Bodembewegingsanalyse, -modellering en -prognose

Winningsvergunning Bergen II, Opslagvergunningen

Gasopslag Bergermeer en Alkmaar PGI

ECM # 187610

Juli 2017

TAQA Energy B.V.

Sign.	Date	Sign.	Date	Sign.	Date	Sign.	Date
[redacted]							
Geologist		Senior Permitting Advisor, Senior Geologist		Deputy Subsurface Manager		Technical Manager	
Prepared		**Reviewed**		**Approved**		**Authorized by**	

1 SAMENVATTING

Eén van de verantwoordelijkheden van TAQA Energy B.V. is om de bodembeweging te monitoren en na te gaan in hoeverre de bodemweging het gevolg is van gasproductie of -opslag. Om de effecten van toekomstige bodembeweging op de waterhuishouding en het milieu te beoordelen is een prognose nodig van de verwachte bodembeweging veroorzaakt door gasproductie en -opslag. De bodemdaling in de Bergen II Winningsvergunning wordt sinds 1972 gemeten door middel van ± 5-jaarlijkse waterpassingsmeetcampagnes. De bodembeweging boven het Bergermeerveld (opslag) wordt sinds 2013 gemeten met vier GPS stations.

Voor onderhavige prognose van de bodemdaling wordt de bodembeweging gemodelleerd door gebruik te maken van de 'Geertsema en van Opstal' methode [4,5]. Door de bodembeweging te modelleren voor de jaren dat er waterpassingsmeetcampagnes zijn uitgevoerd kan het model gekalibreerd worden met de daadwerkelijk gemeten bodemdaling. Dit gekalibreerde model kan vervolgens gebruikt worden om een prognose van de totaal verwachte bodemdaling te maken.

Tot 2006 kan de gemodelleerde bodemdaling goed gekalibreerd worden met de gemeten bodemdaling. Na het significant afnemen van de drukdaling in de gasvelden Groet en Bergen zet de bodemdaling door. Deze tijdsafhankelijke bodemdaling is afgenomen in de periode 2011-2016 en kan verklaard worden door compactie kruip en/of tijdsafhankelijke drukdaling in de watervoerende laag onder of naast deze beide gasvelden. Dit effect is ook waarneembaar in de periode 2006-2011 in het Bergermeer Gasveld.
Naast dit tijdsafhankelijke effect lijkt het Bergermeer Gasveld zich stijver te gedragen tijdens de opslagfase (2007-heden) dan tijdens de depletiefase (1972-2006). Per bar drukverschil is de bodembeweging geringer tijdens de opslagfase dan tijdens de depletiefase.
Naast bodembeweging die toegewezen kan worden aan gaswinning en -opslag wordt er in de Bergen Winningsvergunning ook autonome bodemdaling waargenomen.

Er zijn twee scenario's gemodelleerd voor de verwachte bodemdaling als gevolg van gaswinning en gasopslag. Het opslag scenario waarbij de gasvelden Bergermeer en Alkmaar PGI als opslag gebruikt worden én het scenario waarbij het gebruik van deze beide opslagen beëindigd is en het gas uit de gasopslagen onttrokken is (werkgas en kussengas). In beide scenario's wordt de druk van de overige gasvelden verlaagd tot de verwachte einddruk. De grootste bodemdaling wordt boven het Groet gasveld gemodelleerd en bedraagt 14.5cm.

Inhoud

1 SAMENVATTING 1

2 INLEIDING 3

3 WATERPASSING EN GPS 5

3.1 Meetonzekerheid 7

4 METHODE 7

4.1 Inputparameters 8

4.1.1 Veldcontouren 8

4.1.2 Diepteligging veld 8

4.1.3 Dikte reservoir 9

4.1.4 Compactiecoëfficiënt 9

4.1.5 Rigide basement factor 9

4.1.6 Poisson's ratio 10

4.1.7 Gemiddelde reservoir druk 11

5 MODELKALIBRATIE 12

5.1 Tijdsafhankelijke bodembeweging 12

5.1.1 Bergen 12

5.1.2 Groet 16

5.1.3 Bergermeer 20

5.1.4 Discussie tijdsafhankelijke bodembeweging 21

5.1.5 Tijdsafhankelijke bodembeweging modelleren 22

5.2 Resultaten bodembewegingsmodellering 23

5.2.1 Bodembeweging boven het Zuid-Schermer en Starnmeer Gasveld 29

6 AUTONOME BODEMDALING IN DE BERGEN II WINNINGSVERGUNNING EN OMGEVING 29

6.1 Bodemdaling in kring 27 32

6.2 Alkmaar en Heiloo 35

6.3 Rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) Geestmerambacht 36

6.4 Hondsbossche Zeewering 37

7 BODEMDALINGSPROGNOSE 39

8 CONCLUSIE 44

9 REFERENTIES 45

10 BIJLAGE 45

2 INLEIDING

Eén van de verantwoordelijkheden van TAQA Energy B.V. is om de bodembeweging te monitoren en na te gaan in hoeverre de bodemweging het gevolg is van gasproductie of -opslag. Om de effecten van toekomstige bodembeweging op de waterhuishouding en het milieu te beoordelen is een prognose nodig van de verwachte bodembeweging veroorzaakt door gasproductie en -opslag. Om de effecten van toekomstige bodembeweging op de waterhuishouding en het milieu te beoordelen is een prognose nodig van de verwachte bodembeweging veroorzaakt door gasproductie en -opslag. Dit document beschrijft de achtergronden van deze bodembewegingprognose.

Sinds de jaren zeventig wordt er gas gewonnen in de Bergen Winningsvergunning (voorheen: *Concessie*). Figuur 1 laat de ligging van de gasvelden zien. De gasreservoirs liggen op een diepte tussen de 1500m en 2500m en bestaan uit poreuze zandstenen of dolomieten. De gasproductie gaat gepaard met drukdaling in de gasreservoirs. Doordat de druk in de gasreservoirs afneemt compacteert het reservoir (inklinking). Deze inklinking resulteert aan de oppervlakte in bodemdaling. De bodemdaling wordt sinds 1972 om de ± vijf jaar gemeten door middel van waterpas meetcampagnes.

Sinds 1997 is het Alkmaar gasveld in operatie (Piekgasinstallatie PGI) als gasopslag en sinds 2013 ook het Bergermeer gasveld (Gasopslag Bergermeer GSB). Doordat de druk in deze velden niet alleen daalt maar ook stijgt treedt er naast compactie ook expansie (uitzetting) van het gasreservoir op. Deze expansie resulteert aan de oppervlakte in bodemstijging. Sinds 2013 staan er vier GPS stations in de nabijheid van het Bergermeer veld. Deze GPS stations meten een bodembeweging (stijging en daling) boven het Bergermeer gasveld die goed gecorreleerd kan worden met het drukverloop in het gasreservoir.

De mate van compactie en expansie is afhankelijk van een aantal factoren zoals reservoirdikte, gesteente-eigenschappen, drukdaling en omvang van het gasveld. Hoe deze compactie zich vertaalt aan de oppervlakte is afhankelijk van de vorm van het gasveld en de diepte waarop het gasveld zich bevindt. In een klein veld zal veel minder compactie optreden dan in een groot veld zoals Bergermeer.

De bodembeweging is aan de oppervlakte komvormig en strekt zich verder uit dan de grenzen van het gasveld. Doordat in de Bergen Concessie een aantal velden dicht bij elkaar ligt, overlappen deze bodembewegingskommen en is er één gezamenlijke bodembewegingskom ontstaan.

Figuur 1 overzichtskaart van de ligging van de Gasvelden. In roze de Slochteren Zandsteen gasvelden, in paars de Platten Dolomiet gasvelden en in geel/oranje de Bunter Zandsteen gasvelden. Het Bergermeer gasveld is een Slochteren Zandsteen reservoir en het Alkmaar PGI veld is een Platten Dolomiet gasveld.

3 WATERPASSING EN GPS

De bodemdaling in de Bergen Winningsvergunning wordt elke vijf jaar gemeten door middel van een waterpassingsmeetcampagne. De bodemdaling wordt gemeten ten opzichte van een aansluitpunt (referentiepunt). Het aansluitpunt van het meetnet is in Figuur 2 aangegeven met een gele ster. Vanuit dit aansluitpunt worden de (NAP) peilmerkers in kringen gemeten. In Nederland zijn er ongeveer 35.000 peilmerkers aangebracht, deze zijn verankerd in huizen, bruggen en viaducten. De gemeten waterpastrajecten ook wel kringen genoemd zijn in blauw aangegeven in Figuur 2.
Er wordt in kringen gemeten zodat er gecontroleerd kan worden of de metingen goed worden verricht. Als de kring gesloten wordt moet het eerste peilmerk op dezelfde hoogte gemeten worden als tijdens de eerste meting. Er wordt van uitgegaan dat de peilmerkers verankerd zijn aan stabiele objecten die goed gefundeerd zijn. Doordat ze goed verankerd zijn, zou autonome bodemdaling geen effect op de hoogte van deze peilmerkers mogen hebben. Uit de bodemdalinganalyse die hierna volgt, blijkt dat er gebieden zijn waar de bodemdaling niet te correleren is aan gaswinning. Aannemelijk wordt gemaakt dat autonome bodemdaling hier de peilmerkhoogtes heeft beïnvloed.

Het is Rijkswaterstaat opgevallen dat veel peilmerkers niet stabiel zijn [1]; daarom zijn er in Nederland 400 ondergrondse peilmerkers aangebracht. In het meetnet van de Bergen Winningsvergunning (zie bijlage 1) zijn zeven van deze ondergrondse peilmerkers aanwezig. Deze zijn aangebracht in de periode 1997-2016. Eén van deze ondergrondse peilmerkers heeft data over meerdere waterpascampagnes.
Naast de waterpasmetingen zijn er in de Bergen Concessie vier GPS stations geplaatst die de bodemdaling continu meten (Figuur 2). Deze GPS stations zijn in 2013 als onderdeel van de realisatie van de Gasopslag Bergermeer geplaatst om de bodemdaling en -stijging van de Gasopslag Bergermeer te kunnen monitoren. In paragraaf 5.1.4 wordt hier dieper op ingegaan.

Figuur 2 Overzichtskaart waterpasmeting. De gele ster geeft het aansluitpunt aan, de vier gele cirkels geven de locaties van de GPS stations aan, de gele vierkantjes de ondergrondse peilmerkers met data over meerdere waterpassingsmeetcampagnes en in het blauw de gemeten waterpastrajecten (kringen).[6]

3.1 Meetonzekerheid

93% van de peilmerkers vallen in de hoogste stabiliteitsklasse[6]. De hoogste stabiliteitsklasse heeft een drift van ±0.5 mm/jaar met een gemiddelde van 0.2 mm/jaar. Dit geeft aan dat er voor een peilmerk dat vanaf 1972 tot 2016 gemeten is er gemiddeld een drift van (2016-1972)*0.2 = 8.8 mm is opgetreden.

Elk peilmerk heeft een meetruis die afhankelijk is van de afstand van het peilmerk tot het aansluitpunt, gegeven door $Em = 1 * \sqrt{L}$ met L= lengte in kilometer. Ter vereenvoudiging gaan we er vanuit dat de afstand 10 km is voor elke peilmerker. Dit levert een meetruis op van 3.2 mm.

De meetonzekerheid komt neer op de wortel van de kwadraten van de drift en de meetruis: $meetonzekerheid = \sqrt{Ed^2 + Em^2}$.

De meetonzekerheid van de GPS stations is 0.5 cm [7].

4 METHODE

Het bodemdalingsmodel is gebaseerd op de 'Geertsema en Opstal Regide Basement' methode [4]. Het achterliggende MATLAB script is ontwikkeld door TNO [2]. Dit script is door TAQA aangepast zodat het script de bodemdaling kan modelleren voor verschillende velden (productie en opslag) tegelijk. Door gebruik te maken van verschillende inputparameters (zie paragraaf 4.1) in het model wordt de reservoircompactie en -expansie vertaald naar bodembeweging aan de oppervlakte.

Door het model de bodemdaling te laten modelleren voor de jaren dat er waterpascampagnes werden uitgevoerd, kan de gemodelleerde bodemdaling van het model vergeleken worden met de gemeten bodemdaling. Door de inputparameters aan te passen - tussen gangbare waarden - kan het model gekalibreerd worden. Met een gekalibreerd model kan de totale bodemdaling geprognosticeerd worden.

4.1 Inputparameters

Hieronder volgt een uitleg van de verschillende parameters die in het model gebruikt zijn. In Tabel 1 zijn de input parameters voor de beste match weergegeven.

Gasveld	Reservoir Eenheid	Diepte ligging veld (m)	Dikte reservoir (m)	Compactie Coëfficiënt (bar^{-1})	Regide Basement Factor	Poisson	Einddruk (bar)	Minimale druk opslag (bar)
Alkmaar	Platten	1966	45	$3.5*10^{-6}$	1.7	0.25	10	170
Bergen Slochteren	Slochteren	2075	216	$5.7*10^{-6}$	1.5	0.18	10	-
Bergen Bunter	Bunter	1422	22	$3.5*10^{-6}$	1.9	0.25	10	-
Bergermeer	Slochteren	2172	216	$5.3*10^{-6}$	1.5	0.18	10	77
Boekel	Bunter	1569	22	$3.5*10^{-6}$	1.9	0.25	23	-
Groet	Slochteren	2156	216	$6.3*10^{-6}$	1.5	0.18	10	-
Groet Oost	Slochteren	2242	216	$6.5*10^{-6}$	1.5	0.18	90	-
Schermer Platten	Platten	2125	45	$3.5*10^{-6}$	1.7	0.25	60	-
Schermer Slochteren	Slochteren	2375	216	$6.5*10^{-6}$	1.05	0.18	57	-
Starnmeer	Platten	1993	45	$3.5*10^{-6}$	1.7	0.25	138	-
Zuid Schermer	Platten	2115	45	$3.5*10^{-6}$	1.7	0.25	155	-
West Beemster	Slochteren	2172	216	$6.5*10^{-6}$	1.5	0.18	10	-

Tabel 1 Overzicht van inputparameters.

4.1.1 Veldcontouren

In het model worden de coördinaten van elk veld ingevoerd. De ruimtelijke afmeting van de velden is gebaseerd op de nieuwste seismische interpretatie, uitgevoerd op de her-geproduceerde seismiek uit 2011. Veel velden worden begrensd door breuken. De locatie onnauwkeurigheid van het deze breuken is ongeveer 100 m. Naast drukafname in de velden zorgt drukafname in de aquifer ook voor compactie[1]. Uit drukdata blijkt dat Bergermeer en Groet-Oost een aquifer hebben waarin ook drukdaling plaatsvindt. Deze aquifers zijn opgenomen in het model.

4.1.2 Diepteligging veld

Voor elk veld is de gemiddelde top reservoir diepte meegenomen als inputparameter. Deze parameter is niet gebruikt om het model te kalibreren

[1] Een aquifer is het gedeelte van het reservoir waar geen gas in zit, maar water.

4.1.3 Dikte reservoir

De diktes van de reservoirs zijn goed bekend in de Bergen Winningsvergunning voor de verschillende reservoireenheden. Deze parameters zijn niet gebruikt om het model te kalibreren.

4.1.4 Compactiecoëfficiënt

De compactiecoëfficiënt geeft aan hoeveel compactie er optreed bij één bar drukafname. Het is gebleken dat de bodemdaling niet te kalibreren is met eenzelfde compactiecoëfficiënt voor elk veld. In de Bergen Winningsvergunning wordt/werd gewonnen uit verschillende reservoireenheden, namelijk: de Bunter Zandsteen, de Platten Dolomiet en de Slochteren Zandsteen. Deze reservoireenheden hebben andere eigenschappen voor porositeit, stijfheid, permeabiliteit en net/gross. Doordat ze verschillende eigenschappen hebben, hebben de verschillende reservoireenheden ook een verschillende compactiecoëfficiënt. Zo is de Platten Dolomiet veel stijver dan de Slochteren Zandsteen. Niet alleen is er een verschil in eigenschappen tussen de verschillende reservoireenheden, er is ook een verschil in reservoireigenschappen tussen velden bestaand uit dezelfde reservoireenheid. Dit heeft tot gevolg dat elk veld een specifieke compactiecoëfficiënt heeft.

4.1.5 Rigide basement factor

Het rigide basement is een aangenomen niet-deformeerbare onderlaag, die in de Bergen Winningsvergunning op een diepte van 3 tot 4 km ligt. Door de diepte in het model aan te passen verandert de vorm van de dalingskom. Het rigide basement wordt aangeduid met de factor K. Door deze factor met de reservoirdiepte te vermenigvuldigen wordt de afstand tot de rigide basement berekend. Figuur 3 laat zien wat de invloed van de rigide basement factor op de komvorm is: hoe hoger deze waarde is, hoe breder de dalingskom wordt. Door deze parameter aan te passen kan het model gekalibreerd worden met de gemeten bodemdaling.

Figuur 3 Invloed van de K factor op de bodemdalingskom. Bodemdaling is in dit figuur aangegeven met een positieve waarde.

4.1.6 Poisson's ratio

Poisson's ratio ν beschrijft hoe een materiaal reageert op trek- of drukbelasting. In het geval van drukafname in het reservoir zal de verticale drukbelasting op het reservoir toenemen, wat resulteert in contractie van het reservoir in de verticale richting. Het reservoir heeft hierdoor de neiging om in horizontale richting uit te zetten. De Poisson's ratio is in dit geval de ratio van de horizontale uitzetting over de verticale contractie van het reservoir. Voor de Slochteren Zandsteen is de Poisson's ratio bepaald met gesteentemechanische proeven op 0.18 en voor de Platten Dolomiet is deze bepaald op 0.25. Voor de Bunter eenheid zijn er geen gesteentemechanische proeven beschikbaar en is er een poisson ratio aangenomen van 0.25.

4.1.7 Gemiddelde reservoir druk

TAQA heeft een database ter beschikking met alle gemiddelde reservoirdrukken van elk veld over tijd. Figuur 4 laat het drukverloop sinds 1970 zien voor elk veld.

Figuur 4 Gemiddelde reservoir drukverloop over tijd voor elk veld.

5 MODELKALIBRATIE

In dit hoofdstuk volgen de resultaten van de bodemdalinganalyse en modellering. Vanwege het iteratieve karakter van de kalibratie van het model zijn in dit hoofdstuk tevens de achtergronden beschreven bij de totstandkoming van de prognose.

5.1 Tijdsafhankelijke bodembeweging

De velden Groet, Bergen en Bergermeer laten bodemdaling zien, die niet gecorreleerd kan worden met drukdaling voor de waterpassingsmeetcampagnes uit 2011 en 2016.
In de volgende paragrafen wordt dit fenomeen geanalyseerd.

5.1.1 Bergen

Figuur 5 Bodemdaling boven het Bergen gasveld in doorgetrokken lijnen en de gemiddelde reservoir druk een in stippellijn.

Figuur 5 laat de gemeten bodemdaling boven het Bergen gasveld en de gemiddelde velddruk over tijd zien. Het figuur laat duidelijk een afname van de bodemdaling in de laatste 10 jaar zien. Op het eerste oog lijkt de gemeten bodemdaling goed te correleren met de afname van de gemiddelde reservoirdruk. Echter als de bodemdaling tegen de velddruk geplot wordt (Figuur 6), valt meteen op dat de bodemdaling na 2011 (blauwe kader) per bar juist is toegenomen.

Figuur 6 Gemiddelde velddruk en bodemdaling voor verschillende peilmerkers boven en nabij het Bergen gasveld.

Figuur 7 Bodemdaling in mm/bar over tijd.

Figuur 7 laat de bodemdalingssnelheid per bar zien. Voor 2011 is de bodemdalingssnelheid per bar constant. In de periode 2006-2011 is de bodemdalingssnelheid per bar toegenomen waarna in de periode 2011-2016 de snelheden weer significant afnemen.

In de periode 2006-2016 is de productiesnelheid van het Bergen gasveld afgenomen. Over deze periode van 10 jaar is de druk in het veld met slechts 5 bar gedaald (0.5 bar/jaar). In de voorgaande periode van 9 jaar lag de productiesnelheid hoger, namelijk op 3.4 bar/jaar. Na het significant verlagen van de productiesnelheid heeft de bodemdaling in de periode 2006-2016 doorgezet.

Als er met dit effect geen rekening gehouden wordt zal het bodemdalingsmodel de bodemdaling onderschatten. Figuur 8 laat de modeluitkomsten en gemeten bodemdaling zien voor een aantal peilmerkers in de nabijheid van het Bergen gasveld. In dit model is geen rekening gehouden met het effect dat hierboven is beschreven. Duidelijk is te zien dat tot 2011 de gemodelleerde bodemdaling in lijn is met de gemeten bodemdaling, hierna onderschat het model de bodemdaling.

Figuur 8 Kaartbeeld van het Bergen gasveld, Bergermeer gasveld en Groet gasveld. De grafieken laten de gemeten bodemdaling in blauw zien en in rood de gemodelleerde bodemdaling. Voor de gemeten bodemdaling zijn error bars toegevoegd die de totale meetonzekerheid van de waterpassing aangeven.

5.1.2 Groet

Het Groet gasveld laat nagenoeg hetzelfde effect zien als het Bergen gasveld. De bodemdaling zet door tussen 2006 en 2011, waarna de bodemdalingssnelheid weer afneemt.

Figuur 9 Bodemdaling boven het Groet gasveld in doorgetrokken lijnen en de gemiddelde reservoir in stippellijn

Figuur 9 laat de gemeten bodemdaling boven het Groet veld en de gemiddelde velddruk over tijd zien. Net als bij het Groet gasveld lijkt op het eerste oog de gemeten bodemdaling goed te correleren met de afname van de gemiddelde reservoirdruk. Echter als de bodemdaling tegen de gemiddelde reservoirdruk geplot wordt (Figuur 10), valt meteen op dat de bodemdaling na 2011(blauwe kader) is toegenomen per bar.

Figuur 10 Gemiddelde velddruk en bodemdaling voor verschillende peilmerkers boven en nabij het Groet gasveld.

Figuur 11 Bodemdaling in mm/bar over tijd.

Figuur 11 laat de bodemdalingssnelheid per bar zien (mm/bar). Voor 2011 is de bodemdalingssnelheid per bar constant. Net als boven het Groet gasveld is in de periode 2006-2011 de bodemdalingssnelheid per bar toegenomen waarna in de periode 2011-2016 de snelheden weer significant afnemen.

In de periode 2006-2016 is de productiesnelheid van het Groet gasveld afgenomen. Over deze periode van 10 jaar is de druk in het veld met slechts 11 bar gedaald (1 bar/jaar). In de voorgaande periode van 9 jaar lag de productiesnelheid hoger, namelijk op 2.7 bar/jaar. Na het significant verlagen van de productiesnelheid heeft de bodemdaling in de periode 2006-2016 doorgezet.

Figuur 12 laat de modeluitkomsten en gemeten bodemdaling zien voor een aantal peilmerkers in de nabijheid van het Groet gasveld. In dit model is geen rekening gehouden met het effect dat hierboven is beschreven. Duidelijk is te zien dat tot 2011 de gemodelleerde bodemdaling in lijn is met de gemeten bodemdaling, hierna onderschat het model de bodemdaling.

Figuur 12 Kaartbeeld van het Groet gasveld, Bergermeer gasveld, Bergen gasveld en Groet-Oost gasveld. De grafieken laten de gemeten bodemdaling in blauw zien en in rood de gemodelleerde bodemdaling. Voor de gemeten bodemdaling zijn error bars toegevoegd die de totale onzekerheid van de waterpassing aangeven.

5.1.3 Bergermeer

De bodemdaling boven het Bergermeer veld is tot 2006 goed te correleren met de gemiddelde reservoirdruk. Om het gasveld klaar te maken voor gasopslag, is in 2007 doormiddel van gasinjectie in het reservoir begonnen met het opvoeren van de reservoirdruk. In de periode 2006- 2011 is er een kleine bodemstijging direct boven het Bergermeer veld gemeten. Deze gemeten bodemstijging is minder dan de gemodelleerde bodemstijging die gepaard gaat met de drukstijging in het reservoir. Dit is nagenoeg hetzelfde effect dat boven het Groet en Bergen Gasveld wordt waargenomen, de bodemdaling heeft na het significant verlagen van de productiesnelheid doorgezet.

Naast het verschijnsel dat de bodemdaling in de periode 2006-2011 na het verlagen van de productiesnelheid heeft doorgezet, laten de GPS bodembewegingsmetingen zien dat er een geringe bodembeweging plaatsvindt boven het Bergermeer gasveld. De bodembeweging is, met een vertraging van ± 3 maanden, goed te correleren met het drukverloop in het Bergermeer gasveld. Wel is het zo dat de bodembeweging per bar twee keer kleiner is dan tijdens de productiefase van het Bergermeer gasveld. Met andere woorden, de bodemstijging per bar druktoename is gehalveerd en de bodemdaling per bar drukafname is gehalveerd tijdens de opslagfase.

Figuur 13 De doorlopende lijnen laten de gemeten bodemdaling van de vier GPS stations zien en de stippellijn laat de gemiddelde reservoirdruk van het Bergmeer gasveld zien.

5.1.4 Discussie tijdsafhankelijke bodembeweging

Na het afnemen van de productiesnelheid van de gasvelden Bergen, Groet en Bergermeer wordt er een bodemdaling waargenomen die niet gecorreleerd kan worden aan de drukafname in het reservoir. Deze velden bestaan alle uit de Slochteren Zandsteen. In de Bergen Winningsvergunning zijn er nog twee Slochteren Zandsteen reservoirs geproduceerd, het Schermer gasveld en het Groet-Oost gasveld. In beide velden wordt geen significante productie meer verwacht. Het Schermer gasveld laat geen bodemdaling zien nadat de productie uit het gasveld sinds 2001 drastisch is verlaagd. Het veld is van 230 bar tot 60 bar gedepleteerd, de drukdaling is dus beperkt in vergelijking met de gasvelden Bergen, Bergermeer en Groet. Daarnaast is het zo dat het Schermer gasveld een stuk kleiner is dan de gasvelden Bergen, Groet en Bergermeer.

Het Groet-Oost gasveld is pas recent gestopt met produceren. Daarom kan op dit moment nog niet bepaald worden of de bodemdaling na het beëindigen van de productie doorzet. De druk in het Groet-Oost veld is net zoals in het Schermer gasveld maar beperkt afgenomen (van 235 bar naar 90 bar).

Boven de andere gasvelden bestaande uit Bunter Zandsteen en Platten Dolomiet reservoir wordt geen bodemdaling gemeten die gecorreleerd kan worden met gaswinning. Hier wordt dus ook geen additionele bodemdaling waargenomen.

Er zijn in de Bergen Winningsvergunning verschillende verklaringen voor het doorzetten van de bodemdaling, waarvan er twee aannemelijk zijn.

Zoutkruip

Boven de Rotliegend gasvelden in de Bergen Winningsvergunning bevindt zich een zoutlaag. Onder hoge druk en hoge temperaturen gedraagt zout zich als een zeer stroperige vloeistof. De compactie van het reservoir zou zoutvloei kunnen initialiseren wat een effect kan hebben op de bodemdalingskom. Zoutkruip zal er voor zorgen dat de bodemdalingskom zich dieper en smaller manifesteert. Dit effect lijkt uitgesloten omdat de bodemdalingskommen van de gasvelden Groet, Bergen en Bergenmeer zeer breed zijn (er wordt een K van 1.5 aangenomen).

Compactiekruip

Resultaten van gesteentemechanische testen wijzen uit dat na het stopzetten van de drukverlaging compactie kan doorzetten [9]. De additionele compactie na het beëindigen van drukverlaging is ongeveer 20% van de compactie die tijdens drukdaling optreedt. Dit effect noemt men compactiekruip en vormt een aannemelijke verklaring voor het doorzetten van de bodemdaling boven de Gasvelden Groet, Bergen en Bergermeer na het verlagen

van de productiesnelheden. Boven het Schermer gasveld is de bodemdaling niet doorgezet na het stopzetten van de productie. Een verklaring hiervoor wordt gevonden in het feit dat de drukafname en de resulterende verticale spanning toename niet hoog genoeg zijn geworden om compactiekruip in gang te zetten. Dit zou betekenen dat compactiekruip in het Groet-Oost veld geen rol zal gaan spelen.

Tijdsafhankelijke drukdaling in de aquifers

Mogelijkerwijs zitten er kleine hoeveelheden gas in de aquifer. Deze gasbelletjes in de poriën van het reservoirgesteente zijn niet met elkaar verbonden, waardoor ze in eerste instantie niet zullen stromen (zogenaamde “relatieve permeabiliteit”). Indien de druk in de aquifer afneemt, als gevolg van gasproductie uit het gasveld, zullen deze gasbelletjes in het water uitzetten. Hierdoor blokkeren ze steeds grotere poriën, zodat het water geblokkeerd wordt en daardoor ook niet zal stromen. Pas als de druk in het gasveld en daarmee de druk in de aquifer verder afnemen, zullen de gasbelletjes dusdanig veel expanderen, dat ze met elkaar verbonden worden en mobiel zullen worden. (Vergelijk dit met regendruppels op een raam: kleine druppels zullen niet omlaag zakken. Pas als meerder kleinere druppels samengevoegd worden, zal de druppel omlaag bewegen.)

Vanaf dat moment zal ook het water weer langzaam kunnen beginnen met stromen. Hierdoor treedt een vertragend effect op in de aquifer. Het is niet uitgesloten dat dit effect een rol speelt in de bodemdaling die optreedt na het beëindigen of reduceren van de gasproductie.

5.1.5 Tijdsafhankelijke bodembeweging modelleren

Boven het Groet en Bergen gasveld is in de periode 2006-2011 de bodemdalingssnelheid per bar toegenomen, waarna in de periode 2011-2016 de snelheden weer significant afnamen. Doordat de bodemdalingssnelheid per bar afneemt, neemt ook het tijdsafhankelijke effect af. Het model kan voor het tijdsafhankelijke effect gekalibreerd worden door fictief de druk in het veld verder te verlagen. In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de additionele drukafname om het tijdsafhankelijke effect te modelleren. De tijdsafhankelijke bodemdaling is ook meegenomen in de bodemdalingsprognose. Voor de prognose is aangenomen dat de tijdsafhankelijke bodemdaling 20% bedraagt van de niet tijdsafhankelijke bodemdaling. Dit komt neer op 20% additionele drukdaling in de gasvelden Groet, Bergen en Bergermeer minus de additionele drukdaling die in de jaren 2011 en 2016 al is gemodelleerd. 20% additionele bodemdaling als gevolg van tijdsafhankelijke bodemdaling moet gezien worden als een “worst case” scenario, er wordt immers al een afname gemeten in de tijdsafhankelijke bodembeweging. Voor het West-Beemster gasveld

dat door de NAM geopereerd wordt en deels in het gebied van de Bergen Winningsvergunning ligt, wordt in de bodemdalingsprognose ook rekening gehouden met 20% additionele tijdsafhankelijke bodemdaling.

Gasveld	**Additionele druk daling 2011 (bar)**	**Additionele druk 2016 (bar)**	**Additionele drukdaling na beëindiging productie of opslag (bar)**
Groet	15	6	**23**
Bergen	15	13	**14**
Bergermeer	15	0	**29**
West-Beemster			**40**

Tabel 2 overzicht van inputparameters om tijdsafhankelijk bodembeweging te modelleren.

Uit zowel de GPS bodemwegingsmetingen en de waterpassingsmeetcampagnes blijkt dat het Bergermeer gasveld tijdens het verhogen (injectie) van de reservoirdruk binnen de opslagcyclus minder bodembeweging teweeg brengt dan tijdens de depletiefase. Het reservoir lijkt zich stijver te gedragen dan tijdens de depletiefase. Dit effect wordt in het model gemodelleerd door de compactiecoëfficiënt -of in het geval van drukstijging de expansiecoëfficiënt- te halveren.

5.2 Resultaten bodembewegingsmodellering

Er is voor gekozen om de resultaten van de bodembewegingsmodellering voor elk veld dat bodembeweging vertoont, te tonen in een kaartbeeld. Dit kaartbeeld laat naast de velden ook de gemeten en gemodelleerde bodembeweging voor een aantal peilmerkers zien. Zo kan goed het verschil tussen het model en de gemeten waarden geëvalueerd worden.

De bodemdaling in dit gebied wordt veroorzaakt door drie dalingskommen, die van het Bergen gasveld, het Groet gasveld en het Bergermeer (opslag) gasveld.

Na 2006 is sprake van tijdsafhankelijke bodemdaling. Voor uitleg, zie paragraaf 5.1.5.

Figuur 14 Kaartbeeld van de omgeving van het Bergen gasveld. De grafieken geven de gemeten bodembeweging in blauwe lijnen aan en de gemodelleerde bodemdaling in rode lijnen.

De bodemdaling is tot 2006 goed te correleren met de drukdaling van het Bergermeer gasveld. In de periode 2006-2011 heeft de bodemdaling doorgezet (zie paragraaf 5.1.5), waarna bodemstijging in gang is gezet door de drukverhoging van het Bergermeer gasveld. Peilmerk 19A0121 is het enige peilmerk dat geen goede match vertoont. Gezien de consistentie in het beeld met de voor de overige peilmerkers geobserveerde (verklaring voor) bodemdaling wordt aannemelijk geacht dat dit specifieke peilmerk een foutieve meting laat zien.

Figuur 15 Kaartbeeld van de omgeving van het Bergermeer gasveld. De grafieken geven de gemeten bodembeweging in blauwe lijnen aan en de gemodelleerde bodemdaling in rode lijnen.

De bodemdaling in dit gebied wordt veroorzaakt door twee dalingskommen, die van het Groet gasveld en die van het Groet-Oost gasveld.

De bodemdaling tot 2006 wordt veroorzaakt door drukafname van het Groet gasveld.

Het Groet-Oost veld is sinds 2005 in productie genomen. Dit is goed terug te zien in de versnelde bodemdaling gemeten in de waterpasmeetcampagnes van 2011 en 2016. Het veld is uit productie genomen in 2015.

Figuur 16 Kaartbeeld van de omgeving van het Groet-Oost gasveld. De grafieken geven de gemeten bodembeweging in blauwe lijnen aan en de gemodelleerde bodemdaling in rode lijnen.

De bodemdaling in dit gebied wordt veroorzaakt door twee dalingskommen, die van het Groet gasveld en in beperkte mate die van het Groet-Oost gasveld.

De bodemdaling is tot 2006 goed te correleren met druk afname van het Groet gasveld. De noordelijke peilmerkers laten na 2006 ook bodemdaling zien die afkomstig is van het Groet-Oost gasveld.

Na 2006 is sprake van tijdsafhankelijke bodemdaling. Voor uitleg, zie paragraaf 5.1.5.

Figuur 17 Kaartbeeld van de omgeving van het Groet gasveld. De grafieken geven de gemeten bodembeweging in blauwe lijnen aan en de gemodelleerde bodemdaling in rode lijnen.

Schermer

De gemeten bodemdaling boven het Schermer gasveld (19B0284 en 19D0154) komt goed overeen met de gemodelleerde bodembeweging. De gemodelleerde bodemdalingskom is echter te breed. Door de K factor aan te passen is de bodemdalingskom nauwer gemaakt. Voor de peilmerkers 19D0208 en 19D0186 blijft de gemodelleerde bodemdaling groter dan de gemeten bodemdaling.

Figuur 18 Kaartbeeld van de omgeving van het Schermer gasveld. De grafieken geven de gemeten bodembeweging in blauwe lijnen aan en de gemodelleerde bodemdaling in rode lijnen.

5.2.1 Bodembeweging boven het Zuid-Schermer en Starnmeer Gasveld

De reservoireenheid van het Zuid-Schermer en het Starnmeer gasveld is de Platten Dolomiet. Dit is een dunne, stijve reservoireenheid die tijdens productie geen significante bodemdaling tot gevolg heeft. Beide gasvelden hebben een beperkte drukdaling gehad (Zuid-Schermer van 218 bar tot 155 bar en Starnmeer van 206 bar tot 138 bar) in de periode 1998-2003. De peilmerkers die in deze periode zijn gemeten laten geen bodemdaling zien. Wat wel opvallend is, is dat in de periode 2006-2011 drie van de 10 peilmerkers in de kring rondom het Schermer gasveld bodemdaling laten zien. De andere 7 peilmerkers laten daarentegen een lichte stijging zien. De bodemdaling is niet te correleren met gaswinning in het Starnmeer veld. Daarvoor wordt de gemeten bodemdaling als te lokaal beoordeeld. Als de bodemdaling door gaswinning ontstaan zou zijn, zouden de andere peilmerkers dichterbij het gasveld ook bodemdaling moeten laten zien. Wellicht dat lokaal autonome processen voor de gemeten daling zorgen.

Figuur 19 Bodembeweging boven het Starnmeer gasveld. Het kaartbeeld (links) laat een uitsnede van de Overzichtskaart waterpasmeting zien. De rode getallen geven de bodembeweging in mm aan over de periode 2011-2016. De drie peilmerken met bodembeweging in de periode 2006-2016 zijn rood omcirkeld. Het rechter figuur laat de bodembeweging over tijd zien voor de peilmerken. De locatie van de peilmerken kan gevonden worden in het kaartbeeld.

6 AUTONOME BODEMDALING IN DE BERGEN II WINNINGSVERGUNNING EN OMGEVING

Autonome bodemdaling wordt veroorzaakt door natuurlijke of ondiepe processen zoals tektoniek, verandering in grondwaterspiegel of belasting van de oppervlakte. Bodemdaling door gaswinning is geen onderdeel van autonome bodemdaling. Figuur 20 laat een uitsnede zien van de autonome-bodemdalingsprognosekaart van Hopman [2]. Deze kaart

laat de geprognosticeerde autonome bodemdaling zien over de periode 2000-2050. Op de kaart is de Bergen II Winningsvergunning aangegeven met een zwarte polygoon en de Bergermeer opslagvergunning en Alkmaar opslagvergunning met een gestippelde polygoon. De kaart laat duidelijk zien dat er in de Bergen Winningsvergunning lokaal variatie in de autonome bodemdaling wordt geprognosticeerd. Het aansluitpunt van het meetnet is aangegeven met een pijl en een ster.

Figuur 20 autonome-bodemdalingsprognosekaart, zie tekst voor verklaring [2].

Figuur 21 Bodemsoortkaart [3].

Figuur 21 laat een uitsnede zien van de bodemsoortkaart [3]. De kaart laat de bodemopbouw zien van de bovenste meter. In het westen van het gebied van de Winningsvergunning is de bodem vooral opgebouwd uit zand, hier wordt weinig autonome bodemdaling verwacht. Echter in het oosten van de Winningsvergunning is de ondiepe bodem opgebouwd uit zware klei, zware zavel en veen; in deze gebieden wordt meer autonome bodemdaling verwacht door het inklinken van deze grondsoorten.

Als de autonome bodemdaling over het gehele meetnet gelijk zou zijn, zou de autonome bodemdaling niet gemeten kunnen worden. Alle peilmerkers en het aansluitpunt vertonen dan namelijk een gelijke daling. Relatief is er geen daling waarneembaar. Echter uit de bodemdalingsprognosekaart valt op te maken dat er lokaal een grote variatie in autonome bodemdaling wordt geprognosticeerd. De autonome bodemdaling varieert in de Bergen II Winningsvergunning van 0.5 cm tot 200 cm over de periode van 2000-2050. Deze variatie zorgt ervoor dat de autonome bodemdaling lokaal onderdeel kan zijn van de gemeten bodemdaling. Met andere woorden: niet alle gemeten bodemdaling wordt veroorzaakt door gaswinning en/of gasopslag.

Als er vanuit gegaan wordt dat alle peilmerkers aan goed gefundeerde objecten zijn bevestigd, zou autonome bodemdaling een geringe invloed op de daling van de peilmerkers

moeten hebben. Echter, in het meetnet wordt bodemdaling gemeten die niet te correleren valt met gaswinning of gasopslag. De bodemdaling is niet te correleren omdat bijvoorbeeld de peilmerkers te ver van de gasvelden verwijderd zijn of doordat de bodemdaling niet dezelfde trend heeft als het drukverloop in de gasvelden.

6.1 Bodemdaling in kring 27

Kring 27 bevindt zich ten zuidwesten van het Alkmaar gasveld. In het noordwesten van kring 27 bevindt zich het Boekel veld (zie Figuur 23). Het gasvolume van dit gasveld is 150 keer kleiner dan dat van bijvoorbeeld het Groet of Bergen gasveld en zelfs 400 keer kleiner dan dat van het Bergermeer gasveld. De bodemdaling die dit gasveld kan voortbrengen is nihil.

Opvallend aan kring 27 is dat er bij elk peilmerk bodemdaling wordt geconstateerd, ook helemaal in de oostelijke hoek van de kring, die meer dan 4km van het Boekel veld verwijderd is. De gemeten bodemdaling tussen 2006 en 2016 is gering (3 tot 12 mm). Twee peilmerkers (19A001 en 19D0307) worden al sinds 1972 gemeten en laten een bodemdaling zien van 17 tot 25 mm (zie Figuur 22). Deze bodemdaling is al ingezet voordat het Boekel gasveld in productie werd genomen. De gemeten bodemdaling in kring 27 is gering, maar laat wel zien dat autonome processen lokaal invloed hebben op de bodemdaling. Ten noordenoosten van kring 27 ligt het Alkmaar veld en de stad Alkmaar. Ook hier wordt een geringe additionele bodemdaling van ± 3 cm gemeten die niet te correleren valt aan gaswinning of opslag.

Figuur 22 Gemeten bodemdaling in kring 27 voor locaties van de peilmerkers zie Figuur 23.

Figuur 23 Uitsneden uit de overzichtskaart differenties 2001-2016. Het Boekel gasveld is aangegeven met een grijze polygon gelegen onder peilmerk 19C341.

Figuur 24 Kaartbeeld van de omgeving van het Alkmaar gasveld. De grafieken geven de gemeten bodembeweging in blauwe lijnen aan en de gemodelleerde bodemdaling in rode lijnen.

6.2 Alkmaar en Heiloo

Het kaartbeeld van Figuur 24 laat de omgeving van Heiloo en Alkmaar zien. In Heiloo, ten zuidwesten van het Alkmaar veld, laten verschillende peilmerkers een geringe bodemdaling van 2 tot 3 cm zien in de periode van 1972 tot 2001. Na deze periode vertonen de peilmerkers een stabiele trend. Opvallend is dat peilmerkers 019A0001 en 019A0005, die buiten de invloedsfeer (>2.5 km) van de gasvoorkomens Alkmaar, Schermer en Bergermeer liggen, een soortgelijk gedrag vertonen. De bodemdaling van deze peilmerkers is niet te correleren aan het drukverloop van het meest nabije veld, Alkmaar. Het Boekel veld is in 2006 voor een korte periode van één jaar in productie genomen. Het drukverloop van dit veld is ook niet te correleren met de gemeten bodemdaling. De bodemdaling in het gebied ten zuiden en zuidwesten van de stad Alkmaar is te verklaren door autonome bodemdaling. De autonome -bodemdalingsprognosekaart (Figuur 20) laat in dit gebied een behoorlijke autonome bodemdaling zien. De bodemsoortkaart (Figuur 21) laat zien dat de ondiepe bodem hier is opgebouwd uit lichte zavel en lichte klei, bodemsoorten waar meer inklinking verwacht wordt.

Omdat het hier over een relatief groot gebied gaat met veel meetpunten, kan er niet vanuit gegaan worden dat alle peilmerkers bevestigd zijn aan slecht gefundeerde objecten. Een verklaring voor de autonome bodemdaling moet dus gezocht worden in de ondergrond dieper dan de gebruikelijke fundatie. Op dinoloket.nl kan de interpretatie van een ondiep boorgatmonster opgevraagd worden. Een aantal boorgatmonsters laat lokaal kleilagen zien op een diepte van 10 tot 30 m. Echter, deze kleilagen zijn niet over het gehele gebied te correleren (zie Figuur 25). Dit betekent dat de bodemdaling niet toegewezen kan worden aan deze kleilagen.
Een passende verklaring voor de geringe autonome bodemdaling in de nabijheid van Alkmaar en Heiloo ontbreekt op dit moment nog.

Figuur 25 Twee boorgatmonsters genomen in Heiloo. Het bovenste boormonsterprofiel laat een kleilaag zien op een diepte van 10 tot 37 m. Het tweede boormonsterprofiel mist deze kleilaag.

6.3 Rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) Geestmerambacht

Naast het Noordhollands Kanaal, ten noorden van Alkmaar, laat een drietal peilmerkers sinds 1972 een bijzondere bodemdaling zien (zie Figuur 26) . Deze peilmerkers liggen aan de rand van de invloedssfeer van de gasvelden Bergermeer en Groet-Oost. De bodemdaling die hier gemodelleerd wordt is maximaal 1.5 cm, terwijl peilmerk 19B281 bijna 12 cm bodemdaling laat zien. Dit verschijnsel is eerder opgemerkt door Houtenbos [6]. Voor de bodemdaling gemeten in peilmerk 19B281 en 18B238 zou de belasting van het RWZI wellicht een verklaring kunnen zijn. Het peilmerk 19A0090 bevindt zich echter te ver weg(>1.5 km) van het RWZI om beïnvloed te worden door belasting van het RWZI. De bodemsoortkaart laat zien dat dit gebied voornamelijk bestaat uit zware klei. Wellicht kan een verklaring gevonden worden in de ondiepe ondergrond in combinatie met de locatie van de peilmerkers direct naast het kanaal.

Figuur 26 Locatiekaart van de drie peilmerkers nabij de RWZI. De RWZI is rood omcirkeld. De bodemdaling uit het model is aangegeven met een rode lijn en de gemeten bodemdaling met de meetonzekerheid is aangegeven in een blauwe lijn in millimeter.

6.4 Hondsbossche Zeewering

Figuur 27 laat zien dat er landinwaarts een goede overeenkomst is tussen de gemodelleerde bodemdaling en gemeten bodemdaling. Echter, in de nabijheid van de Hondsbossche Zeewering onderschat het model de waarnemingen.

Een deel van de bodemdaling die is gemeten is in het zuidelijke deel van de Hondsbossche Zeewering is toe te kennen aan productie uit het de gasvelden Groet en Groet-Oost. Door zandsuppletie en dijkverzwaring van de zeewering heeft er in de loop der tijd additionele bodemdaling plaatsgevonden die niet toe te kennen is aan gaswinning [12].

Figuur 27 Locatie kaart van de Hondsbossche Zeewering. De zeewering is geel gemarkeerd. De gemodelleerde bodemdaling is aangegeven met een rode lijn en de gemeten bodemdaling met de meetonzekerheid is aangegeven in een blauwe lijn in millimeter.

7 BODEMDALINGSPROGNOSE

Er zijn twee scenario's uitgewerkt voor de verwachte bodemdalingsprognose. Het opslagscenario waarin Alkmaar PGI en Bergermeer in gebruik zijn als gasopslag ('Bodemdalingsprognose opslag scenario') en het scenario waar de opslag in deze velden volledig beëindigd is (Bodemdalingsprognose opslag beëindigd) en het gas (werkgas én kussengas) uit de voormalige gasoplagen is onttrokken. Voor beide scenario's worden de einddrukken van de gasvelden als input gebruikt.

De prognose wordt gegenereerd door in het gekalibreerde model de einddrukken van de gasvelden als input te gebruiken . Voor het opslag scenario worden de laagste drukken van de gasopslagen als input gebruikt. Voor de gasvelden Groet, Bergen, Bergermeer en West-Beemster wordt een additionele tijdsafhankelijke bodemdaling gemodelleerd van 20% (zie paragraaf 5.1.5.).

Hieronder volgen de resultaten van de prognoses voor de twee scenario's. Ook worden er kaarten gepresenteerd van de verwachte additionele bodemdaling voor de twee scenerio's. Voor het Bergermeer gasveld wordt een gemiddelde reservoir druk van 125 bar aangenomen voor de situatie in 2016. Deze druk is gekozen omdat tijdens de laatste waterpassingsmeetcampagne de gemiddelde maximale reservoirdruk van het Bergermeer gasveld ongeveer 125 bar was. De additionele bodemdaling is dus ten opzichte van de situatie waarin het Bergermeer gasveld een gemiddelde reservoirdruk heeft van deze 125 bar.

Het model is gekalibreerd op de waterpassingsmetingen. Deze metingen kennen een meetonzekerheid. Hierdoor zal de prognose ook een zekere onzekerheid kennen die groter is dan de meetonzekerheid van de waterpassingsmetingen, vanwege het aantal inputparameters in het model die ook elk een individuele onzekerheid kennen. De totale onzekerheid van de bodemdalingsprognose wordt geschat op 15 tot 25 %.

In de nabijheid van het West-Beemster veld zijn geen peilmerkers om de gemodelleerde bodemdaling van het West-Beemster veld te kalibreren. Daarom is de bodemdalingsprognose voor het West-Beemster veld erg onnauwkeurig. De Nederlandse Aardolie Maatschappij is verantwoordelijk voor een adequate bodemdalingsprognose van dit veld.

Figuur 28 Bodemdalingsprognose opslag scenario.

Figuur 29 Additionele bodemdaling van 2016 tot het opslag scenario voor de gasvelden geopereerd door TAQA Energy.

Boven het Bergermeer veld wordt bodemdaling gemodelleerd van 2016 tot het opslag scenario. Dit wordt veroorzaakt doordat er een gemiddelde reservoirdruk van 125 bar wordt aangenomen voor het jaar 2016. Ten opzichte van deze druk is de gemiddelde reservoirdruk afgenomen. Voor het storage scenario wordt de laagste druk tijdens opslag gebruikt, namelijk 77 bar.

Figuur 30 Bodemdalingsprognose opslag beëindigd scenario.

Figuur 31 Additionele bodemdaling van 2016 tot opslag beëindigd scenario voor de gasvelden geopereerd door TAQA.

Boven het Bergermeer gasveld wordt een additionele bodemdaling van 5 cm gemodelleerd. De bodemdaling is ten opzichte van de situatie in 2016, toen de gemiddelde reservoirdruk 125 bar was. Sinds 2006 is er een bodemstijging boven het Bergermeer gasveld gemeten van ongeveer 2 cm. Ten opzichte van de situatie in 2006 wordt een additionele bodemdaling verwacht van ongeveer 3 cm.

8 CONCLUSIE

De prognoses voor bodemdaling voor de beschreven scenario's worden gepresenteerd in Figuur 28 tot en met Figuur 31. Hierbij worden de volgende samenvattende opmerkingen gemaakt:

- Door middel van het invoeren van de drukafname in de gasvelden en de resulterende compactie van de reservoirs in het model gebaseerd op de Van Opstalmethode, kan de bodemdaling tot 2006 goed worden gemodelleerd;
- Na het significant verlagen van de drukafname in de periode 2006-2011 laten de gasvelden Bergen, Groet en Bergermeer een tijdsafhankelijke bodemdaling zien;
- De tijdsafhankelijke bodemdaling is in de periode 2011-2016 afgenomen;
- Het Bergermeer gasveld gedraagt zich stijver tijdens de opslagfase dan tijdens de depletiefase;
- In de omgeving van Heiloo en Alkmaar, de Hondsbossche Zeewering en RWZI Geestmerambacht vindt bodemdaling plaats die niet gecorreleerd kan worden met gaswinning of gasopslag. Autonome processen zorgen hier voor bodemdaling;
- De grootste bodemdaling wordt boven het Groet gasveld verwacht, en bedraagt ongeveer 14.5 cm.

9 REFERENTIES

1. https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/open-data/normaal-amsterdams-peil
2. Hopman, V., 2013, Report on pilot service Rhine-Meuse Delta. Subcoast Deliverable D3.2.3.
3. Alterra Wageningen UR, 2006, Bodemsoortkaart 2006
4. Van Opstal, G.H.C,1974, The effect of base-rock rigidity on subsidence due to reservoir compaction.
5. NLOG, TNO Subsidence van Opstal vanopstal.m (http://www.nlog.nl/bodemdaling)
6. Houtenbos, A.P.E.M., 2006 Bodemdaling Analyse Bergen-Alkmaar 1972-2006
7. Antea, 2017, Resultaten monitoring bodembeweging Bergermeer, Maandelijkse rapportage GNSS monitoring 1 juni -31 mei 2017)
8. Antea, 2017, Meetregister bij het meetplan Bergen – Alkmaar, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing 2016
9. NAM Publicatie EP2015006213071, 2015, Studie naar het tijdsafhankelijke gedrag van diepe bodemdaling in de Waddenzee
10. Ondergrond model REGIS II v2.1 (www.dinoloket.nl)
11. Barends, 2008, Bodemdaling langs de Nederlandse kust, Case Hondsbossche en Pettemer zeewering

10 BIJLAGE

1. Overzichtskaart differenties 2011-2016 ECM#186023

Top 25, 2009 © De auteursrechten en databankenrechten zijn voorbehouden aan Dienst voor het kadaster en de openbare registers, Apeldoorn, 2011

Legenda

- Waterpastraject
- Hulplijn buitengebied
- (12) Kringnummer
- -1 Differentie 2011-2016

Peilmerken

- Aansluitpunt
- Ondergronds merk
- Peilmerk
- Peilmerk / knooppunt
- Hulppunt
- Vervallen peilmerken (puntnummer)

Peilmerken

- **19D368** Actueel
- 19D368 Niet actueel / Vervallen
- Zandsuppletie

Gasvelden

- In productie
- Ondergrondse gasopslag
- Uit produktie

TAQA

SCHAAL
1:55.000

OPDRACHTGEVER
Taqa Energy B.V.

PROJECTOMSCHRIJVING
Nauwkeurigheidswaterpassing
Bergen-Alkmaar 2016

KAARTTITEL
Overzichtskaart differenties 2011-2016

PROJECTLEIDER
P. Meinders

GIS-SPECIALIST
M.S. Chrisstoffels

DATUM
17-3-2017

FORMAAT
A1

KAARTNUMMER
412279-BA-OD-2016

WIJZ.NR
0

STATUS
Definitief

\\oranjewoud.intra\owhvn\Rprojecten\00410000\00412279\GIS\ArcGIS\Kaarten\20170315-412279-BA-OD-2016-0.mxd