameland veld op het diepste punt van de kom 28 ± 6 cm bedragen.
- De bodemdalingsprognoses van het diepste punt in 2020, verkregen met de twee verschillende modellen ExtendedSubcal en DIANA komen goed overeen, en resulteren in respectievelijk 28 en 27 cm. Ook de SUBCAL simulatie met een iets hogere C_m in het centrale deel valt met een eindwaarde van 25 cm binnen het 20% onzekerheid interval.
- Alle huidige studies geven een grotere te verwachten bodemdaling in 2020 ten opzichte van de in 1991 uitgebrachte prognose. Ten opzichte van de 1985 prognose is het verschil beperkt tot 2 cm voor de verwachte waarde. Echter, de 1985 prognose is gebaseerd op een ander reservoir compactie model en derhalve niet geheel te vergelijken met alle latere studies.
- Het te verwachten volume van de bodemdalingskom zal variëren tussen 14 en 18×10^6 m³.
- Wanneer de berekende bodemdalingskom-volumina van 1985 en 1991 vergeleken worden met de huidige prognose, dan blijkt dat ondanks dat de bodemdaling op het diepste punt in 2020 zal toenemen, het volume van de kom niet toeneemt en zelfs afneemt ten opzichte van de in 1985 uitgebrachte prognose. Hieruit volgt dat het oppervlak dat onderhevig is aan bodemdaling iets kleiner zal zijn.

SAMENVATTING	1
1. Inleiding	3
1.1 HET AMELAND VELD	3
2. Eerdere bodemdalingsprognoses	3
3. Bodemdalingsprognose studies	4
3.1 BOVENLIGGENDE LAGEN	4
3.2 RESERVOIR COMPACTIE COËFFICIËNT	5
3.3 ONZEKERHEID VAN DE BODEMDALINGSBEREKENING	5
3.4 SUBCAL BODEMDALINGSPROGNOSE	6
3.5 EXTENDED SUBCAL BODEMDALINGSPROGNOSE	6
3.6 DIANA EINDIG ELEMENT BODEMDALINGSPROGNOSE	8
4. Overzicht resultaten bodemdalingsprognoses	11
5. Conclusies en de 1998 Ameland bodemdalingsprognose	13
SUMMARY 1998 AMELAND SUBSIDENCE PROGNOSIS	15

1. Inleiding

De Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM) rekent het tot één van haar verantwoordelijkheden om na te gaan in hoeverre haar produktieactiviteiten aanleiding kunnen geven tot bodemdaling als gevolg van compactie van poreuze gesteentelagen waaruit aardolie of gas wordt gewonnen.

In een olie- of gasveld veroorzaakt de winning van koolwater stoffen een vermindering van de poriëndruk in de olie of gas houdende gesteentelaag. Daarbij wordt het betreffende gesteente langzaam iets samengedrukt onder het gewicht van de bovenliggende lagen. Deze compactie hangt af van de mechanische eigenschappen van het reservoir gesteente, welke uitgedrukt worden in een Young's modulus (E) en een Poisson's ratio (ν). De Young's modulus is een maat voor de stijfheid van het gesteente en de Poisson's ratio geeft de verhouding aan tussen horizontale expansie en verticale contractie. Verder wordt de reservoir compactie bepaald door de grootte van de drukkaling (P) en de dikte van het depleterende reservoir (H).

De mate waarin reservoir compactie wordt omgezet in bodemdaling hangt af van de diepte en omvang van het reservoir en de gesteente mechanische eigenschappen van de bovenliggende lagen. Bij een groot reservoir zal de bodemdaling boven het centrum van het veld vrijwel gelijk zijn aan de ondergrondse compactie terwijl bij een klein veld welke op grote diepte ligt de bodemdaling kleiner zal zijn dan de reservoir compactie.

1.1 Het Ameland Veld

Het gas reservoir Ameland Oost is het belangrijkste veld in het Ameland gebied. Ameland Oost werd in januari 1986 in produktie gebracht en was het enige producerende veld totdat in januari 1993 Ameland Westgat in produktie werd genomen. Ook werd in de loop van de jaren het produktie scenario aangepast doordat door compressie de gemiddelde einddruk van Ameland Oost bij beëindiging van de gas produktie verlaagd kan worden van 115 bar naar 40 bar. De initiële reservoir druk was 557 bar.

Produktie van gas in Ameland vindt plaats vanuit de Upper Slochteren (ROSLU) formatie, welke zich op zo'n 3350 m diepte bevindt met een gemiddelde dikte van ongeveer 90 m. Een groot deel van het Ameland Oost veld bevindt zich onder het eiland en wordt gekenmerkt door gesteente van relatief hoge porositeit (~20%) en ondervindt dan ook de meeste compactie en drukkaling.

2. Eerdere bodemdalingsprognoses

1. Reeds in 1985 is een bodemdalingsprognose aangeboden aan de Inspecteur Generaal der Mijnen¹. Deze prognose was gebaseerd op volgende uitgangspunten:
 - Produktie van alle velden in het Ameland gebied: Ameland-Noord, -Oost, -Westgat en Nes-Noord;
 - Compactie van het reservoir vindt plaats volgens het "Rate Type Compaction Model" met een compactie coëfficiënt (C_m) van 1.42×10^{-5} 1/bar, uniform over het veld;
 - Een einddruk van • 115 bar, zonder compressie.
 - Bodemdalingsberekening ten gevolge van reservoir compactie wordt berekend met behulp van het "Geertsma & Van Opstal Rigid Basement Model" zoals geïmplementeerd in SUBCAL

¹ NAM Rapport No.12.015: "Voorspelling van de bodemdaling als gevolg van gaswinning in de provincie Friesland" Sept. 1985.

Uitgaande van de bovenstaande aannames resulteerde dit in een te verwachten maximale bodemdaling van 26 • 5 cm in het jaar 2005 en een volume van de bodemdaling van 28 x 10⁶ m³.

2. Aangezien in de loop der jaren meer informatie over het veld beschikbaar kwam en mede naar aanleiding van de 1990 Groningen bodemdalingsprognose, waarbij een lineair compactie model werd gebruikt (ondersteund door een zg. "second opinion" van MIT), werd in 1991 een nieuwe bodemdalingsprognose uitgevoerd². De volgende vernieuwde inzichten werden daarbij gebruikt:
 - Alleen Ameland-Oost en –Westgat zullen worden geproduceerd;
 - Reservoir compactie vindt plaats volgens het lineair compactie model met in achtname van de ervaringen van de 1990 Groningen bodemdalingsstudie; Een compactie coëfficiënt uniform verdeelt over het veld van 0.75 x 10⁻⁵ 1/bar.
 - Een einddruk van • 40 bar in Ameland-Oost en • 70 bar in Ameland-Westgat, met compressie;
 - Gebruikt als input in SUBCAL.

Deze herziene bodemdalingsprognose (1991) resulteerde in een te verwachten daling van maximaal 18 • 4 cm in 2025 met een komvolume van 18 x 10⁶ m³.

3. In 1996 is het geologisch model van Ameland herzien. Een van de resultaten van deze studie was dat het gebied waar maximale reservoir druk depletie zou optreden groter was met als gevolg een mogelijk grotere maximale bodemdaling op het diepste punt. De volgende wijzigingen ten opzichte van de 1991 prognose werden in SUBCAL geïmplementeerd:
 - Toename van het gebied waar maximale druk depletie zal optreden
 - Een compactie coëfficiënt die lineair evenredig is met de porositeit verdeling in het veld. De relatie is verkregen met behulp van mathematisch inversie van de waterpas metingen (zie ook 3.2).

De conclusie van deze tussentijdse studie was dat de uiteindelijke bodemdaling in diepste punt van de kom in 2020 nog binnen de in 1991 uitgebrachte bandbreedte van 18 + 4 cm zou liggen³.

Inmiddels is gebleken dat de 1991 bodemdalingsprognose achterblijft bij de in 1997 en 1998 gemeten bodemdaling op het diepste punt. Derhalve is besloten naast SUBCAL een uitgebreide bodemdalingsstudie uit te voeren met behulp van een analytisch model, ExtendedSubcal, welke een zoutlaag kan modelleren zoals aanwezig boven het Ameland reservoir en een door TNO - Bouw en Constructie Research uitgevoerde eindig element analyse waarmee alle bovenliggende lagen in detail kunnen worden beschreven.

3. Bodemdalingsprognose studies

Na een beschrijving van de gesteente mechanische eigenschappen van het reservoir en de bovenliggende lagen worden de resultaten van de volgende studies achtereenvolgens behandeld: 1) SUBCAL, 2) ExtendedSubcal, 3) DIANA.

3.1 Bovenliggende lagen

Zoals reeds eerder is vermeld wordt de mate van bodemdaling ten gevolge van reservoir compactie mede bepaald door de eigenschappen van de bovenliggende lagen. Figuur 1 (zie achter in rapport)

² NAM – SodM schrijven, d.d. 25-10-1991

³ NAM - SodM schrijven, d.d. 30-11-1996 (PEB 96/048)

laat zien dat de dikten van de lagen boven het Ameland reservoir (ROSLU) sterk variëren, dit geldt met name voor het Zechstein zout (haliet, ZEZ2H) welke boven het reservoir in dikte varieert tussen de 350 en 1800 m. Bovendien bestaat het bovenste gedeelte van de Zechstein uit een zone van magnesium zouten: carnalliet en bischofiet (ZEZ4H). Uit de literatuur is bekend dat carnalliet en bischofiet een 6-15 keer lagere stijfheid hebben dan haliet en dat zout zich onder druk anders gedraagt dan poreus zandsteen⁴. In "zacht" materiaal zoals zout treedt onder constante spanning een tijdsafhankelijke deformatie op welke kruip genoemd wordt. Kruip vindt zijn oorsprong in het visco-elastisch vervormingsgedrag van het zoutkristalrooster. De belangrijkste kruip stadia zijn de primaire kruip, een sterke toename van deformatie in tijd, en secundaire kruip, waarbij de deformatiesnelheid constant blijft. Wanneer in dit laatste geval de opgelegde spanning gelijk aan nul wordt zal de deformatie niet volledig verdwijnen.

De beschrijving van het deformatie gedrag van zout is onderwerp van vele studies, echter, twee benaderingswijzen zijn gevolgd: de ene methode gaat uit van een lineair visco-elastisch gedrag welke geïmplementeerd is in een analytische bodemdalingsmodel (ExtendedSubcal). Dit kan gezien worden als een uitbreiding van SUBCAL met een zoutlaag van homogene dikte over het veld.

De andere methode gaat uit van een z.g. niet-lineair visco-elastisch model voor zout welke met behulp van eindig element modellering (TNO's DIANA) beschreven kan worden. Tevens kan van elke bestaande geologische laag apart de diktes en de geometrie ingevoerd worden. De gesteente mechanische eigenschappen (E en ν) zijn afgeleid uit gemiddelde gemeten seismische snelheden en gesteente dichtheden.

3.2 Reservoir compactie coëfficiënt

Voor het producerende reservoir (ROSLU) werden de Poisson's ratios en compactie coëfficiënt verkregen door middel van laboratorium compactie metingen op een beperkt aantal monsters van de Upper Slochteren formatie. Het merendeel van de beschikbare monsters had echter een vrijwel uniforme porositeit variërend tussen: 10 - 12% en zijn daarom niet geheel representatief voor het centrale deel van het Ameland veld. Daarom is een relatie tussen de compactie coëfficiënt (C_m) en de porositeit verkregen met behulp van mathematische inversie van de waterpas metingen. Hierbij worden dezelfde reservoir gegevens gebruikt (diepte, dikte, druk) als bij een bodemdalingsberekening, alleen wordt nu de compactie coëfficiënt verkregen in plaats van de bodemdaling. Tevens wordt er een porositeit verdeling van het veld ingevoerd zodat de compactie coëfficiënt als functie van de porositeit kan worden uitgedrukt. Voor het Ameland veld werd de volgende relatie verkregen: $C_m = 14 \cdot 10^{-5} \times \text{porositeit} - 1.1 \cdot 10^{-5}$, met C_m in 1/bar en porositeit in fracties.

3.3 Onzekerheid van de bodemdalingsberekening

De onzekerheid in de uiteindelijke bodemdalingsberekening wordt bepaald door de invoerparameters en het gebruikte model. Aangezien gegevens van de ondergrond, dat wil zeggen het reservoir en de bovenliggende lagen, vrijwel altijd verkregen worden door middel van indirecte metingen en interpretaties kan de te verwachten onzekerheid in de bodemdalingsberekening significant zijn. Onzekerheden worden met name gevonden in de drukgegevens (10-15%), de geometrie en dimensies van het veld (15%), de parameters van de bovenliggende lagen, zoals stijfheden en viscositeitseigenschappen van het zout (20%) en de compactie coëfficiënt (> 20%). Verder is er natuurlijk altijd een onzekerheid die het gevolg is van het gekozen berekeningsmodel, SUBCAL, ExtendedSubcal of DIANA, deze wordt geschat op zo'n 10%. Gebaseerd op deze geschatte onnauwkeurigheden, kan worden aangenomen dat iedere berekende bodemdaling een onzekerheid heeft van gemiddeld $\pm 20\%$.

Deze onzekerheid op het diepste punt in de daling versus tijd figuren is weergegeven door middel van een gearceerd gebied. De minimale te verwachten bodemdaling is aangegeven met een onderbroken

⁴ Fokker, P.: "The Behaviour of Salt and Salt Caverns"; Proefschrift TU-Delft, 24 januari 1995.

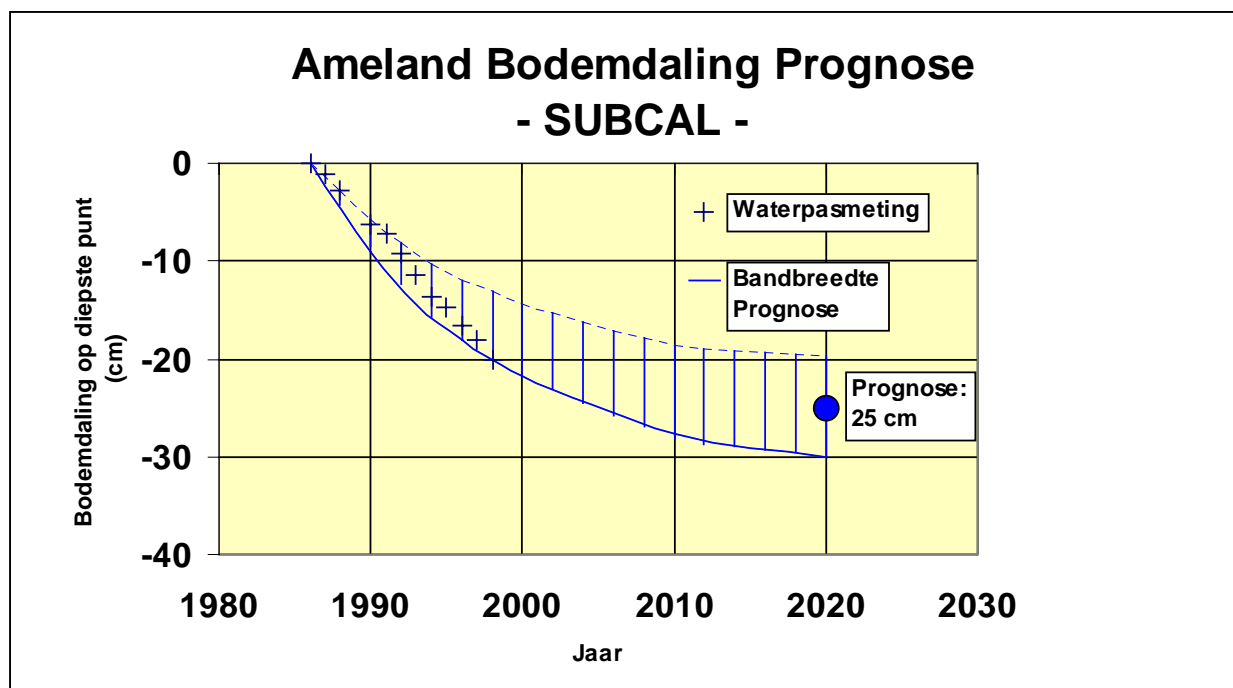
lijn aangezien het onwaarschijnlijk is dat deze waarde bereikt wordt. Deze grens is echter aangegeven omdat voor iedere berekening over het hele tijdsgebied een 'wetenschappelijke' onzekerheid van $\pm 20\%$ in de prognoses is verondersteld.

3.4 SUBCAL bodemdalingsprognose

SUBCAL is gebaseerd op het "Geertsma & Van Opstal Rigid Basement"⁵ model waarbij de reservoir compactie wordt omgezet naar een bodemdaling via de Poisson's ratio. Bij deze omzetting worden alle bovenliggende lagen als één uniforme laag beschouwd met dezelfde eigenschappen, welke elastisch deformeert. Het Rigid Basement is een op geologische gronden veronderstelde, niet deformerende, onderlaag welke in het geval van Ameland zich op 5000m diepte bevindt.

Een simulatie is uitgevoerd waarbij aangenomen is dat het hoog poreuze centrale deel van het veld een 10-40% hogere compactie ondervindt. In figuur 2 is de bodemdaling op het diepste punt van de kom weergegeven als functie van productie tijd. De resultaten laten zien dat het model de gemeten bodemdaling⁶ redelijk beschreven wordt tot 1997, maar daarna begint af te wijken. Wanneer een 20% onzekerheid wordt aangenomen, is te verwachten dat de waterpasmetingen na 1998 buiten het onzekerheidsinterval beginnen te vallen.

De uiteindelijke te verwachten bodemdaling op het diepste punt in 2020 zal, gebaseerd op het SUBCAL model, 25 ± 5 cm bedragen. Het te verwachten volume van de bodemdaling is $\pm 18 \times 10^6 \text{ m}^3$



Figuur 2: Subcal bodemdalingsprognose

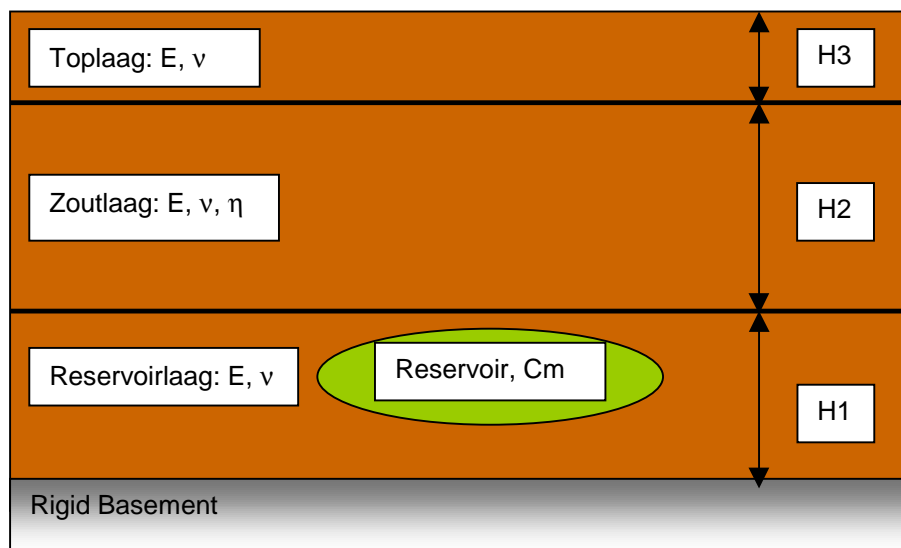
3.5 ExtendedSubcal bodemdalingsprognose

ExtendedSubcal is ontwikkeld door Imagineering LLC en is gebaseerd op het model van "Geertsma & Van Opstal Rigid Basement". Naast de onderste laag waar het reservoir zich in bevindt kunnen er twee bovenliggende lagen gedefinieerd worden van variërende dikte. De middelste laag representeert een zoutlaag welke zich lineair visco-elastisch gedraagt, dat wil zeggen er is een lineair verband tussen

⁵ Geertsema, J. & Van Opstal, G.: "A numerical technique for predicting subsidence above compacting reservoir, based on the nucleus of strain concept"; Verh. KNGMG, volume 28, P63-78, 1973.

⁶ Bodemdaling Ameland 1986 – 1998, NAM Topographical department, NAM rapport 199803000426.

vervorming en spanning ($\eta = 10^{17}$ Pa.s, ⁴). Voor alle lagen kunnen Young's moduli en Poissons ratio's worden gedefinieerd, het reservoir compacteert volgens de ingevoerde compactie coëfficiënt – porositeit relatie. Het model is schematisch weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: Schematische weergave ExtendedSubcal model.

Aangezien de lagen alleen met een uniforme dikte kunnen worden gedefinieerd is voor de Ameland studie een gemiddelde dikte van 1075 m aangenomen voor de zoutlaag (zie 3.1). Voor de top laag is een gemiddelde stijfheid aangenomen van 18.5 GPa, waarbij rekening is gehouden dat een deel van de top laag ook nog uit zout bestaat welke een Young's modulus heeft van 30 GPa en het andere deel een stijfheid heeft die varieert tussen de 2 en 16 GPa. Zie tabel 1.

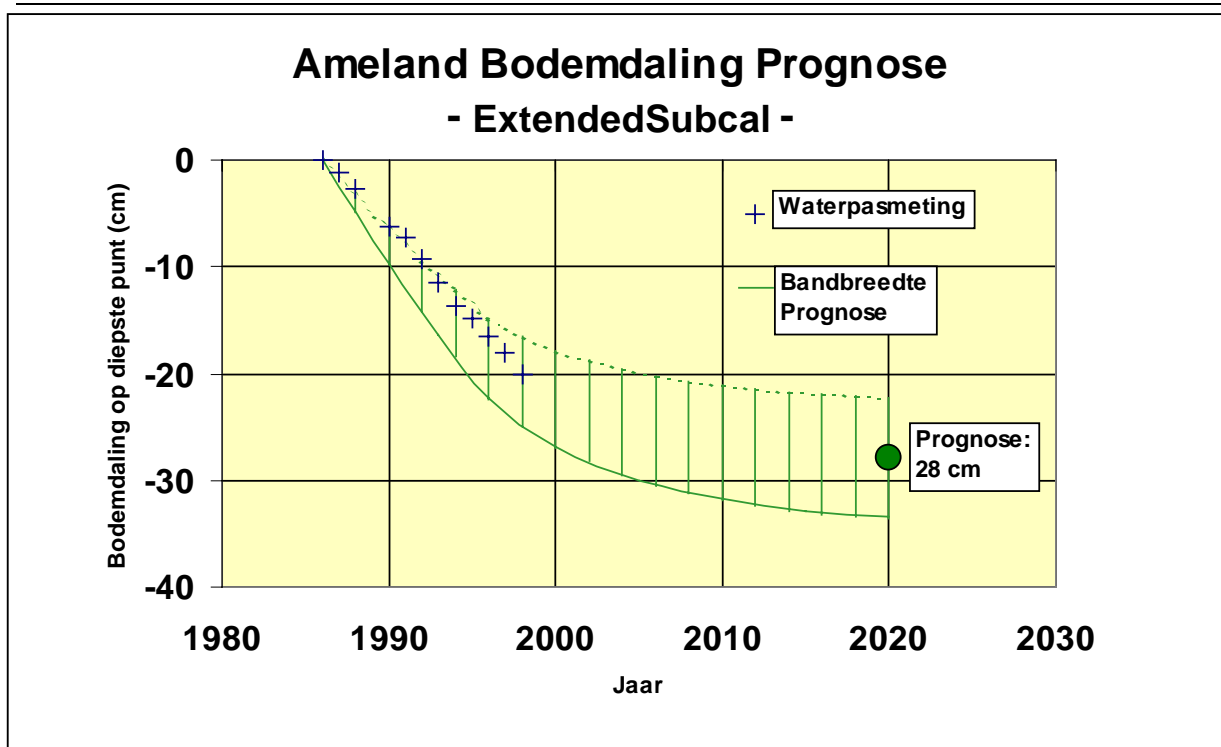
Laag	Dikte (m)	E (GPa)	v
Top	2100	18.5	0.25
Zout	1075	30	0.27
Reservoir	1825 (\pm 90 m reservoir)	16 (Cm – por. Relatie)	0.20

Tabel 1: Overzicht parameters zoals gebruikt in ExtendedSubcal

Figuur 4 laat de bodemdaling zien op het diepste punt, weergegeven door middel van een 20% onzekerheidsbandbreedte. De resultaten zijn gebaseerd op de reservoir gegevens zoals beschreven in 1.1 en 3.1 en de parameters van tabel 1, waarbij opgemerkt dient te worden dat na het jaar 2000 een wat uniforme drukverdeling in het centrum van het veld is verondersteld ten opzichte van de Subcal simulaties en een wat geleidelijker druk profiel naar de randen van het veld.

Het blijkt dat de gemeten bodemdaling redelijk overeenkomt met de resultaten van de simulatie, en merendeels binnen het 20% onzekerheidsinterval valt. De uiteindelijk te verwachten bodemdaling in het diepste punt is 28 cm \pm 6 cm.

Het uiteindelijke volume van de kom in 2020 is 18×10^6 m³. Wanneer we dit resultaat vergelijken met de prognoses van 1985 en 1991 kan geconcludeerd worden dat ondanks de toegenomen maximale bodemdaling op het diepste punt, het volume van de kom niet toeneemt. Ten opzichte van de prognose die in 1985 is uitgebracht neemt het volume zelfs af.

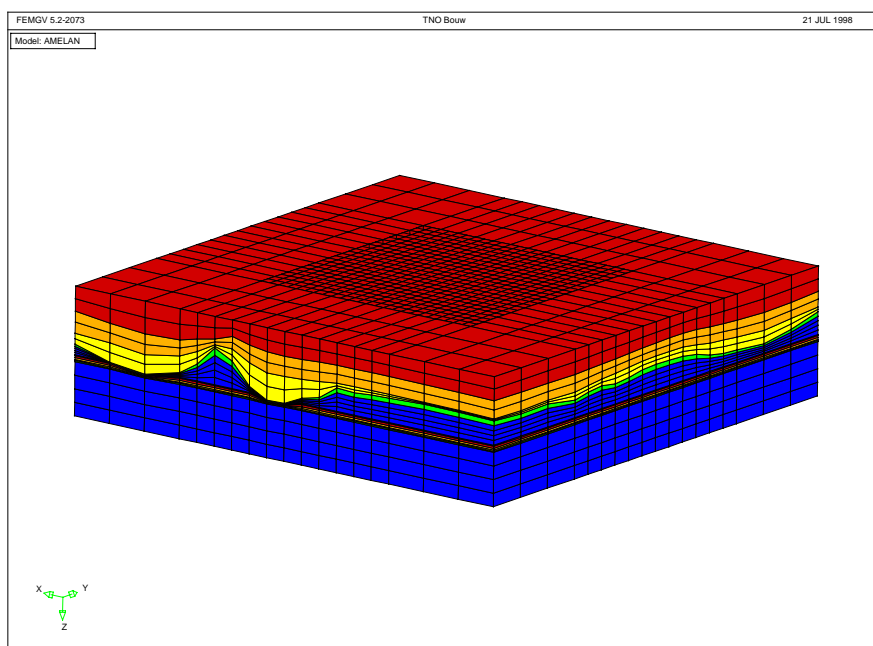


Figuur 4: ExtendedSubcal Bodemdalingsprognose

3.6 DIANA eindig element bodemdalingsprognose

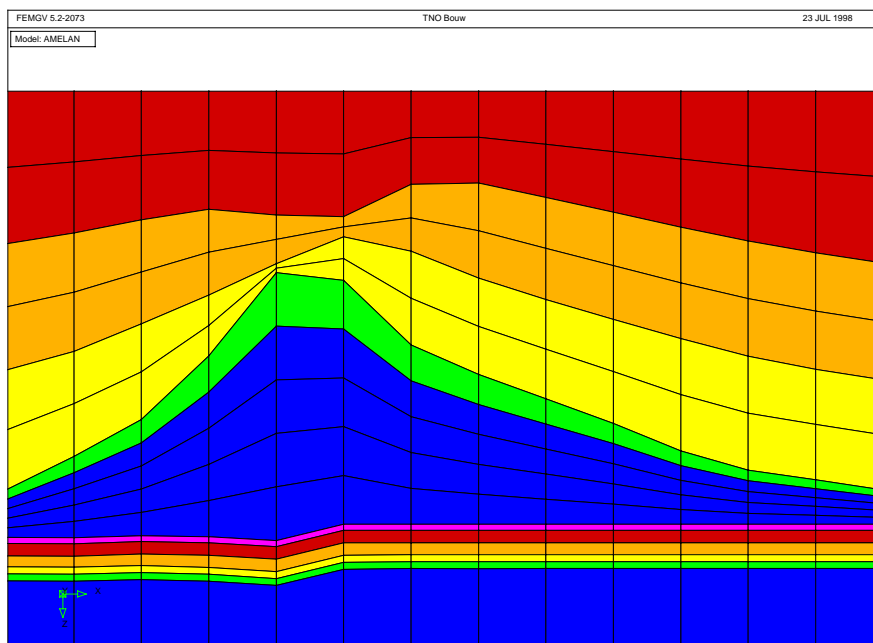
DIANA is een door TNO Bouw- en Constructie Research ontwikkelt "eindig element methode" (Finite Element Method, FEM). De methode is erop gebaseerd dat het reservoir en zijn bovenliggende lagen worden gediscrètiseerd in blokken (mesh), waarna er voor ieder knooppunt de deformatie als functie van de belasting (in dit geval drukverschil) wordt berekend.

Figuur 5 laat het 3-dimensionale model zien zoals gebruikt voor de bodemdalingsberekening van Ameland. Het totale model bestaat uit ongeveer 15000 blokken, waarbij in het gebied van het reservoir een fijnmazig mesh gebruikt is met blokafmetingen van 500 x 500m. Dit betekent dat in het horizontale vlak zich $24 \times 24 = 576$ blokken bevinden. Buiten het reservoir gebied hebben de blokken een afmeting variërend van 1 x 2 tot 2 x 2 km. In het verticale vlak zijn de grid-punten bepaald door de diktes van de diverse lagen.



Figuur 5: Model Ameland DIANA “eindig element methode”

Een oost-west doorsnede (figuur 6) laat zien hoe in het model de variërende laagdiktes zijn ingebracht. Van de onderste dunne lagen is de derde laag vanonder (oranje) het producerend reservoir, ROSLU. De blauwe in dikte variërende laag is het Zechstein zout en de groene laag daarboven is de carnaliet/bischofiet laag. Wanneer de representatie in figuur 6 vergeleken wordt met de geologische doorsnede van figuur 1 kan geconcludeerd worden dat er een goede overeenkomst bestaat.



Figuur 6: Oost-west doorsnede DIANA FEM model Ameland

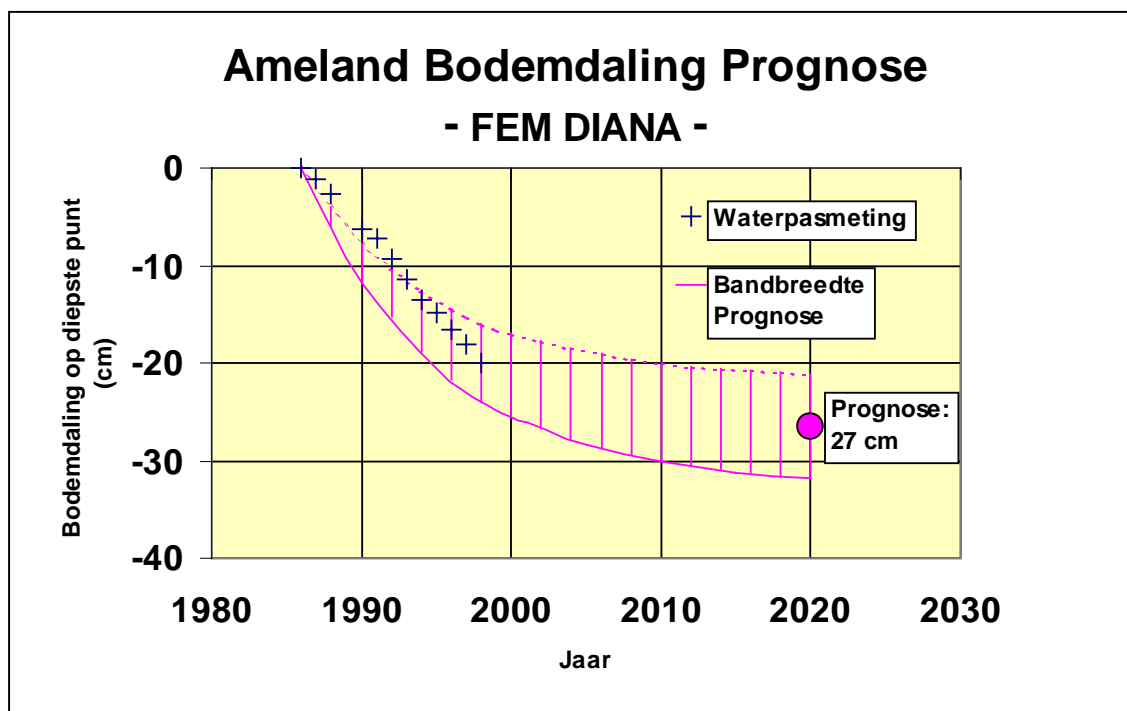
De gesteente mechanische eigenschappen van de belangrijkste groepen van lagen zijn weergegeven

in tabel 2. Verder zijn voor zowel de Zechstein als carnalliet en bischofiet niet-lineaire visco-elastische modellen en parameters gebruikt zoals beschreven en geverifieerd door Fokker⁴.

Laag	E (GPa)	ν
North Sea tot zout (ZEZ4)	2 – 16	0.17 – 0.30
Zoutlagen:		
Carnalliet (ZEZ4):	1.8	0.35
Bischofiet (ZEZ4):	5.5	0.35
Haliet (Zechstein, ZEZ3):	30	0.35
Anhydriet (ZEZ2):	50	0.35
Ten Boer	18	0.18
Reservoir ROSLU	16 (Cm – por. relatie)	0.20
Onderliggende lagen	20 - 23	0.20 – 0.28

Tabel 2: Overzicht parameters zoals gebruikt in DIANA FEM

Voor de reservoir parameters en het productiescenario zijn de gegevens zoals beschreven in 1.1 en 3.1 gebruikt. Figuur 7 laat zien dat met het model het verloop van de bodemdaling op het diepste punt aanvankelijk wat minder maar later redelijk beschreven wordt. De uiteindelijke te verwachten maximale bodemdaling in 2020 is 27 cm welke in goede overeenstemming is met de 28 cm zoals berekend met behulp van ExtendedSubcal. Wanneer de 20% onzekerheid wordt verondersteld resulteert dit in een bandbreedte van 27 ± 5 cm. Het volume van de bodemdalingssom is kleiner vergeleken met de som verkregen met behulp van ExtendedSubcal en wordt berekend op $\pm 14 \times 10^6 \text{ m}^3$. Dit lagere volume is toe te schrijven aan de keuze van de totale afmetingen van het fijne mesh.



Figuur 7: DIANA eindig element bodemdalingsprognose.

4. Overzicht resultaten bodemdalingsprognoses

Figuur 8 laat een overzicht van prognoses zien zoals die verkregen zijn met behulp van de verschillende modellen, het 20% onzekerheidsinterval is gebaseerd op de ExtendedSubcal simulaties aangezien dit model de beste beschrijving geeft van de historische waterpas metingen. Geconcludeerd kan worden dat alle eindwaarden voor het jaar 2020 binnen de 20% bandbreedte vallen.

Teneinde een betere indruk te krijgen van wat de "maximaal mogelijke bodemdaling" op het diepste punt zou kunnen zijn met het huidige reservoir model ('worst case scenario'), is een DIANA simulatie uitgevoerd waarbij aangenomen is dat het gehele veld tot 40 bar gedepleteerd is. Het resultaat in figuur 8 (FEM MAX) laat zien dat de maximale te verwachten bodemdaling voor de 'worst case scenario' in 2020, 32 cm zal zijn.

Wanneer de resultaten vergeleken worden van de twee modellen waarbij de zoutlaag(en) gemodelleerd zijn (dwz ExtendedSubcal en DIANA) kan geconstateerd worden dat deze redelijke overeenkomen (1 cm verschil). Hieruit volgt dat het effect van het gekozen zout-viscositeitsmodel weinig gevolgen heeft voor de bodemdalingsprognose. Dit zou erop kunnen wijzen dat niet het viscositeits-, cq vervormings-, gedrag van het zout een dominante rol speelt maar dat de uiteindelijke bodemdaling bepaald wordt door de variërende gesteente mechanische eigenschappen van alle bovenliggende lagen.

Tabel 3 geeft een overzicht van zowel de historische als huidige bodemdalingsprognoses. Geconcludeerd kan worden dat alle huidige studies een grotere te verwachten bodemdaling in 2020 laten zien ten opzichte van de in 1991 uitgebrachte prognose, ten opzichte van de 1985 prognose is het verschil beperkt tot hooguit 2 cm. Echter, de 1985 prognose is gebaseerd op een ander reservoir compactie model en derhalve niet geheel te vergelijken met alle latere studies.

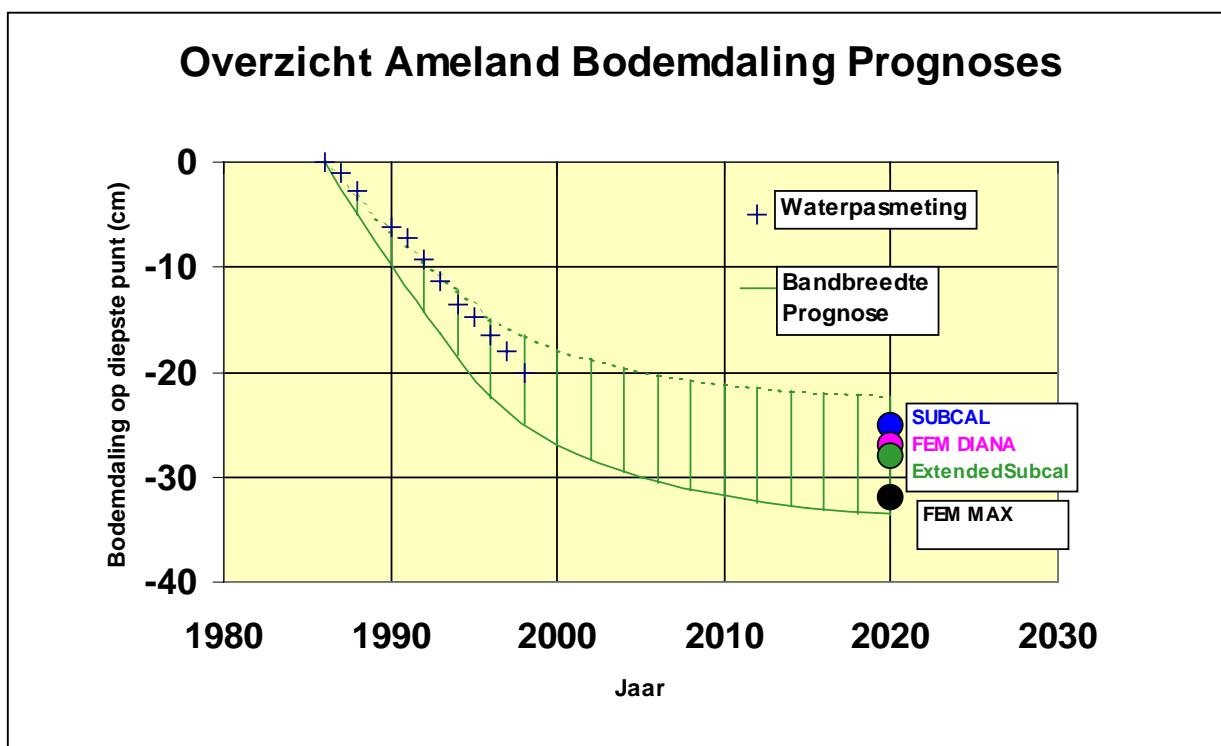
Wat betreft de geprognosticeerde bodemdalingskom volumina blijkt dat het volume zoals berekend met DIANA lager is dan het volume berekend met ExtendedSubcal. Deze verschillen zijn toe te wijzen aan het gebruik van de diverse modellen. Het te verwachten volume van de bodemdalingskom zal daarom variëren tussen 14 en 18 x 10⁻⁶ m³.

Wanneer de diverse berekende volumina ('85, '91, '98) vergeleken worden blijkt dat ondanks dat de bodemdaling op het diepste punt in 2020 zal toenemen het volume van de kom niet zal toenemen. Hieruit volgt dat het oppervlak wat onderhevig is aan bodemdaling iets kleiner zal zijn. Wanneer de bodemdalingscontouren in figuur 9 (zie achter in rapport) geanalyseerd worden en vergeleken met de prognoses uitgebracht in 1991 en 1985 (zie ^{1,2}) dan bereikt de buitenste 2 cm contourlijn bij de huidige prognose niet het vaste land.

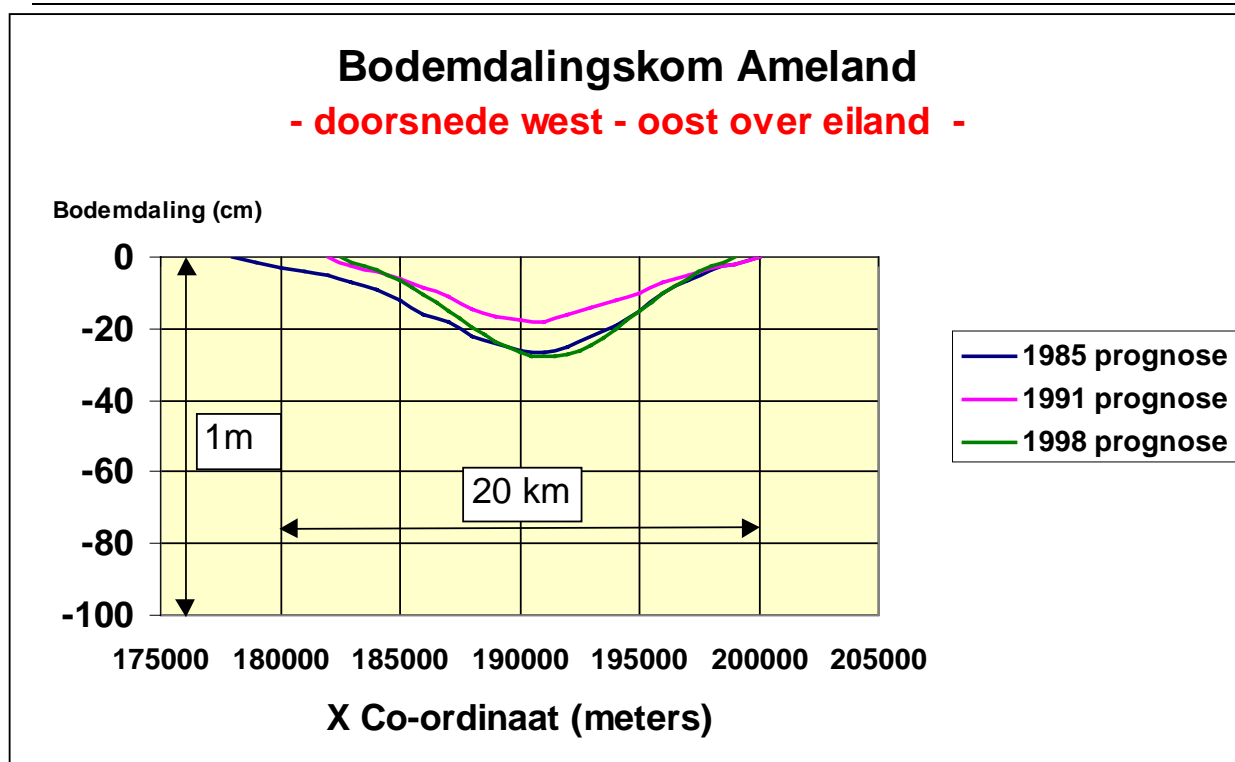
Het bovenstaande wordt bevestigd wanneer in figuur 10 de doorsneden van de bodemdalingskommen met elkaar vergeleken worden. De 1985 prognose laat een brede diepe kom van 26 cm zien wat verklaarbaar is door de aanname van een hoge compactie coëfficiënt en de veronderstelling dat alle velden in productie zouden worden genomen. De 1991 prognose gaat uit van een lagere compactie coëfficiënt die uniform is over het veld met minder velden in productie, dit resulteert in een brede, minder diepe bodemdalingskom. De huidige (1998) prognose laat een diepere kom zien wat een gevolg is van de porositeit afhankelijke compactie coëfficiënt en betere beschrijving van de bovenliggende lagen. Dit resulteert echter ook in een iets minder brede kom ten opzichte van de 1985 en 1991 prognoses.

HISTORIE:			
	Prognose 1985		Prognose 1991
Bodemdaling	26 ± 5 cm		18 ± 4 cm
Volume kom	28 x 10 ⁶ M ³		18 x 10 ⁶ M ³
1998 STUDIES:			
	SUBCAL	ExtendedSubcal	FEM (DIANA)
Bodemdaling "base case"	25 • 5 cm	28 • 6 cm	27 • 5 cm
Volume kom	18 x 10 ⁶ M ³	18 x 10 ⁶ M ³	± 14 x 10 ⁶ M ³

Tabel 3: Overzicht bodemdalingsprognoses: daling op het diepste punt en volume kom in 2020.



Figuur 8: Overzicht bodemdalingsprognoses: daling diepste punt als functie van produktietijd.

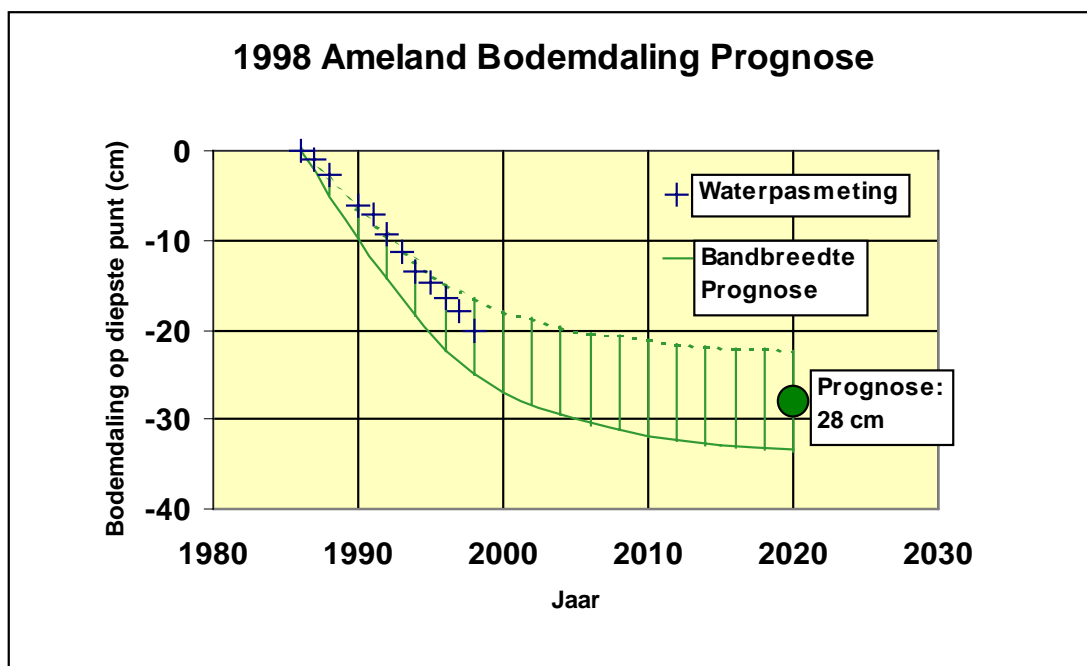


Figuur 10: Doorsnede bodemdalingskommen Ameland

5. Conclusies en de 1998 Ameland bodemdalingsprognose

- Uit de huidige studies naar de verwachte bodemdaling ten gevolge van aardgasproductie van het Ameland veld volgt dat de uiteindelijke bodemdaling in 2020 op het diepste punt 28 • 6 cm zal bedragen. Het volume van de bodemdalingskom zal dan • $18 \times 10^6 \text{ m}^3$ bedragen.
- Het meest waarschijnlijke verloop van de bodemdaling met produktietijd staat weergegeven in figuur 11 waarbij een 20% onzekerheid in acht is genomen. Deze prognose is gebaseerd op het ExtendedSubcal model aangezien dit model het beste de historische waterpasmetingen beschrijft.
- Twee modellen, ExtendedSubcal en DIANA eindig element methode, die beide het deformatiegedrag van een zoutlaag beschrijven zijn gebruikt om de te verwachten bodemdaling te modelleren. Het blijkt dat ExtendedSubcal het best de historische waterpasmetingen beschrijft.
- De bodemdalingsprognoses van het diepste punt in 2020, verkregen met de twee verschillende modellen, ExtendedSubcal en DIANA komen goed overeen, respectievelijk 28 en 27 cm.
- Zowel de SUBCAL simulatie met een iets hogere C_m in het centrale deel als de DIANA simulatie waarbij het totale veld tot 40 bar is gedepleteerd, resulteren in een bodemdaling die binnen de 20% onzekerheid bandbreedte vallen, respectievelijk 25 en 32 cm.
- De huidige studies geven een grotere te verwachten bodemdaling in 2020 ten opzichte van de in 1991 uitgebrachte prognose. Ten opzichte van de 1985 prognose is het verschil beperkt tot 2 cm. Echter, de 1985 prognose is gebaseerd op een totaal ander reservoir compactie model en derhalve niet geheel te vergelijken met alle latere studies.

- Wat betreft de geprognosticeerde bodemdalingskom volumina blijkt dat het volume zoals berekend met DIANA iets lager is dan het volume berekend met ExtendedSubcal. Deze verschillen zijn te wijten aan het gebruik van de diverse modellen. Het te verwachten volume van de bodemdalingskom zal daarom variëren tussen 14 en $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3$.
- Wanneer de berekende bodemdalingskom-volumina van 1985 en 1991 vergeleken worden met de huidige, dan blijkt dat ondanks dat de bodemdaling op het diepste punt in 2020 zal toenemen, het volume van de kom niet toeneemt maar gelijk blijft aan de 1991 prognose en lager is dan de in 1985 rapporteerde waarde. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het oppervlak dat onderhevig is aan bodemdaling kleiner zal zijn dan oorspronkelijk verwacht.



Figuur 11: De 1998 Ameland Bodemdaling Prognose

SUMMARY 1998 AMELAND SUBSIDENCE PROGNOSIS

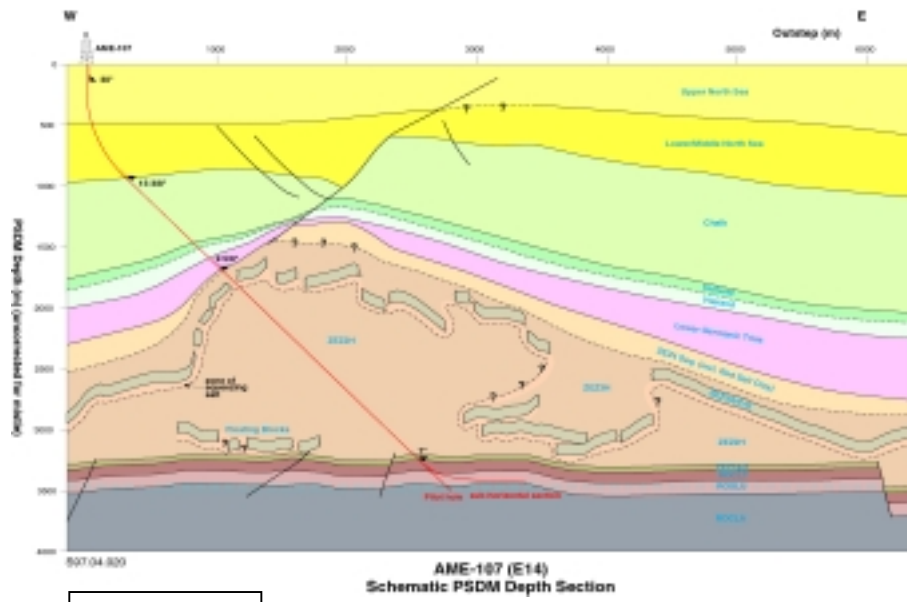
Over the past years two subsidence prognoses have been issued for the Ameland field. The 1985 prognosis was based on the assumption that all fields of the Ameland area would be produced to an abandonment pressure of 115 bar. Also, the so-called "Rate Type Compaction Model" was used to describe reservoir compaction. This study resulted in an ultimate expected subsidence of 26 ± 5 cm at the deepest point.

The second study was presented to the Inspecteur-Generaal der Mijnen in 1991 and was based on the fact that only Ameland-Oost and – Westgat are being produced to an abandonment pressure of 40 bar in the centre of the reservoir (compression). In addition the linear compaction model was used, which was based on experience obtained for the 1990 Groningen subsidence study, supported by a 'second opinion' of MIT. This resulted in a lower value for the compaction coefficient compared to the one used in 1985 and an expected ultimate subsidence of 18 ± 4 cm.

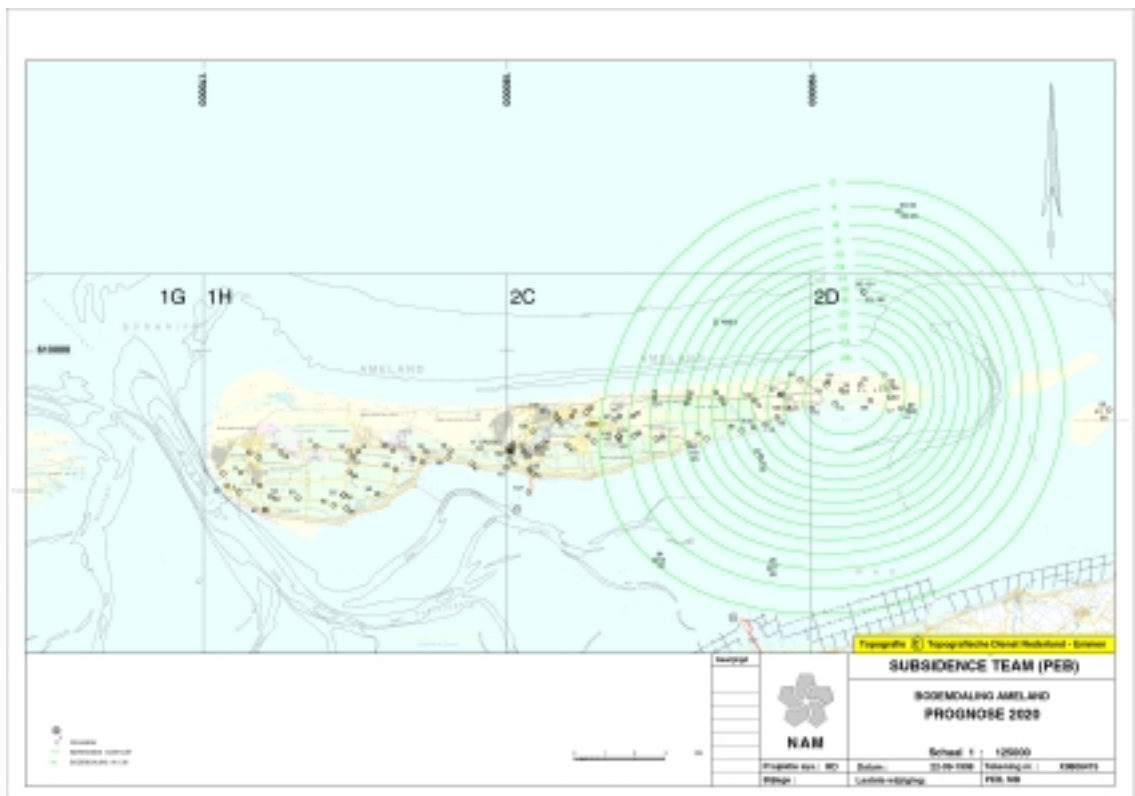
During recent years, it has been observed that the 1991 subsidence prognosis was not fully supported by the measured subsidence at the deepest point. Therefore it has been decided to carry out a comprehensive subsidence study using an especially for NAM developed new analytical model: ExtendedSubcal. By means of ExtendedSubcal it is possible to model the saltlayer as occurring above the Ameland reservoir. In addition, a finite element analysis (DIANA) has been conducted by TNO – Building and Construction Research. Here the compacting reservoir and all layers in the overburden can be described in great detail.

The above mentioned studies have resulted into the following conclusions:

- The ultimate subsidence at the deepest point of the bowl above the Ameland field will amount to 28 ± 6 cm. A 20% uncertainty of the subsidence calculations has been assumed.
- The subsidence at the deepest point in 2020 obtained by two different models, i.e. ExtendedSubcal and DIANA, are in good agreement and result in 28 and 27 cm respectively. Moreover, the SUBCAL simulation using a slightly higher compaction coefficient in the centre of the field results in a maximum subsidence of 25 cm which is also within the 20% uncertainty interval.
- All present studies yield a higher expected subsidence in 2020 compared to the prognosis issued in 1991. Compared to the 1985 prognosis the difference is limited to 2 cm only. However this study was based on another reservoir compaction model and therefore not entirely comparable.
- The expected volume of the subsidence bowl will vary between 14 en 18×10^6 m³.
- When the calculated bowl-volumes of 1985 and 1991 are compared with the current prognosis, it can be concluded that, although the subsidence at the deepest point will increase the volume of the bowl does not increase but even decreases compared to the prognosis issued in 1985. The result is that the currently expected area affected by subsidence in 2020 will be slightly less, again compared to the prognoses of 1991 and 1985.



Figuur 1



Figuur 9