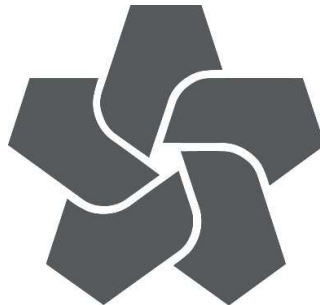


Waddenzee Meet- en Regelcyclus 2018

Controle van de reservoirmodellen met de 2018 drukmetingen



NAM

NAM documentnummer: EP201904223961

Datum April 2019

EP201904223961

Samenvatting

Dit rapport geeft een overzicht van alle nieuwe drukinformatie in de velden Moddergat, Nes, Lauwersoog Oost, Lauwersoog West, Lauwersoog Centraal, Vierhuizen Oost, Anjum, Ezumazijl en Metslawier die beschikbaar is gekomen sinds de Meet- en Regelcyclus (M&R) van 2017.

Voor M&R 2016 zijn de reservoirmodellen uitgebreid gekalibreerd, gebruik makend van alle beschikbare data [1]. De belangrijkste onzekerheid gerelateerd aan bodemdaling die in deze studie is geïdentificeerd is de mobiliteit van de aquifer. Hieruit zijn drie realisaties voortgekomen die gekalibreerd zijn en dus de historische metingen kunnen reproduceren, maar zeer verschillende drukprognoses laten zien als gevolg van de verwachte toekomstige productie. In dit rapport worden deze realisaties kort beschreven om meer duidelijkheid te geven over de onzekerheden in met name de aquifers (zie ook [3]).

Voor M&R 2017 [2] is onderzocht of nieuwe data beschikbaar was gekomen die een her-kalibratie van de reservoirmodellen nodig maakte. De algemene conclusie die uit deze vergelijking naar voren kwam, was dat de nieuwe informatie zeer goed paste binnen de prognose, en dat er geen nieuwe informatie was die gebruikt zou kunnen worden voor het verder verbeteren van de bestaande modellen.

In 2018 zijn tien drukmetingen uitgevoerd voor de Waddenzee velden. Een daarvan is in de put MGT-4 in het Nes veld, die het meest recent in productie is genomen. Voor de M&R-cyclus van 2018 (dit rapport) zijn deze drukmetingen vergeleken met de prognoses van de reservoirsimulatiemodellen. Net als in 2017 blijkt dat de 2018 drukmetingen over het algemeen goed passen binnen de prognoses, en dat voor enkele velden kleine aanpassingen nodig zijn. De prognoses van de (her)-gekalibreerde modellen kunnen vervolgens gebruikt worden om het toekomstige drukverloop te voorspellen als gevolg van de verwachte gasproductie.

Inhoudsopgave

1	Introductie	1
1.1	Reservoirsimulatiemodellen.....	2
1.2	Modelonzekerheden	2
1.3	Invloed van reservoirparameters op drukken.....	4
1.4	Lage / mid / hoge modelrealisaties.....	6
2	Moddergat.....	8
3	Nes.....	9
4	Lauwersoog Oost.....	12
5	Lauwersoog West.....	13
6	Lauwersoog Centraal.....	15
7	Vierhuizen Oost	17
8	Metslawier, Anjum en Ezumzijl	18
9	Conclusies	19
	Referenties	20

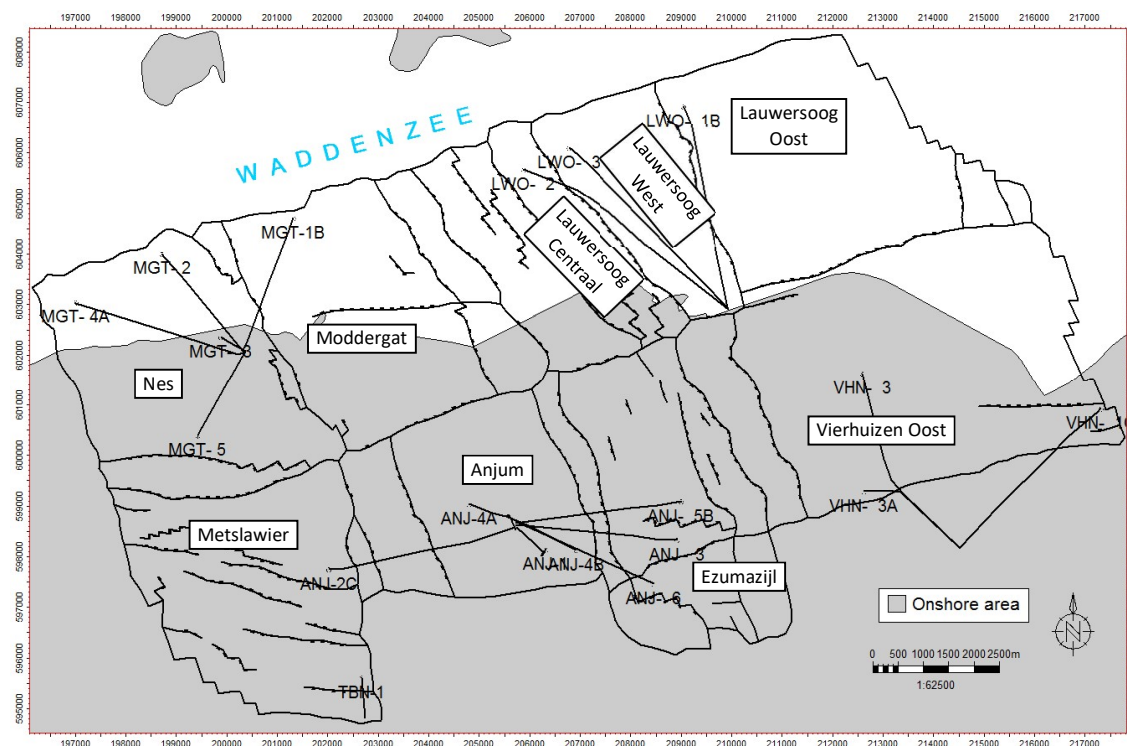
Deze pagina is opzettelijk leeg gelaten.

1 Introductie

De zes velden Nes, Moddergat, Lauwersoog Centraal, Lauwersoog West, Lauwersoog Oost en Vierhuizen Oost bevinden zich geheel of gedeeltelijk onder de Waddenzee (zie Figuur 1). Er wordt gas geproduceerd uit deze velden en als gevolg hiervan kan bodemdaling optreden. In overeenstemming met het vigerende winningsplan wordt de bodemdaling nauwlettend gemeten en wordt de toekomstige bodemdaling voorspeld met behulp van modellen. Op basis van de modelvoorspellingen kan de gasproductie op tijd worden aangepast om bodemdaling buiten de vastgestelde gebruiksruimte te voorkomen.

Om de toekomstige bodemdaling te kunnen voorspellen zijn voorspellingen nodig van de drukkaling in de gasvelden als gevolg van de toekomstige gasproductie. Deze modellen zijn uitgebreid beschreven in [1]. In dit hoofdstuk worden de modellen kort beschreven, waarbij gefocust wordt op de verschillende aannames om tot modellen te komen die de gemeten drukken kunnen reproduceren, maar zeer verschillende drukprognoses geven. Het grootste verschil tussen de lage, mid en hoge modelrealisaties zijn de aannames over de aquifer: in hoeverre kan deze dalen in druk en ook nog de historische metingen reproduceren als gevolg van de historische productie.

In de daaropvolgende hoofdstukken van dit rapport worden de drukmetingen uit 2018 vergeleken met de voorspellingen van de lage, mid en hoge modelrealisaties, en zo nodig worden de modelrealisaties aangepast. Er zal blijken dat met enkele kleine aanpassingen de modellen nog steeds geschikt zijn om een brede range aan drukvoorspellingen te doen die gebruikt kunnen worden om voorspellingen te doen van de bodemdaling.



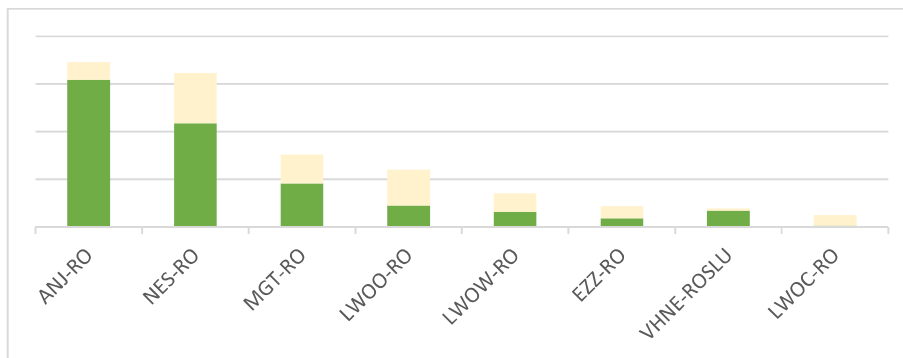
Figuur 1: Waddenzee velden Nes, Moddergat, Lauwersoog Centraal, Lauwersoog West, Lauwersoog Oost en Vierhuizen Oost, samen met de velden ten zuiden van de Waddenzee velden, Metslawier, Anjum en Ezumazijl.

1.1 Reservoirsimulatiemodellen

Om de drukdaling in de diepe ondergrond als gevolg van gasproductie te voorspellen worden gedetailleerde 3D fysische modellen van de gasvelden gebruikt waarin alle beschikbare data zijn geïntegreerd. Een overzicht van de data en welke informatie ze geven is gepresenteerd in Tabel 1. Vervolgens wordt met deze reservoirmodellen gesimuleerd hoe de druk als gevolg van gasproductie verloopt in de tijd. De gemeten drukken kunnen dan vergeleken worden met de drukken die berekend zijn door de modellen en zo nodig kunnen de modellen worden aangepast. Omdat de onderhavige velden gemiddeld al 70% van het gas hebben geproduceerd (zie Figuur 2), is er veel data beschikbaar en daarom kan verwacht worden dat de drukvoorspellingen gegenereerd door de modellen niet veel zullen variëren van jaar op jaar.

Data ...	... geven informatie over ...
Seismische en geologische data	Geometrie, gesteentelagen, locatie van breuken, regionale variaties in eigenschappen
Gesteentekernen	Porositeit, absolute en relatieve permeabiliteit, compressibiliteit
Logs gemeten in putten	Porositeit, saturatie en gas-watercontact, capillaire druk, druk per reservoir eenheid
Gas en water PVT analyse	Compositie, gas expansiefactor
Reservoirdrukken (jaarlijks)	Porositeit, perm, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit, doorlatendheid van breuken
Hoeveelheden geproduceerd gas en water (jaarlijks)	Porositeit, perm, relatieve permeabiliteit, compressibiliteit

Tabel 1: Overzicht van de data die zijn gebruikt om de modellen te maken die de drukvoorspellingen geven.



Figuur 2: Geproduceerde gasvolume (groen) t.o.v. totale gasvolume (lichtgeel).

1.2 Modelonzekerheden

Om de onzekerheden mee te nemen, zijn voor elk veld *meerdere* reservoirmodellen gemaakt, die elk het historische gedrag zoals de historisch gemeten drukken kunnen voorspellen, maar verschillende voorspellingen geven. Reservoirparameters waarvan de onzekerheid wordt meegenomen:

- Reservoirvolume en geometrie (incl. porositeit en saturatie)
- Breukdoorlatendheden
- Gas-Water contact
- Hoeveelheid gas in aquifer
- Permeabiliteit verticaal
- Permeabiliteit horizontaal
- Permeabiliteit in aquifer
- Relatieve permeabiliteit

Op basis van de metingen is voor elke reservoirparameter een range bepaald. Dit wordt uitgebreid beschreven in [1].

Voor de porositeitsonzekerheid die invloed heeft op het reservoirvolume wordt bijvoorbeeld de onzekerheid in de porositeitsmetingen op de gesteentekernen meegenomen. Op basis van porositeitsmetingen op de gesteentekernen en de akoestische logs is bepaald dat de onzekerheid in porositeit 1-2 porositeitseenheden (p.u.) is, zie Tabel 2. Uit de correlatie tussen de logs van bijvoorbeeld de vier putten in het Nes veld, MGT-2 tot en met MGT-5, blijkt ook dat de porositeit en permeabiliteit over grote afstanden zijn te correleren. Dit wordt ondersteund door observaties van ontsluitingen van gesteentes die zijn afgezet in vergelijkbare geologische omstandigheden. Als gevolg hiervan is de verwachting dat de porositeit en permeabiliteit voornamelijk verandert in verticale richting (wat gemeten is in logs en gesteentekernen) en minder in laterale richting.

Put	Porositeitsonzekerheid (min/max)	Reden
MGT-1B	± 1 p.u.	Zeer uitgebreide dekking kernmetingen, akoestische log
MGT-2	± 1 p.u.	Uitgebreide dekking kernmetingen
LWO-1B	± 1 p.u.	Zeer uitgebreide dekking kernmetingen
LWO-2	± 1.5 p.u.	Uitgebreide dekking kernmetingen, akoestische log
LWO-3	± 1.5 p.u.	Gedeeltelijke dekking kernmetingen
VHN-1C	± 2 p.u.	Gedeeltelijke dekking kernmetingen, akoestische log
VHN-3A	± 1.5 p.u.	Gedeeltelijke dekking kernmetingen
TRN-1	± 1 p.u.	Zeer uitgebreide hoeveelheid kernmetingen

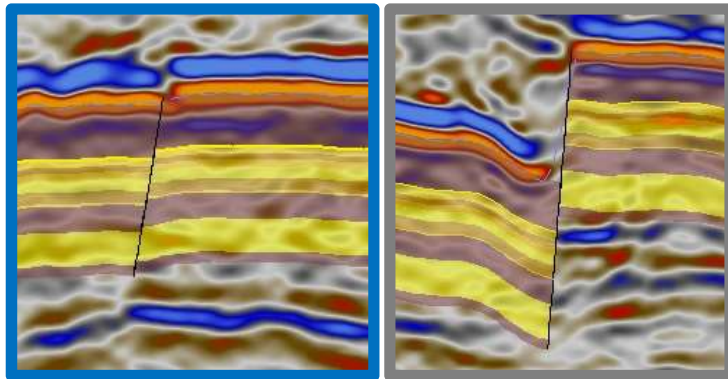
Tabel 2: Voorbeeld van het onzekerheidsbereik: onzekerheid in gemeten porositeit.

Voor de breukdoorlatendheden, inclusief de communicatie tussen de voorkomens, wordt een combinatie van observaties gebruikt, zie Figuur 4 voor een samenvatting.

De eerste observatie is dat elk veld zijn eigen initiële gas-water contact en initiële druk heeft die significant hoger is dan hydrostatisch (zie ook [7]). Hierdoor is aannemelijk dat er geen communicatie is geweest tussen de velden onderling en dat de breuken tussen de velden dus sluitend zijn in geologische tijd. Als dat namelijk niet het geval zou zijn, zouden de drukken en gas-watercontacten gelijk moeten zijn.

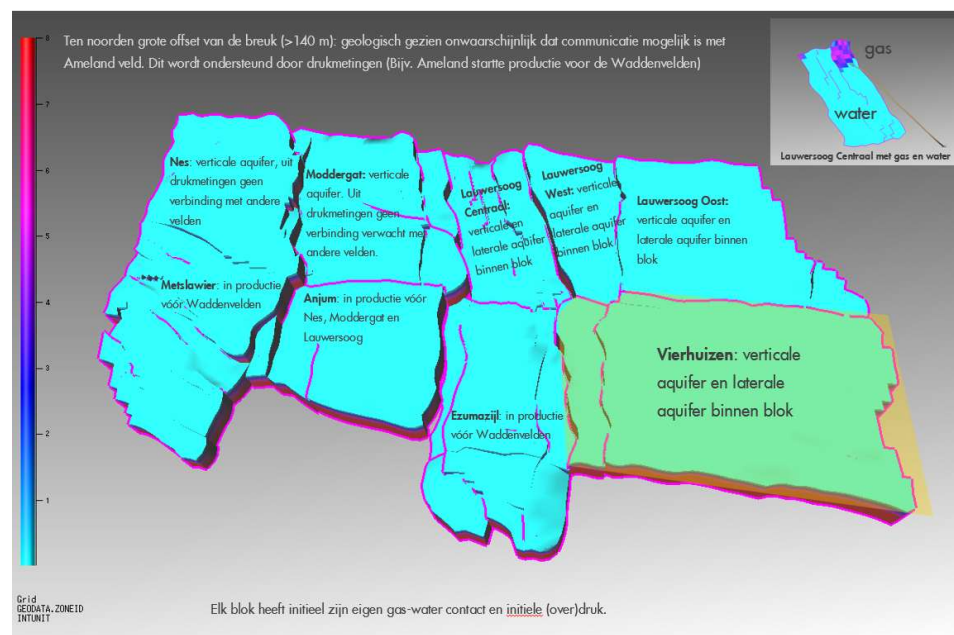
Een andere observatie is dat de breuk ten noorden van de Waddenvoorkomens een groot verzet van meer dan 140 m heeft. Hierdoor is er tussen de Rotliggend zandlagen aan beide kanten van de breuk geen communicatie mogelijk (zie Figuur 3 rechts). Dit wordt ondersteund door drukmetingen: gasproductie uit het noordelijker gelegen Ameland veld startte eerder dan gasproductie uit

Waddenvelden Nes, Moddergat, Lauwersoog Centraal, Lauwersoog West, Lauwersoog Oost en Vierhuizen Oost. In de tussenliggende tijd is de druk in laatstgenoemde velden ongewijzigd gebleven.



Figuur 3: Voorbeeld van breuk met een klein verzet waarbij drukcommunicatie mogelijk zou kunnen zijn (links) en een groot verzet waardoor geen drukcommunicatie mogelijk is tussen de velden (rechts).

Hetzelfde geldt voor de communicatie tussen de Waddenvelden en de zuidelijker gelegen Metslawier, Anjum en Ezumazijl velden. Gasproductie uit de drie laatstgenoemde velden is eerder begonnen dan uit de Waddenvelden, en al die tijd is de reservoirdruk in de Waddenvelden onveranderd. Daarom is het ook onwaarschijnlijk dat er communicatie is tussen de zuidelijker gelegen velden Metslawier, Anjum en Ezumazijl aan de ene kant en de Waddenvelden aan de andere kant.



Figuur 4: Illustratie van de Waddenvelden met de mogelijke aquifers die een rol spelen bij de drukvoorspellingen. Op basis van geologisch informatie en drukdata is het niet waarschijnlijk dat er laterale communicatie is tussen de velden.

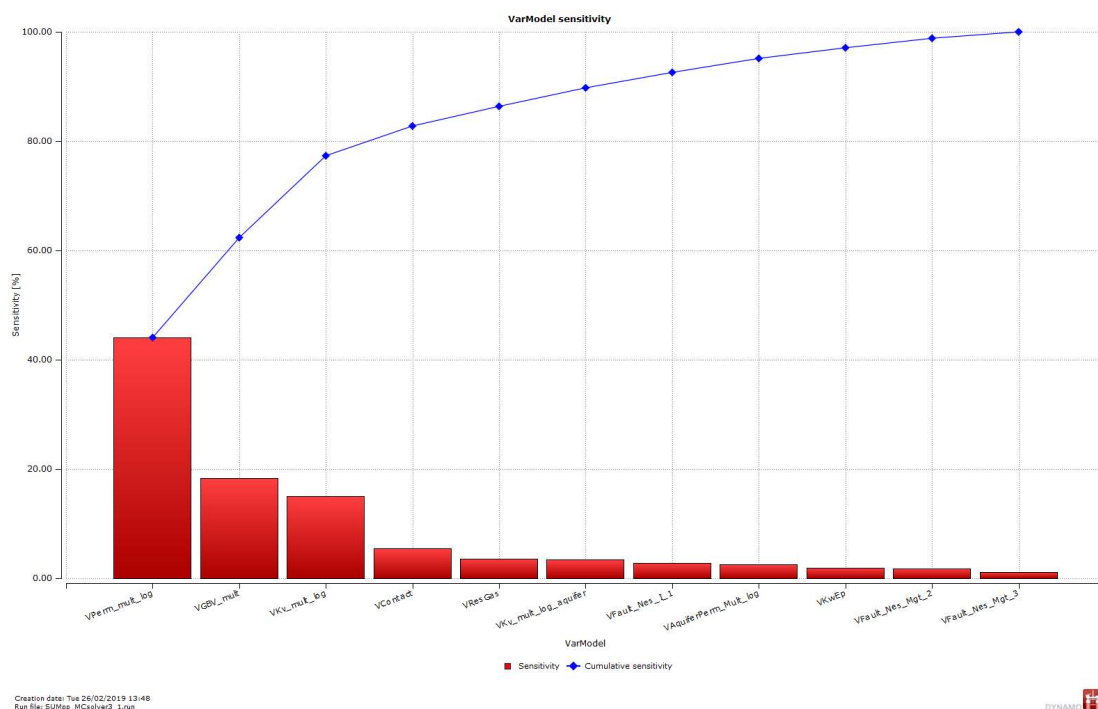
1.3 Invloed van reservoirparameters op drukken

Ter illustratie wordt in dit hoofdstuk beschreven hoe voor het Nes veld gekomen wordt tot de lage, mid en hoge modelrealisaties, zie [1] en de referenties daarin voor een uitgebreidere beschrijving. Nadat de onzekerheden zijn geïnventariseerd en bepaald is hoe deze gemodelleerd kunnen worden,

wordt vervolgens de invloed van de reservoirparameters onderzocht op de reservoirdrukken. Dit is grafisch gepresenteerd voor het Nes veld in Figuur 5. Hieruit valt op te maken dat de reservoirparameters met de grootste invloed op de reservoirdruk de eerste drie parameters in de Pareto-plot zijn:

- laterale permeabiliteit (Perm_mult_log)
- reservoirvolume (GBV_mult)
- verticale permeabiliteit (Kv_mult_log).

De andere parameters, te weten relatieve waterpermeabiliteit, diepte van het gas-water contact, hoeveelheid gas in water, permeabiliteit in de aquifer en breukdoorlatendheden voor de breuken binnen het veld, hebben nauwelijks invloed op de drukken voor de periode dat de drukken gemeten zijn. Mogelijk hebben deze parameters echter wel invloed op de toekomstige drukken.



Figuur 5: Pareto plot voor het Nes veld voor de gesimuleerde historische reservoirdrukken.

Vanzelfsprekend kan met de meetdata alleen het bereik verkleind worden van parameters die gevoelig zijn voor de meetdata. Dat betekent voor het Nes veld dat de gemeten drukken het bereik kunnen verkleinen voor de horizontale permeabiliteit, het reservoir volume (inclusief porositeit) en de verticale permeabiliteit. De onzekerheden die *niet* verkleind kunnen worden met de historische metingen zijn (de parameter naam in het model zoals genoemd in Figuur 5 staat tussen haakjes erachter):

- Diepte van het Gas-Water contact (Contact). Het onzekerheidsbereik is klein met enkele meters verschil tussen de hoogste en laagste waarde. Daarom heeft deze parameter ook een kleine invloed op de toekomstige drukvoorspellingen.
- Hoeveelheid gas in water (ResGas). Deze parameter bepaalt hoe de aquiferdruk reageert bij drukdaling. Bij hoge gassaturatie in de aquifer zal de druk minder dalen dan bij lage gassaturatie omdat het gas uitzet bij drukdaling.

- Verticale en laterale permeabiliteit in de aquifer ($K_{v_mult_log_aquifer}$ en $AquiferPerm_Mult$). Bij een hoge permeabiliteit in de aquifer zal de aquiferdruk sneller dalen dan bij lage permeabiliteit.
- Breukdoorlatendheden van de breuken binnen het gasveld, voor het Nes veld genaamd I1, MGT-2, MGT-3. Bij een hoge mate van breukdoorlatendheid zal de druk minder dalen dan bij een lage mate van breukdoorlatendheid, omdat het gasveld dat verbonden is met de put groter is.
- Relatieve permeabiliteit van het water (K_{wEp}). Als het water ten opzichte van het gas makkelijker kan stromen, kan de druk in de aquifer sneller dalen, maar kan het water ook sneller de put bereiken en de gasproductie bemoeilijken.

1.4 Lage / mid / hoge modelrealisaties

De methode die is toegepast om modelrealisaties te vinden die maximaal van elkaar verschillen in de ongevoelige parameterwaardes en toch de historische metingen kunnen reproduceren, is Design of Experiments (DoE) in combinatie met Markov Chain - Monte Carlo (MCMC). Dit is een van de meest toegepaste methodes voor het kalibreren van grootschalige simulatiemodellen in de olie-en gaswereld, zie bijvoorbeeld [4] en [5].

Zoals beschreven in [1] is de mobiliteit in de aquifer de grootste onzekerheid op de bodemdalingsvoorspelling, waarbij de mobiliteit in de aquifer bepaalt hoe het water zich kan verplaatsen in het reservoir en de druk in het gasveld kan beïnvloeden [3]. Om een goed bereik van de drukvoorspellingen te krijgen wordt de mobiliteit van de aquifer gevarieerd:

- een aquifer die niet mobiel is, waardoor alleen de druk daalt in het gasreservoir, resulterend in minder bodemdaling. Dit is de lage modelrealisatie.
- een aquifer die beperkt mobiel is door de aanwezigheid van gas in het reservoir en daardoor de druk in de aquifer minder snel laat zakken, resulterend in de mid case bodemdaling.
- een aquifer die volledig mobiel is, waardoor zowel de druk daalt in het gas en de aquifer, resulterend in meer bodemdaling. Dit is de hoge modelrealisatie.

Andere parameters zijn zodanig aangepast dat de drukmetingen in overeenstemming zijn met de gesimuleerde drukken [1]. Dit heeft geresulteerd in drie modelrealisaties die de historische metingen kunnen reproduceren en verschillende drukvoorspellingen van met name de aquiferdruk geven. Het wordt niet waarschijnlijk geacht dat er een modelrealisatie is die in meer bodemdaling kan resulteren dan de hoge modelrealisatie, en die ook nog de historische drukmetingen kan reproduceren als gevolg van de historische productie.

Voor het veld Vierhuizen dat bijna klaar is met produceren kan het model met een aquifer die niet mobiel is niet de historische drukdata reproduceren. Als gevolg hiervan zijn er dus twee in plaats van drie scenario's voor dit veld. Beide reproduceren goed de historische metingen.

Vergelijkbaar met de werkwijze van de Meet- en Regelcyclus van 2017 worden in dit rapport de drukmetingen uit 2018 (in totaal 10, zie Tabel 3) vergeleken met de drukvoorspellingen van de modellen. De totaal geproduceerde volumes tot eind 2018 staan in Tabel 4. Vervolgens worden met de gekalibreerde reservoirmodellen de drukprognoses voor ieder veld gegeven als gevolg van de verwachte toekomstige gasproductie. Deze drukprognoses worden tenslotte gebruikt als input voor de bodemdalingsvoorspellingen.

Veld	Datum	Put	Gemeten druk (op reservoir niveau, bara)	Type meting
Nes	13/04/2018	MGT-2	165.9 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	13/04/2018	MGT-3	166.3 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	13/04/2018	MGT-4A	165.9 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Nes	26/09/2018	MGT-4A	159.4 (@ 3700 mTVDNAP)	SPG
Nes	13/04/2018	MGT-5	169.2 (@ 3700 mTVDNAP)	CITHP
Moddergat	13/04/2018	MGT-1B	160.0 (@ 3860 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Centraal	16/04/2018	LWO-2	151.6 (@ 4035 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-Oost	13/04/2018	LWO-1B	157.6 (@ 4050 mTVDNAP)	CITHP
Lauwersoog-West	13/04/2018	LWO-3	128.7 (@ 4060 mTVDNAP)	CITHP
Vierhuizen Oost	18/07/2018	VHN-1C	102.4 (@ 3850 mTVDNAP)	CITHP

Tabel 3: Reservoirdrukmetingen in 2018. Bij CITHP (Closed-in Tubing Head Pressure) metingen wordt de druk gemeten aan het oppervlak en geconverteerd naar reservoirniveau. Bij SPG (Static Pressure Gradient) metingen wordt de druk gemeten op reservoirniveau.

Veld	Cumulatieve productie t/m 2018 (10 ⁶ Nm ³)	Productie volgens 2011 winningsplan in 2018 (10 ⁶ Nm ³)	Actuele productie in 2018 (10 ⁶ Nm ³)
Nes	10320	943	763
Moddergat	4334	184	233
Lauwersoog-C	130	3	7
Lauwersoog-West	1500	60	88
Lauwersoog-Oost	2133	87	124
Vierhuizen-Oost	1628	0	56
Totaal*	20045	1277	1271

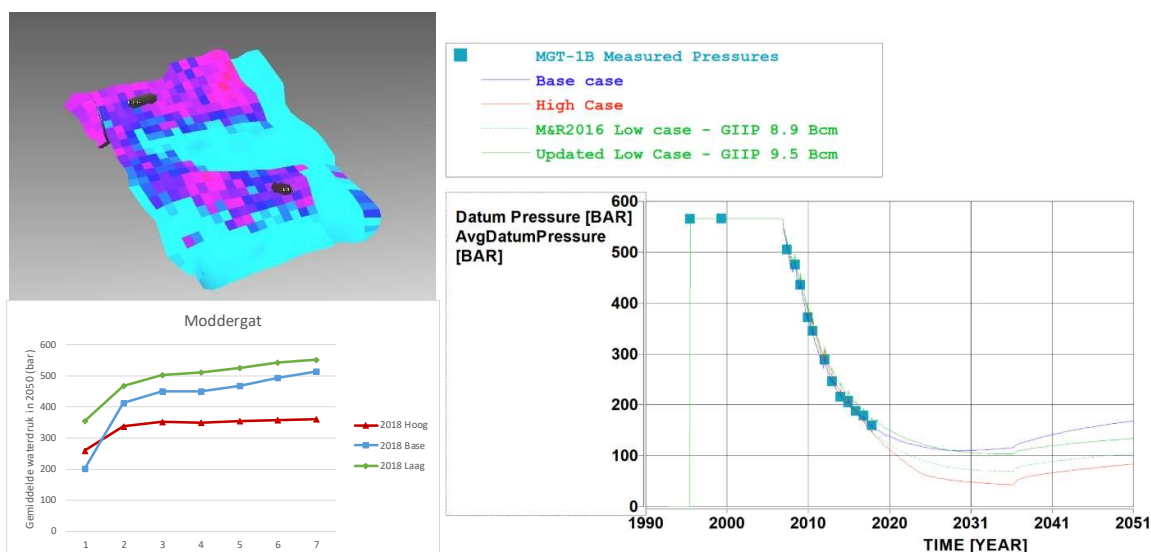
Tabel 4: Productie per voorkomen tot en met 31/12/2018.

2 Moddergat

Het gas uit het Moddergat veld wordt geproduceerd met de MGT-1b put. De laatste drukmeting in het Moddergat gasveld is een Closed in Tubing Head Pressure (CiTHP) van 13 april 2018. Net als in de vorige cyclus past dit datapunt, aangegeven met de lichtblauwe diamantvorm in Figuur 6, goed in de range van voorspellingen. De basis en hoge realisatie zijn ongewijzigd vergeleken met voorgaande jaren. De lage realisatie, waarbij de aquifer zeer beperkt daalt in druk en er geen residueel gas in de aquifer is, is dit jaar veranderd om de druk rondom de put hoger te laten zijn dan in de druk voor de mid case. Hiertoe is de GIIP, het gas volume dat initieel in het veld aanwezig is, vergroot van 8.9 Bcm naar 9.5 Bcm. Dit is in lijn met de GIIP onzekerheid, waarvan bepaald is dat de P90 gelijk is aan 11.6 Bcm.

Linksboven in Figuur 6 is een bovenaanzicht van het reservoirsimulatiemodel te zien, waarbij het gas in magenta/blauw is aangegeven en het water in cyaan. De aquifer bevindt zich vooral onder het gas, een zogenaamde verticale aquifer. De locatie van de huidige productieput, MGT-1B, is aangegeven in het noordwesten van het veld. Een nieuwe put in het zuidelijk gedeelte van het Moddergat veld zit net als in 2017 niet in de verwachte productievoorspelling.

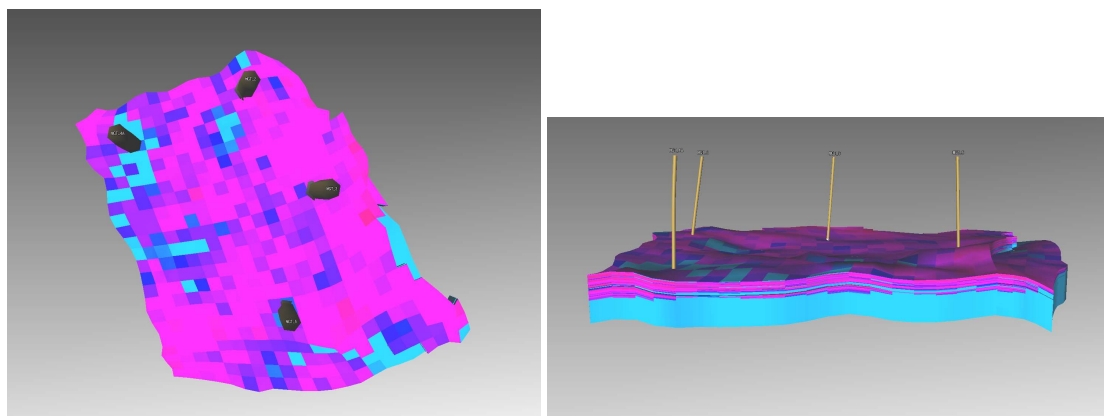
Tenslotte is linksonder in Figuur 6 de druk in 2050 te zien per Rotliegend zone ROSLU1 tot en met ROSLU6, waarbij ROSLU6 de diepste zone is. In de lage realisatie (diamantvormen in Figuur 6 linksonder) is de waterdruk in 2050 het hoogst, resulterend in de minste bodemdaling, en in de hoge realisatie is de waterdruk in 2050 het laagst, resulterend in de meeste bodemdaling. Hieruit valt ook te zien dat de basisrealisatie voor bijna alle zones tussen de hoge en lage realisatie ligt, behalve voor de bovenste ROSLU1 zone waar het gas zich bevindt. Omdat de drukken per laag de drukken zijn die worden gebruikt om de bodemdaling te berekenen, is het geoorloofd om dit inderdaad de basisrealisatie te noemen, ook al is in de rechterfiguur te zien dat voor de datumdiepte van 3860 m TVDNAP waar het gas zich bevindt de basisrealisatie uiteindelijk hoger in druk is in 2050 dan de hoge en lage modelrealisatie.



Figuur 6 linksboven: bovenaanzicht van het Moddergat veld (noord boven) met de initiële verdeling van gas (magenta/blauw) en water (cyan). Rechts: MGT-1B gemeten drukken (diamantvormen) en hoog/mid/laag drukprognoses. Linksonder: hoog/mid/laag voorspelde gemiddelde waterdruk in 2050 per Rotliegend reservoirzone (7 dieper dan 1).

3 Nes

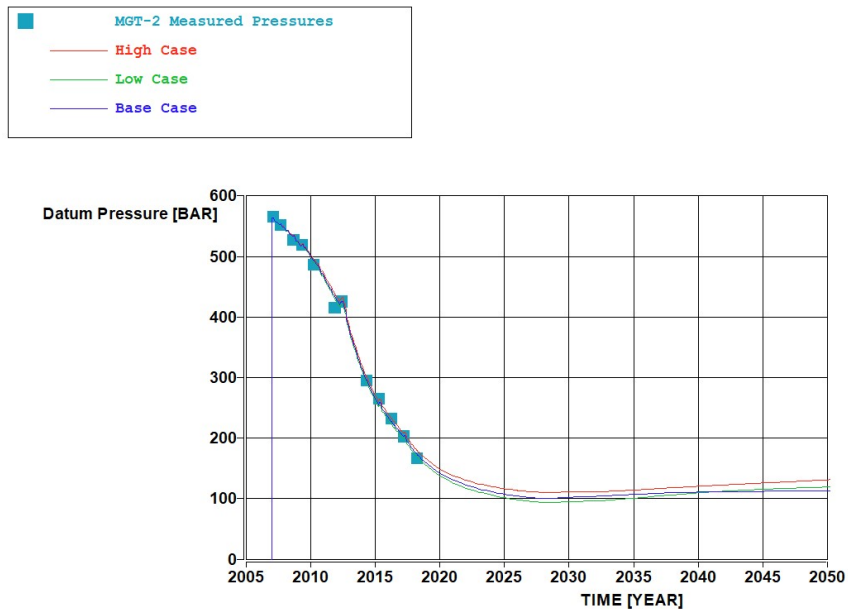
Het gas uit het Nes veld wordt geproduceerd met vier putten, te weten MGT-2, MGT-3, MGT-4 en MGT-5, zie Figuur 7. De aquifer van het Nes veld bevindt zich in de diepere zones. De grootste onzekerheid is in welke mate de verticale aquifer depleteert, waarbij het lage scenario de minste drukdaling in de aquifer voorspelt en het hoge scenario de meeste drukdaling in de aquifer voorspelt.



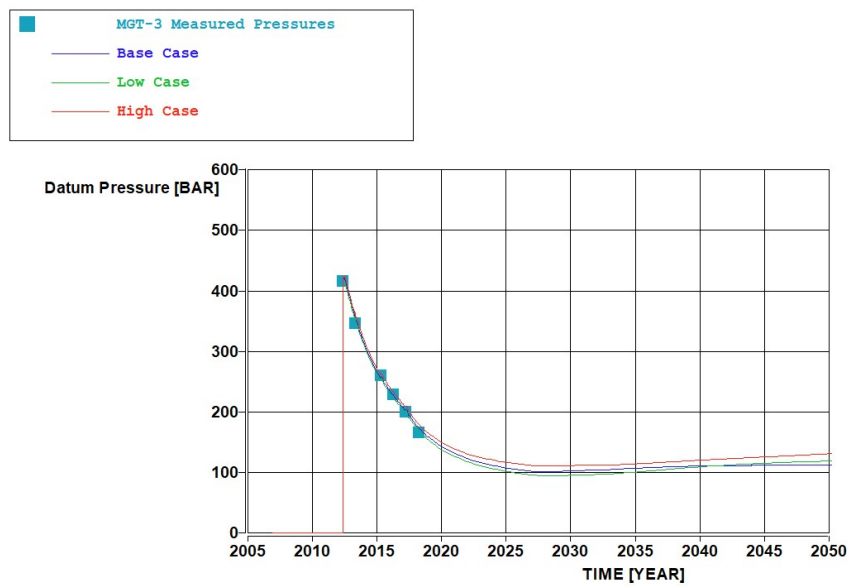
Figuur 7: Bovenaan- (links; noord is boven) en zij-aanzicht vanuit het Westen (rechts) van het Nes veld met de locaties van de vier productieputten. De kleuren geven de saturatie aan, waarbij magenta/donkerblauw gas weergeeft en cyaan water. Dit veld heeft een verticale aquifer in de diepere ROSLU zones.

De laatste drukmetingen dateren uit april 2018, weergegeven in Figuur 8 tot en met Figuur 11 met de laatste blauwe diamantvormen. Uit de drukmetingen blijkt dat alle vier de putten hetzelfde drukverloop laten zien. Hieruit kan geconcludeerd worden dat ze allemaal uit hetzelfde aaneengesloten reservoir produceren. Net als in voorgaande jaren passen de nieuwe datapunten goed in de range van drukvoorspellingen. Er is dus geen noodzaak om de modellen uit 2016 te herkalibreren.

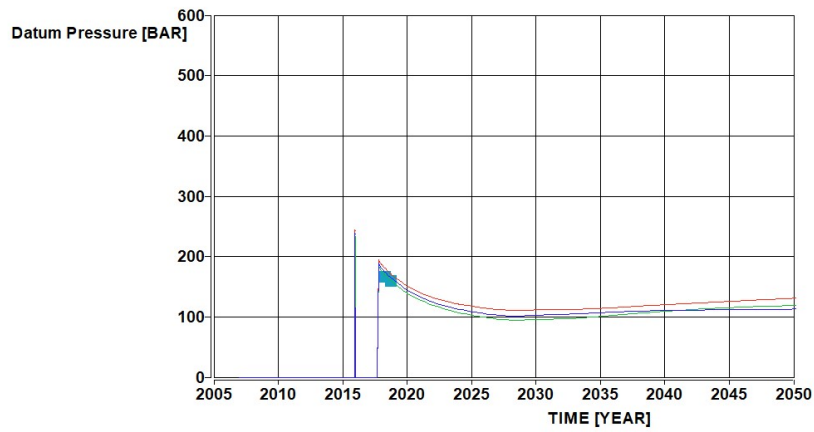
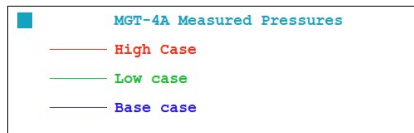
Sinds september 2017 produceert ook de put MGT-4 in het noordwesten van het Nes veld. De waterproductie van deze put is hoger dan in de andere drie putten. De verwachting is dat voor het noordwestelijke gedeelte van het veld er water uit het onderliggende aquifer in ROSLU3 naar de perforaties in ROSLU1 in MGT-4 stroomt en wordt meegeproduceerd. Met een water-gas ratio van ongeveer 90 cm³/m³ gaat het hier over ongeveer 20 m³/d, wat vergeleken met een totale gasproductie van 1.9 miljoen m³/d uit het Nes veld een verwaarloosbare invloed heeft op de druk, maar een significante invloed op het productiegedrag heeft. In 2019 wordt verder onderzocht waar het water vandaan komt. Naar aanleiding van het productiegedrag van MGT-4 is de voorspelde gasproductie uit het Nes veld gereduceerd met 0.5 Bcm, waardoor de voorspelde druk hoger blijft.



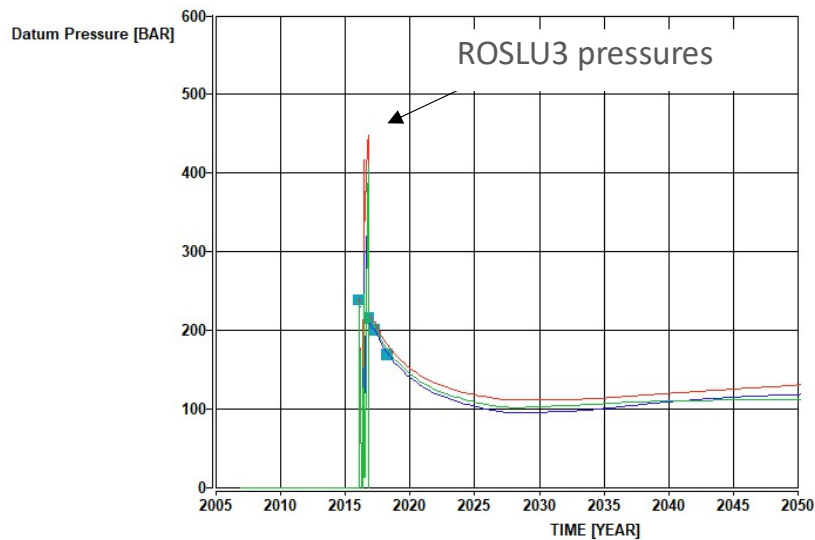
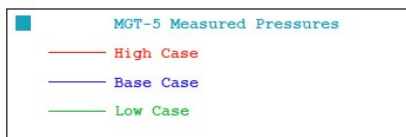
Figuur 8 - MGT-2 Hoog/Mid/Laag drukprognoses en gemeten drukken.



Figuur 9 - MGT-3 Hoog/Mid/Laag drukprognoses en gemeten drukken.



Figuur 10 - MGT-4 Hoog/Mid/Laag drukprognoses en gemeten druk. MGT-4 kwam later in productie en in 2018 is het eerste drukpunt gemeten.

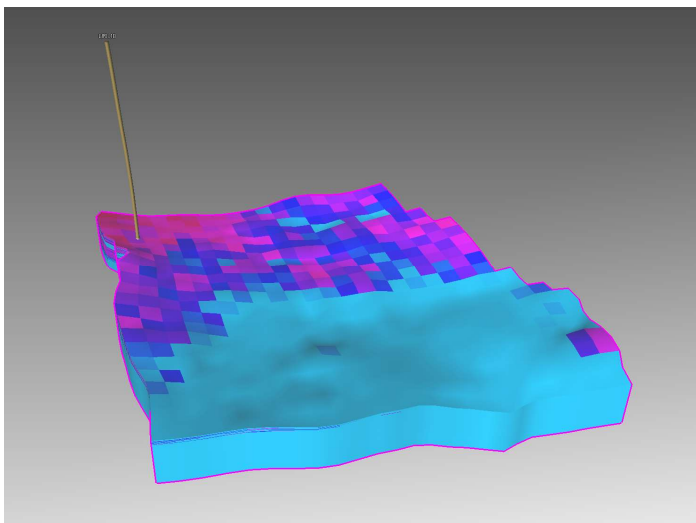


Figuur 11 - MGT-5 Hoog/Mid/Laag drukprognoses en gemeten drukken. Begin 2016 was ook ROSLU3 geperforeerd. Hieruit is kortstondig gas geproduceerd met hogere druk. De ROSLU3 is afgesloten zodra er te veel water meekwam. Sindsdien is deze put alleen geperforeerd in de ROSLU1, net als de andere Nes putten.

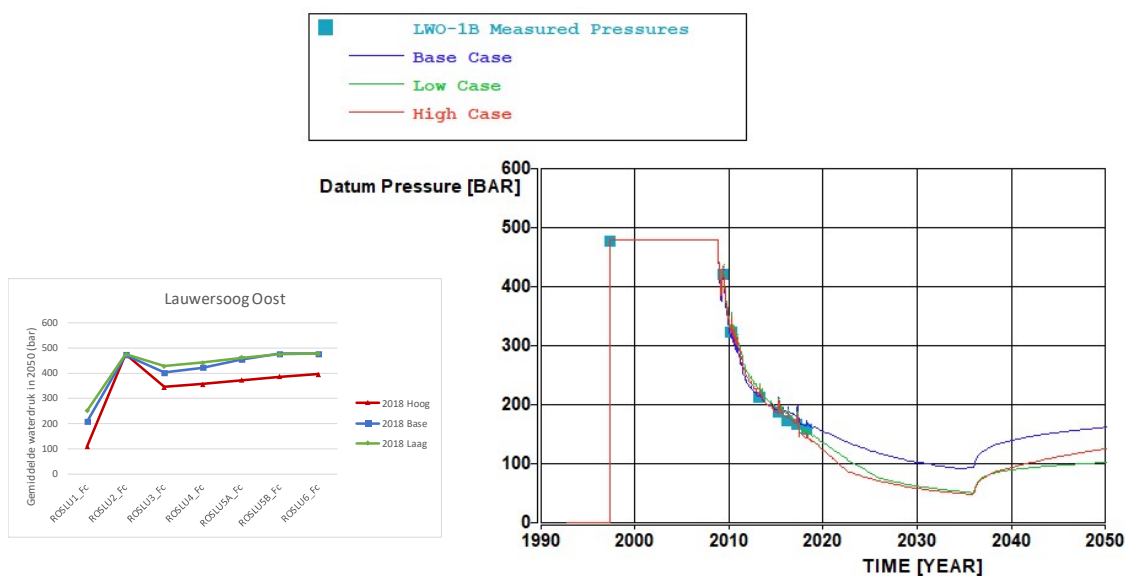
4 Lauwersoog Oost

Het gas uit het Lauwersoog Oost veld wordt geproduceerd met put LWO-1B. De aquifer bevindt zich zowel onder het gas als ten zuiden van het gas, zie Figuur 12. De laatste drukmeting van dit veld dateert uit 13 april 2018. Net als het 2017 datapunt past ook dit nieuwe datapunt goed in de range van voorspellingen, zie Figuur 13 rechts. Er is dus geen noodzaak om de modellen te herkalibreren.

De voorspelde gasproductie is gereduceerd met 0.15 Bcm vergeleken met 2017, waardoor de voorspelde druk marginaal hoger blijft. Net als voor het Moddergat veld is de druk in de aquifers in de lage realisatie het hoogst en in de hoge realisatie het laagst, zie Figuur 13 links.



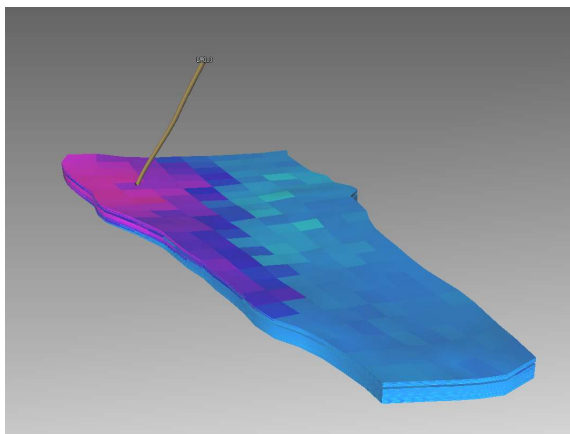
Figuur 12: Het Lauwersoog Oost veld met put LWO-1B, gezien vanuit het zuiden. Magenta/donkerblauw geeft gas weer en cyaan water.



Figuur 13 rechts: LWO-1B hoog/mid/laag drukprognoses en gemeten drukken. Links: hoog/mid/laag voorspelde gemiddelde waterdruk in 2050 per Rotliegend reservoirzone 1 tot en met 6, waarbij ROSLU6 het diepst is.

5 Lauwersoog West

Het gas uit het Lauwersoog West veld wordt geproduceerd met put LWO-3. De aquifer bevindt zich zowel onder het gas als ten zuidoosten van het gas, zie Figuur 14.

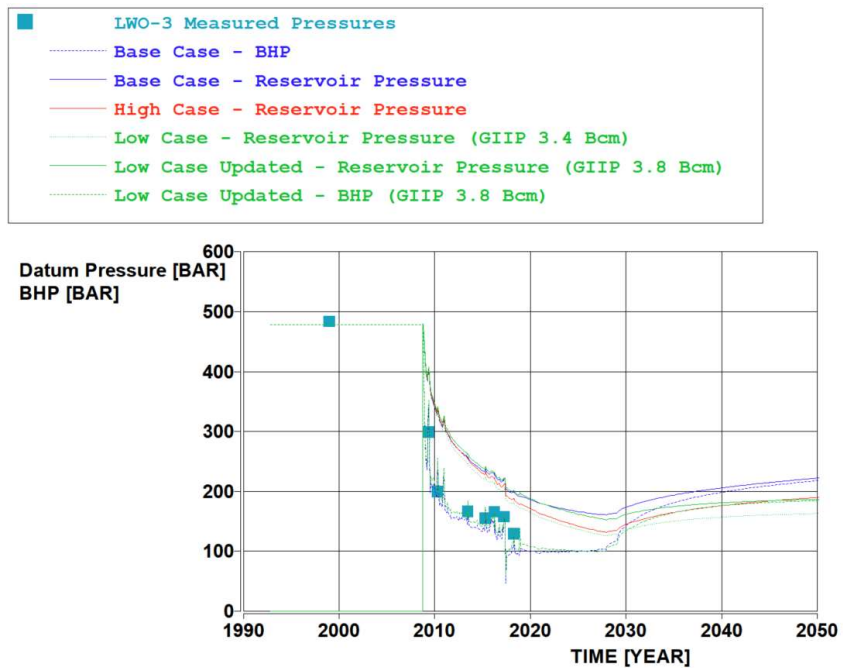


Figuur 14: Het Lauwersoog West veld met put LWO-3, gezien vanuit het zuidwesten. Magenta geeft gas weer en cyaan is water.

De meest recente drukmeting in LWO-3 is gebaseerd op een Closed in Tubing Head Pressure gemeten in april 2018. Omdat de heterogeniteiten in dit veld relatief groot zijn, is net als in voorgaande jaren het model gekalibreerd door de 'bottom hole' drukken (bottom-hole pressures, BHP) te gebruiken. Door de grote verschillen in gesteente-eigenschappen zijn de verschillen in druk in de verschillende lagen ook groot. De gemiddelde druk in het gasreservoir is daarom een stuk hoger dan de druk die gemeten wordt in de put na een beperkte periode van insluiting. Als de periode van insluiting zo lang zou zijn dat de drukken in alle gesteentelagen met elkaar in evenwicht zijn, dan zou de bottom-hole druk gelijk zijn aan de gemiddelde reservoirdruk.

Het laatste drukpunt gemeten in april 2018 vertoont een uitstekende overeenkomst met de voorspelde bottom-hole drukken van de modellen, zie Figuur 15. Vergeleken met vorig jaar is de lage modelrealisatie aangepast. De bottom-hole druk voor de lage modelrealisatie was namelijk te laag vergeleken met de laatste meting. Daarom is het initiële gasvolume in het veld vergroot van 3.4 naar 3.8 Bcm (+12%). Dit valt binnen het bereik van initiële gasvolumes die mogelijk zijn volgens de geologische modellen. Door deze aanpassing valt het gemeten drukpunt weer binnen de modelvoorspelling.

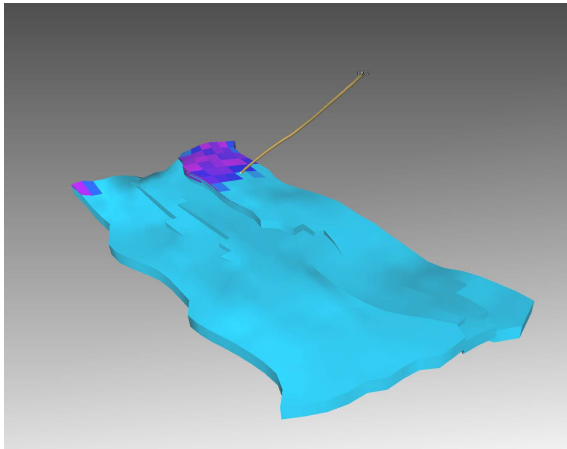
De voorspelde toekomstige gasproductie is gereduceerd met 0.17 Bcm vergeleken met 2017, waardoor de voorspelde druk marginaal hoger blijft. Net als voor de andere velden is de uiteindelijke waterdruk in de lage realisatie het hoogst en in de hoge realisatie het laagst.



Figuur 15: LWO-3: de drukprognoses (laag, mid en hoog) zijn weergegeven met de continue lijnen, terwijl de 'bottom-hole' druk met de gestippelde lijn is weergegeven. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

6 Lauwersoog Centraal

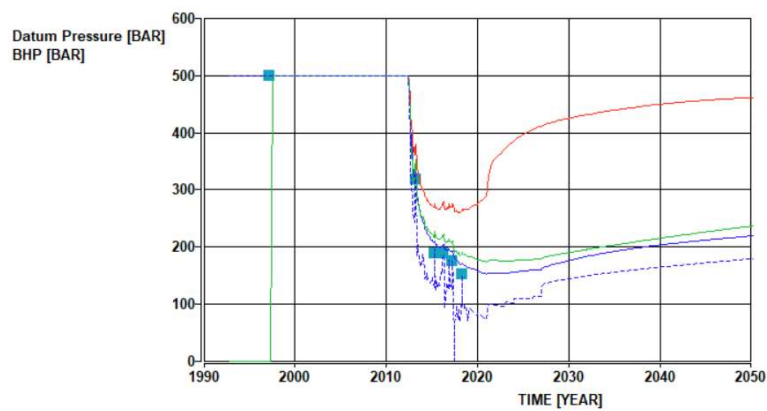
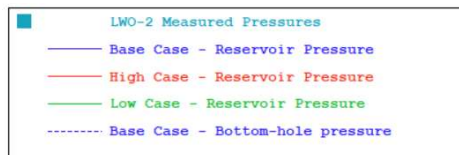
Het gas uit het Lauwersoog Centraal veld wordt geproduceerd met put LWO-2. De aquifer bevindt zich zowel onder het gas als ten zuidoosten van het gas, zie Figuur 16.



Figuur 16: Het Lauwersoog Centraal veld met put LWO-2, gezien vanuit het zuidwesten. Magenta en donkerblauw geeft gas weer en de aquifer is weergegeven in cyaan.

Het Lauwersoog Centraal veld is het kleinste van de Waddenvelden en kan niet meer continu produceren doordat er behalve gas ook water wordt geproduceerd en omdat er een obstructie in de put aanwezig is. Daardoor is het lastig om betrouwbare metingen van de druk in het reservoir te krijgen. Daarbij komt dat door de grote heterogeniteit in het veld er gekalibreerd wordt op de bottom-hole drukken in plaats van direct op de reservoirdrukken. De laatste drukmeting uit april 2018 komt goed overeen met de gemodelleerde bottom-hole druk, zie Figuur 17.

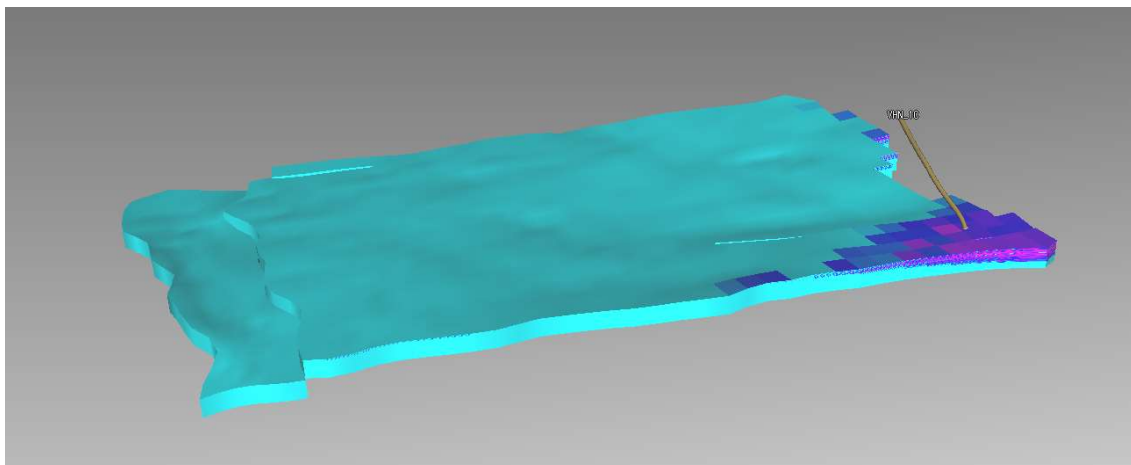
De hoge modelrealisatie (met een mobiele aquifer en dus veel drukdaling in de aquifer) is aangepast omdat de historische productie tot 2018 niet geheel gehaald werd in het model. Dit werd veroorzaakt door de hoge water-gas ratio en de lage reservoirdruk in de hoge modelrealisatie. Daartoe is in deze realisatie het initiële gasvolume vergroot (i.e. GBV multiplier vergroot van 0.86 naar 1.0) om de druk minder snel te laten dalen en is de relatieve permeabiliteit van water verkleind (i.e. Corey exponent in het relatief permeabiliteitsmodel is vergroot van 3 naar 4) om minder water in de put te laten stromen. Het effect van deze wijzigingen op de toekomstige drukken is marginaal.



Figuur 17: LWO-2: de drukprognoses (laag, mid en hoog) in het gasreservoir zijn weergegeven met de continue lijnen, terwijl de 'bottom-hole' druk met de gestippelde lijn is weergegeven. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

7 Vierhuizen Oost

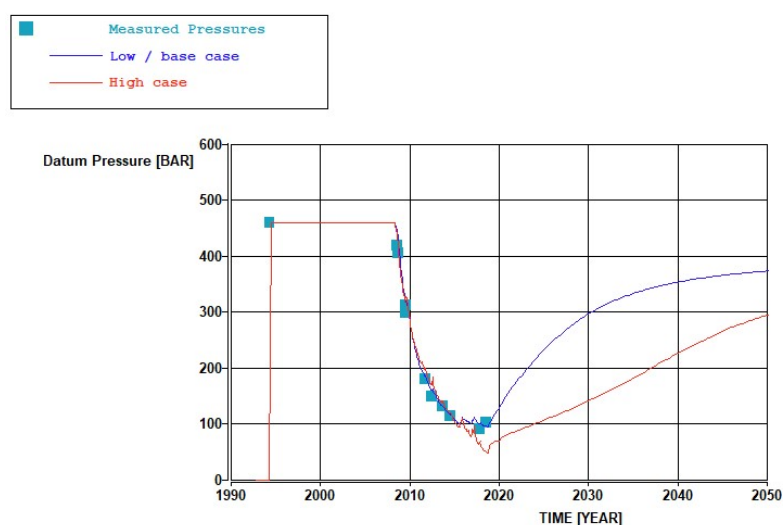
Het gas uit het Vierhuizen Oost veld wordt geproduceerd met put VHN-1C. Al 89% van het aanwezige gas is geproduceerd en de verwachting is dat in totaal 90% geproduceerd kan worden. De aquifer bevindt zich zowel onder het gas als ten noordwesten van het gas, zie Figuur 18.



Figuur 18: Het Vierhuizen Oost veld met put VHN-1C, gezien vanuit het zuiden. Magenta en donkerblauw geeft gas weer en de aquifer is weergegeven in cyaan.

De laatste SPG-drukmeting dateert van 30 oktober 2017, weergegeven in Figuur 19 met de blauwe blokken. In juli 2018 is de laatste Closed-in Tubing Head Pressure gemeten na 3 dagen ingesloten te zijn geweest. Omgerekend naar datumniveau is de druk in het reservoir 102 bar, geplot als laatste drukmeting in Figuur 19. Deze metingen past goed bij de voorspellingen, vooral bij de base case.

Ten opzichte van de vorige rapportage is voor de hoge realisatie de relatieve permeabiliteit van water aangepast om de toevoer van water naar de put te vertragen, zodat de 2018 productie ook door het model gehaald kon worden. Dit heeft nauwelijks invloed op de drukprognoses.

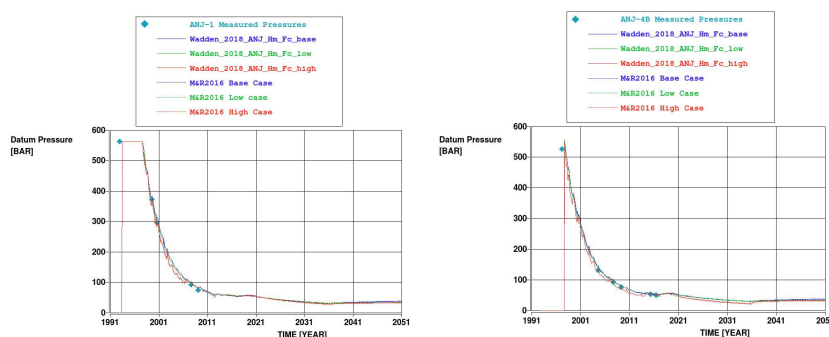


Figuur 19: Vierhuizen Oost: de drukprognoses (laag/mid en hoog) in het gasreservoir zijn weergegeven met de continue lijnen. De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.

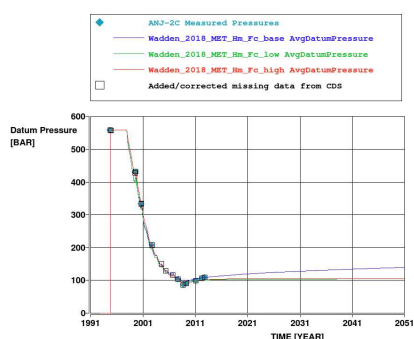
8 Metslawier, Anjum en Ezumziji

De velden Metslawier, Anjum en Ezumaziji zijn op dit moment ingesloten. De verwachting is dat Anjum en waarschijnlijk ook Ezumaziji vanaf 2020 weer in productie worden genomen.

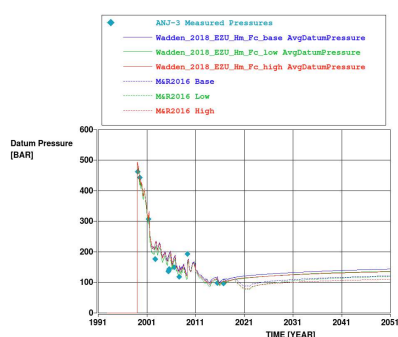
In 2018 zijn er geen drukmetingen gedaan in deze velden. Ter volledigheid worden hieronder de drukprognoses gegeven.



Figuur 20: Anjum drukprognoses (laag, mid en hoog modelrealisaties). De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken.



Figuur 21: Metslawier drukprognoses (laag, mid en hoog modelrealisaties). De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken. Hier is goed te zien dat de drukken omhooggaan als de productie stopt.



Figuur 22: Ezumaziji drukprognoses (laag, mid en hoog modelrealisaties). De metingen zijn weergegeven met de blauwe blokken. In het basisplan komt Ezumaziji put ANJ-3 niet in bedrijf. Als dat wel verandert, dan zou de druk 25 bar lager uitkomen (5% van de initiële druk).

9 Conclusies

- Tot 31 december 2018 is 70% van het aanwezige gas geproduceerd uit de velden onder de Wadden, Moddergat, Nes, Lauwersoog Oost, Lauwersoog West en Vierhuizen Oost, en de zuidelijker gelegen velden Anjum, Ezumazijl en Metslawier.
- De drukmetingen uit 2018 passen over het algemeen goed bij de lage, mid en hoge modelrealisaties. Enkele modelrealisaties zijn dit jaar veranderd vergeleken met vorig jaar:
 - Voor het Moddergat veld is alleen de *lage modelrealisatie* aangepast, zodat de druk rondom de put hoger is dan de druk voor de mid case. Hiertoe is de GIIP, het gas volume dat initieel in het veld aanwezig is, enigszins vergroot. De invloed op de druk in de aquifer is zeer klein.
 - Voor het Nes veld is er geen noodzaak om de modellen te herkalibreren. Wel is de verwachte toekomstige productie 0.5 Bcm lager, wat resulteert in hogere drukprognoses.
 - Voor het Lauwersoog Oost veld is er geen noodzaak om de modellen te herkalibreren. Wel is de verwachte productie 0.15 Bcm lager, wat resulteert in ietwat hogere drukprognoses.
 - Voor het Lauwersoog West veld passen de gemeten drukken goed bij de mid en hoge modelrealisaties. Dit jaar is de lage modelrealisatie aangepast: de bottom-hole druk voor de lage modelrealisatie was namelijk te laag vergeleken met de laatste meting. Daarom is het initiële gasvolume in het veld vergroot van 3.4 naar 3.8 Bcm (+12%). Ook is de verwachte toekomstige productie 0.17 Bcm lager, wat resulteert in ietwat hogere drukprognoses.
 - Voor het Lauwersoog Centraal veld past de laatste drukmeting goed bij de gemodelleerde drukken. Wel is de *hoge modelrealisatie* (met een mobiel aquifer en dus meer drukdaling in de aquifer) aangepast, omdat de historische productie niet gehaald werd in deze modelrealisatie. Hiertoe is het initiële gasvolume marginaal vergroot en de relatieve permeabiliteit van water verkleind.
 - Voor het Vierhuizen Oost veld past de laatste drukmeting goed bij gemodelleerde drukken. Ten opzichte van de vorige rapportage is voor de *hoge realisatie* wel de relatieve permeabiliteit van water aangepast om de toevoer van water naar de put te vertragen, zodat de 2018 productie ook door het model gehaald kan worden. Dit heeft nauwelijks invloed op de drukprognoses.
- De voorkomens Anjum, Ezumazijl en Metslawier zijn ingesloten en er zijn geen nieuwe drukmetingen beschikbaar. De modellen en drukprognoses voor deze velden zijn niet veranderd vergeleken met afgelopen jaar.
- Uit de vergelijking tussen de laatste drukmetingen en de prognoses van de modelrealisaties per veld blijkt duidelijk dat de modellen goed gekalibreerd zijn.

Referenties

- [1] "Dynamic Reservoir Modelling of Wadden Fields for Subsidence. Meet & Regel 2016", NAM rapport EP201703201178.
- [2] "Waddenzee Meet- & Regelcyclus 2017: Controle van de reservoirmodellen met de nieuwe drukmetingen van 2017", NAM rapport EP201803212301.
- [3] Samenvatting oordeel over monitoringsjaar 2017.
- [4] Li, B., Bhark, E. W., Gross, S. J., Billiter, T. C., & Dehghani, K. (2018, September 24). Best Practices of Assisted History Matching Using Design of Experiments. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/191699-MS.
- [5] Van Doren, J., Van Essen, G., Wilson, O. B., Zijlstra, E. B. 2012. A comprehensive workflow for assisted history matching applied to a complex mature reservoir. Paper SPE 154383 presented at the SPE Europec/EAGE Annual Conference, Copenhagen, Denmark, 4-7 June.
- [6] "Het gevolg van mogelijke aquiferdepletie in Nes en Moddergat op de bodemdalingssnelheid in Pinkegat", november 2018, NAM notitie EP201811205027.
- [7] Verweij, J.M., H.J. Simmelink, J. Unterschultz and N. Witmans, "Pressure and fluid dynamic characterisation of the Dutch subsurface", Netherlands Journal of Geosciences, Vol. 91, Issue 4, pp. 465-490, 2012.