

Evaluatie van de doorlatendheid van breuken van de Waddenzee velden en implicaties voor bodemdaling

NAM-notitie EP202007201552

Oktober 2020

1 Inleiding

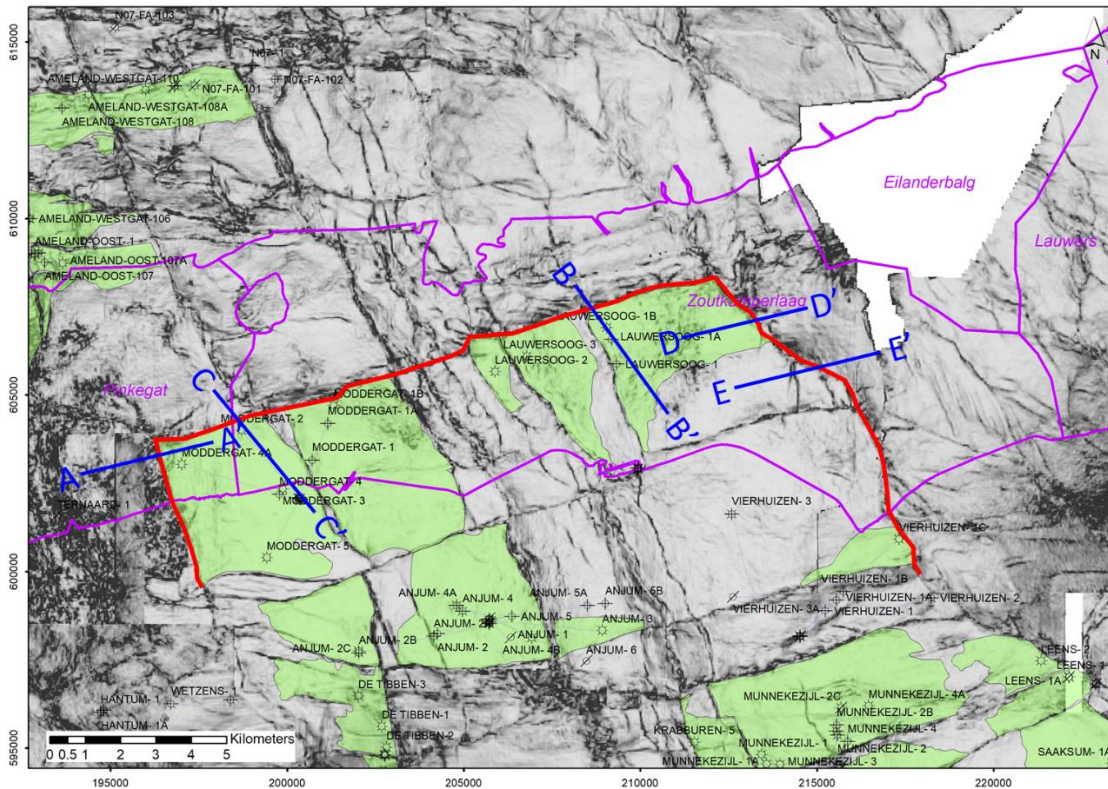
Bodemdaling is het gevolg van drukdaling in de reservoirgesteenten door productie. Dit geldt zowel voor drukdaling in het gas, als in watervoerende lagen. Ieder jaar wordt daarom een rapport geschreven dat inzicht geeft in de bodemdaling van de Waddenzee. Deze jaarlijkse rapportage wordt uitgevoerd volgens het Meet- en Regelprotocol en getoetst door de Auditcommissie MER. Naar aanleiding van de rapportage over het jaar 2019 heeft de commissie de vraag gesteld om na te gaan of er “worst-case” scenario’s te bedenken zijn die op dit moment, vanwege hun zeer geringe waarschijnlijkheid, niet meegenomen worden in de beschreven scenario’s zoals opgenomen in de rapportage. De commissie vraagt om na te gaan welk effect dergelijk scenario’s hebben op de bodemdaling. Meer concreet is gevraagd naar een scenario waarbij er een plotselinge doorbraak van water zal plaatsvinden uit de laterale aquifers naar de gedepleteerde gasvelden via een breuk. Daarom is een inschatting gemaakt of er drukdaling kan plaatsvinden in de omringende blokken ten westen, noorden en oosten van de Waddenzee velden. In het tweede deel van dit document is gekeken naar een scenario waarbij er gas en/of water vanuit het ene veld naar het andere veld stroomt.

2 Evaluatie van de doorlatendheid van randbreuken

2.1 Methodiek

Voor het inschatten van een drukverbinding tussen de Waddenzee velden en de omliggende aquifers is de geometrie van de randbreuken (Figuur 1) bestudeerd. Ten eerste is gekeken welke gesteentepakketten er aan weerszijden van de breuken voorkomen, en welke gemiddelde dikte en eigenschappen die hebben. Dit is hieronder beschreven in de sectie Stratigrafie (Tabel 1).

In de daaropvolgende sectie is op basis van seismische data voor de verschillende randbreuken geanalyseerd welke gesteentepakketten met elkaar in contact zijn aan weerszijde van de breuk. Hiervoor zijn verticale doorsnedes van de structuur gebruikt met daarin de verschillende laagpakketten geïnterpreteerd. Uiteindelijk zijn verschillende hypothetische scenario’s geïdentificeerd en wordt de invloed daarvan op de bodemdaling kwalitatief beschreven.



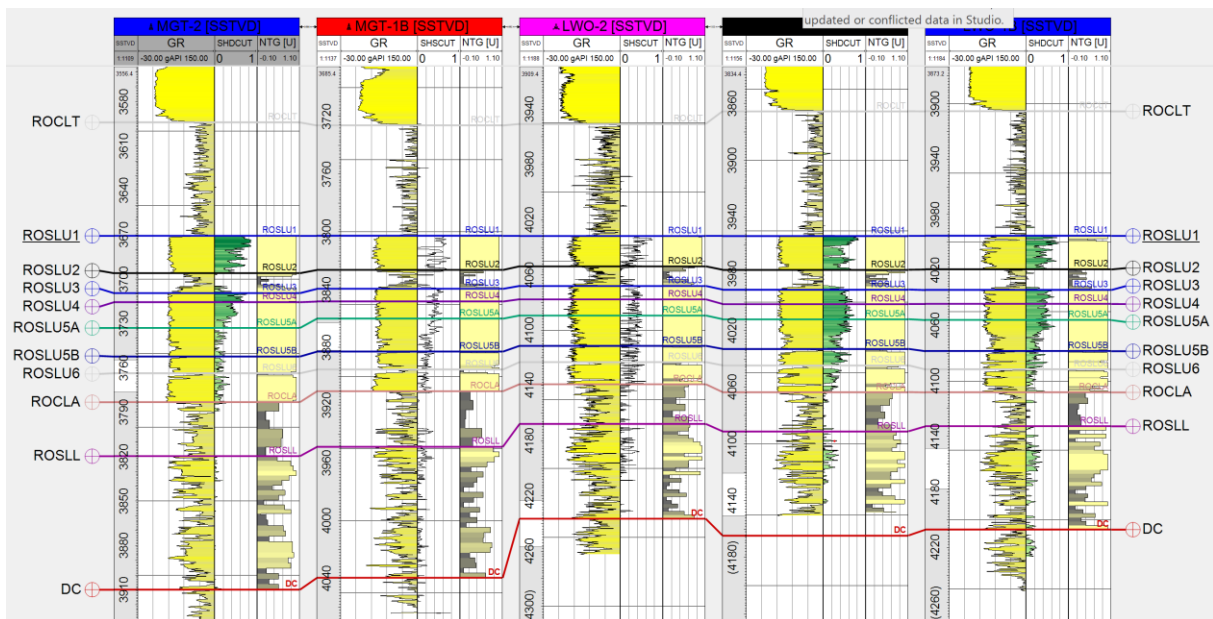
Figuur 1, Overzichtskartaal van de Waddenzee gasvelden en putten. In rood zijn de randbreuken aangegeven die besproken worden in dit rapport, de paarse markering laat de kombergingsgebieden zien. De dwarsdoorsneden die voor de analyse gebruikt zijn aangegeven in blauw.

2.2 Stratigrafie

Hieronder worden de verschillende formaties en laagpakketten beschreven die worden meegenomen in de analyse in deze studie. Dit zijn zowel de reservoirformaties voor de gasvelden, maar ook eventuele boven- en onderliggende lagen die de velden langs de randbreuken kunnen begrenzen. Figuur 2 laat een correlatie zien van de laagpakketten die tot de Rotliegend groep behoren, waarvan het Slochteren Zandsteen reservoir deel uitmaakt. Op deze correlatie is te zien dat de diktes van de verschillende laagpakketten zeer constant zijn.

Tabel 1. Lithostratigrafische kolom van de lagen die in dit rapport beschreven worden

 <p>ZE zout</p>	<p><u>Zechstein zout:</u> Steenzout of haliet formatie die de regionale afdekkende laag vormt. Het gesteente is plastisch waardoor het open ruimtes kan opvullen. Hierdoor heeft steenzout geen porositeit en doorlatendheid.</p> <p><u>Basis Zechstein:</u> De formaties aan de basis van de Zechstein Groep bestaan uit twee afzettingscycli van anhydriet (roze) en carbonaat (blauw). Beide formaties zijn zeer dicht en worden gezien als afdekkende lagen. De carbonaten zijn lokaal dolomitisch van samenstelling. Anhydriet heeft geen porositeit en permeabiliteit. De carbonaten hebben heel lokaal kleine breukjes die gas of water kunnen bevatten. De gemiddelde porositeit is < 1%</p> <p><u>ROCLT</u> De Ten Boer kleisteen is een pakket van ~90m dik. In dit noordelijke deel van Nederland bestaat deze eenheid vrijwel geheel uit klei en silt. De weinige zandlenzen die lokaal voorkomen in voor zijn niet over grote afstanden vervolgbaar. Door het hoge percentage klei wordt deze formatie gezien als een afdekkende, ondoorlatende laag.</p> <p><u>ROSLU</u> Het Boven-Slochteren laagpakket is het voornaamste reservoirgesteente in het gebied. Het bestaat uit een goede kwaliteit zandsteen, met enkele lateraal zeer continue kleilagen. Het laagpakket wordt onderverdeeld in 6 eenheden (zie Figuur 2). ROSLU 1, 3 en 4 hebben de beste reservoirkwaliteit, ROSLU 2 is erg kleirijk, en ook de diepste ROSLU 5 en 6 bevatten meer klei. Gemiddeld heeft het laagpakket een Net/Gross van 90% (ofwel 10% klei).</p> <p><u>ROCLA</u> De Ameland kleisteen is een zeer kleirijk/siltig laagpakket. De dikte en het kleipcentage nemen naar het noorden toe. Dit laagpakket is slecht doorlatend en vormt in sommige gebieden een afdekkende laag voor gas (b.v. het Engwierum veld heeft aparte gaskolommen in de Boven en Onder-Slochteren). Alhoewel er geen directe data zijn voor de waterdoorlatendheid van deze formatie is het waarschijnlijk dat het op productietijdschaal als een barrière voor vloeistofstroming fungeert.</p> <p><u>ROSLI</u> Het Onder-Slochteren laagpakket is een kleirijke zandsteen in dit gebied. Het laagpakket bevat veel dunne kleibandjes. De gemiddelde Net/Gross is rond de 50%. Het laagpakket heeft veel slechtere reservoir eigenschappen dan de Boven-Slochteren zandsteen. Er wordt dan ook niet uit geproduceerd in het Waddenzee gebied.</p>
---	--



Figuur 2: Correlatie van de Gamma Ray (indicatie voor klei-percentage) en gassaturatie logs van de putten langs de noordkant van de Waddenzee velden.

De gemiddelde diktes van de verschillende lagen en het percentage klei in het gesteente (Net/Gross) is bepaald uit het geologisch model voor de velden, waarbij de log data uit Figuur 2 als input zijn gebruikt. In Tabel 2 worden de gemiddelde diktes van de formaties en laagpakketten beschreven. De tabel geeft ook een inschatting van de gemiddelde doorlatendheid (horizontaal en verticaal) van de verschillende pakketten.

Tabel 2; overzicht van de gemiddelde dikte, Net/Gross en doorlatendheid van de relevante formaties.

	Dikte (m)	Net/Gross (%)	Doorlatendheid
ZE zout	>>100	0	ondoorlatend
Basis ZE	50	0	ondoorlatend
ROCLT	92	0	ondoorlatend
ROSLU	108	92	goed doorlatend
ROCLA	25	48	zeer slecht doorlatend
ROSL	98	70	slecht doorlatend

2.3 Juxtapositie langs de randbreuken

In deze sectie wordt de geometrie, en specifiek het verzet langs de randbreuken aan de west-, noord- en oostkant beschreven, en welke invloed die geometrie heeft op de doorlatendheid van de breuken. Voor deze analyse zijn seismische data en interpretaties daarvan gebruikt. De top van de Boven-Rotliegend Groep (Top Ten Boer kleisteen) is goed te herkennen als een zachte akoestische reflector op de seismiek (blauw). De onderliggende lagen zijn vrij constant in dikte. Voor gebieden waarvoor

geen geologisch model beschikbaar is zijn de diepere laaggrenzen (b.v. Top ROSLU en Top ROCLA) berekend met de gemiddelde dikte van de lagen. Hierdoor kan ook buiten het model bestudeerd worden welke lagen met elkaar in contact zijn over de breuk. In de Bijlage zijn meerdere doorsnedes per breuk getoond die een volledig beeld geven. In de sectie hieronder worden daarvan enkele representatieve figuren gebruikt om de verschillende geometrieën te illustreren.

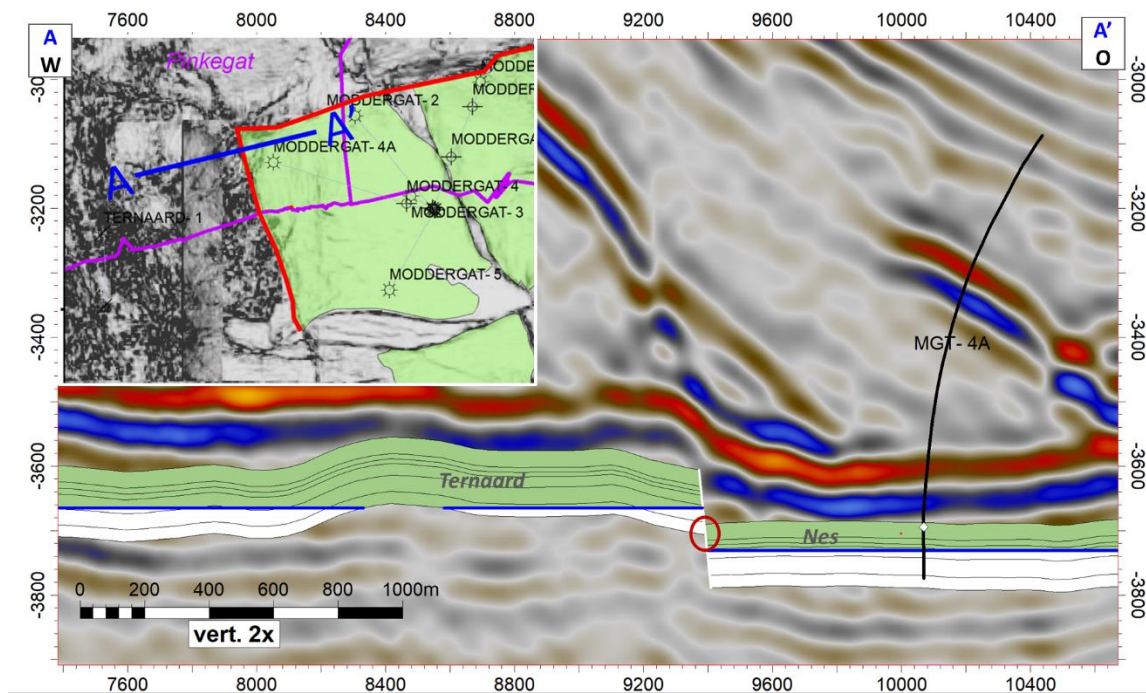
2.4 Westelijke randbreuken

In de M&R-rapportage van 2019 (Ref. 1) is uitgebreid onderzocht hoe de reservoirdruk ten westen van Nes kan dalen als gevolg van de gasproductie in Nes. Ten westen van het producerende Nes veld ligt het Ternaard gasveld. Dit voorkomen is in 1990 door put TRN-1 aangeboord waarbij gas is aangetoond in het Boven-Slochteren (ROSLU) reservoir. Het veld is niet in productie genomen vanwege lage productiviteit en de TRN-1 put is na de test dan ook gesuspendeerd. Om een inschatting van de connectiviteit tussen Nes en Ternaard te maken, is gekeken of de zandrijke intervallen in beide reservoirs met elkaar in contact zijn via de breuk (een zogenaamde zand-zand juxtapositie) en naar de gas-water contacten in beide velden.

Op seismiek is te zien dat er in het noorden en in het zuiden langs de breuk inderdaad sprake is van zand-zand juxtapositie. Echter, het gas-water contact in het Nes veld ligt op 3731 m TVDNAP m, en dat is veel dieper dan het contact dat gevonden is in de TRN-1 put (3665 m TVDNAP).

In het Ternaard veld zijn de reservoirzanden, die tegen de zanden van Nes aanliggen, gevuld met water vanwege het ondiepere gas-water contact aldaar, terwijl in het Nes veld deze zanden gevuld zijn met gas (aangegeven met de rode cirkel in Figuur 3). Dit houdt in dat wanneer de breuk tijdens productie van het Nes veld doorlatend zou worden (bijvoorbeeld vanwege een groot drukverschil) er water in plaats van gas vanuit Ternaard naar Nes zou stromen. Boven het water in het Ternaard veld is een gaskolom aanwezig. Wanneer er water uit het Ternaard aquifer onttrokken zou worden via de breuk naar Nes, zal dat gas uitzetten en zal de druk in het water-gas systeem van Ternaard nauwelijks dalen. Vanwege dit zogenaamde "piston effect" van het gas, zouden er dus enorme volumes water verplaatst moeten worden voordat de druk in Ternaard merkbaar daalt en de druk in Nes merkbaar en meetbaar hoger wordt. Watervolumes en drukverhoging van deze orde van grootte zijn tot nu toe niet waargenomen in de Nes putten, ook niet in de MGT-4 put die het dichtst bij deze breuk geboord is. Depletie van Ternaard is daarom vanuit geologische oogpunt alleen verklaarbaar wanneer het gedeelte van het Ternaard veld meteen ten westen van het Nes veld sterk gecompartmentaliseerd is, zodat er maar een beperkt volume verbonden kan zijn met het Nes voorkomen. Voor deze compartimentalisatie zijn geen aanwijzingen op seismiek te zien. Ook is dit niet waargenomen in de omliggende velden.

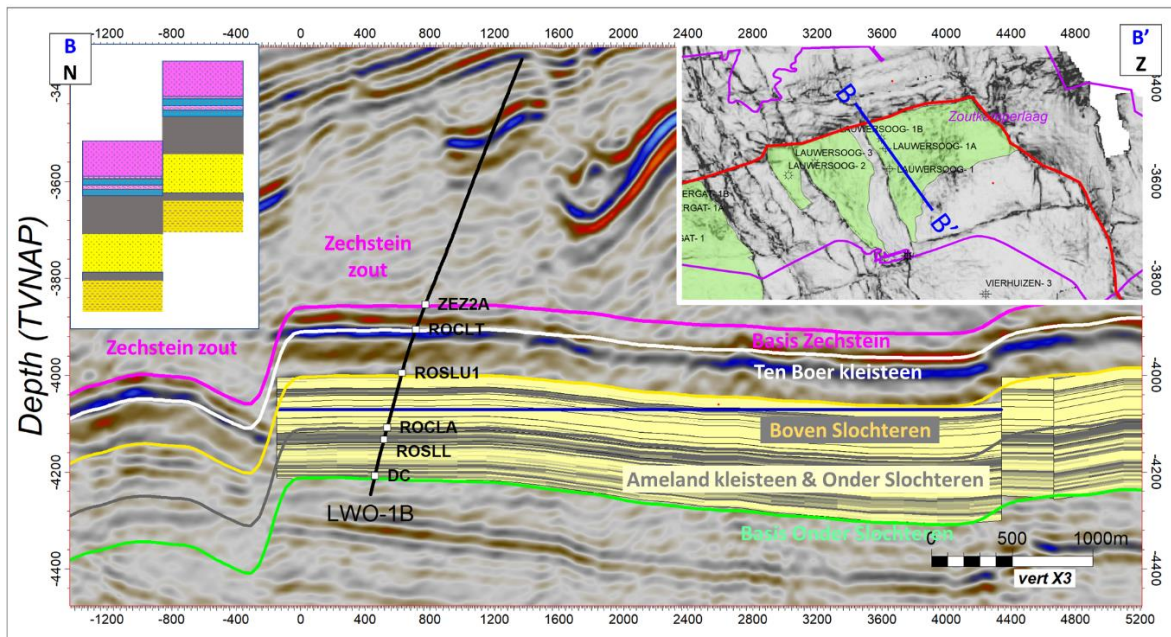
Het verschil in diepte van het contact is ook een aanwijzing dat de velden op geologische tijdschaal niet met elkaar verbonden zijn.



Figuur 3, seismische W-O doorsnede over de breuk tussen het Ternaard (links) en Nes (Rechts) voorkomen. Het geologische model laat de het Boven-Slochteren Laagpakket (ROSLU) zien, het gas-water contact in beide velden is ingekleurd. De rode cirkel geeft het gebied aan waar zand op zand juxtapositie is.

2.5 Noordelijke randbreuken

De Nes, Moddergat en Lauwersoog velden worden in het noorden begrensd door een breuk met een groot verzet. Langs het grootste deel van deze noordelijke randbreuk is dat verzet groter dan de gehele dikte van de Formatie van Slochteren (ROSLU en ROSLL). Een voorbeeld hiervan wordt getoond in de doorsnede door het Lauwersoog Oost veld en de LWO-1B put in Figuur 4. De ROSLU (in de figuur aan de bovenkant gemarkeerd met een gele lijn, en aan de onderkant met de grijze) ligt aan tegen de zouten en anhydrieten en carbonaten van de Zechstein Groep (ZE). De basis Zechstein is gemarkeerd door de roze horizon aan de bovenkant en de witte lijn aan de onderkant. Het Ameland Laagpakket (ROCLA), dat uit kleisteen bestaat en het Onder-Slochteren Laagpakket (ROSLL), tussen de grijze en groene lijnen, zijn in contact met het Ten Boer Laagpakket (ROCLT) aan de noordkant van de breuk (tussen de witte en gele lijnen). De juxtapositie is ook schematisch weergegeven in het ingezette plaatje waarbij de lagen in kleur volgens Tabel 1 worden weergegeven.

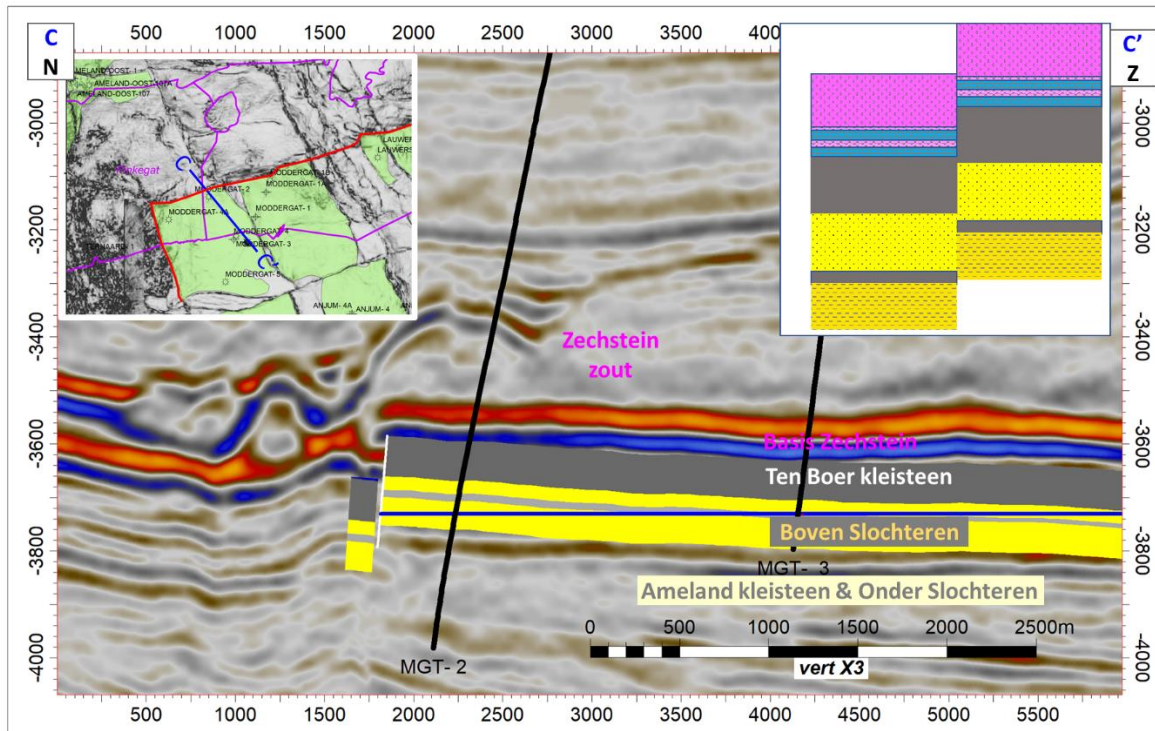


Figuur 4. Seismische N-Z dwarsdoorsnede van de breukgeometrie ten noorden van het Lauwersoog Oost veld. Ingekleurd is Net/Gross van het geologische model voor de ROSLU, ROCLA en ROSLL laagpakketten. Het gas-watercontact is aangegeven met een blauwe horizontale lijn.

Aangezien de reservoirlagen van de Waddenzee velden langs het grootste deel van de noordelijke randbreuk tegen de ondoorlatende lagen van de Zechstein Groep en Ten Boer Laagpakket liggen, is het uiterst onwaarschijnlijk dat er depletie plaatsvindt in de ROSLU en ROSLL zandsteen pakketten ten noorden van die breuk.

De enige mogelijke uitzondering hierop is bij het oostelijke deel van het Nes veld, ten noorden van de MGT-2 put. Alhoewel Corona (2005; Ref. 2) de gehele noordelijke randbreuk beschrijft met een verzet van meer dan 140m laat recente seismiek een iets gecompliceerdere structuur zien in dit gebied (Figuur 5) met veel deformatie in zowel de bovenliggende Zechstein lagen als het Rotliegend. Hierdoor is het moeilijk de structuur in detail in kaart te brengen en is de precieze juxtapositie onzeker. Waarschijnlijk is er in dit gebied zand-zand juxtapositie van de ROSLL van het Nes veld met de ROSLU van de aquifer ten noorden hiervan en mogelijk ook bij een klein deel van het watervoerende ROSLU laagpakket (Figuur 5). Indien er inderdaad zand-zand juxtapositie is die doorlatend is en ook het Ameland laagpakket verticaal doorlatend is, zou er communicatie mogelijk zijn tussen deze twee watervoerende lagen. Dit wordt onwaarschijnlijk geacht om twee redenen. Ten eerste geeft de analyse van Corona (2005; Ref. 2) naar doorlatendheid van Rotliegend breuken aan dat de complexiteit van de breuksystemen zoals we die hier zien, gepaard gaat met afsluitende breuken. De tweede reden is de slechte doorlatendheid van de Ameland kleisteen en Onder Slochteren zandsteen.

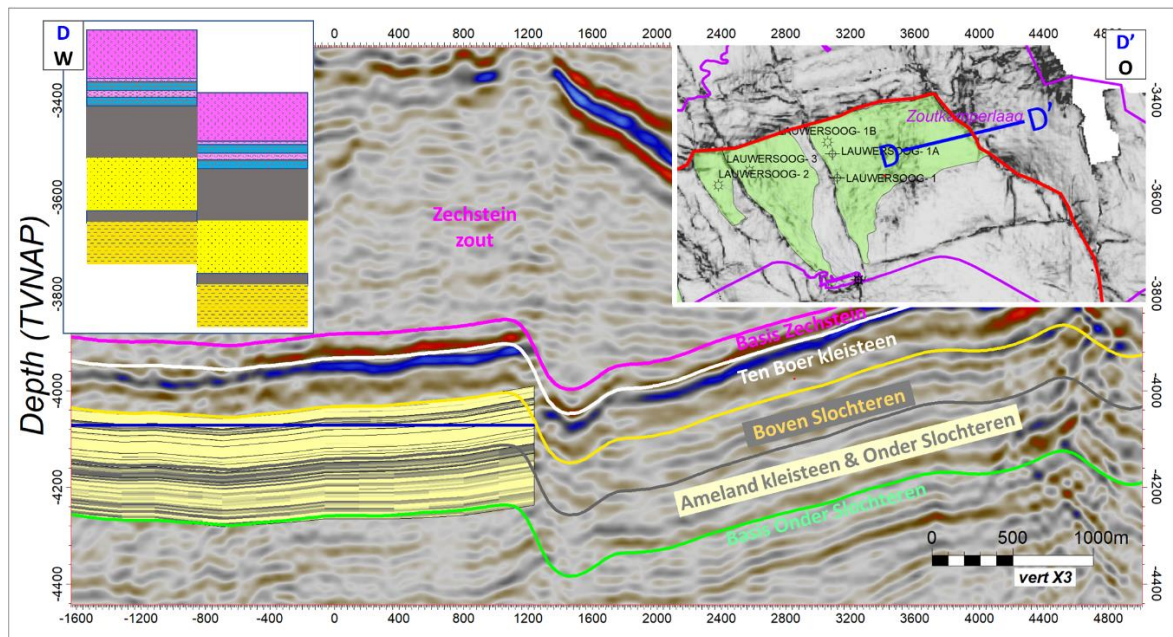
Naast de onwaarschijnlijkheid van eventuele communicatie kan worden opgemerkt dat depletie in deze aquifer al verwerkt is in het basis bodemdalingsscenario van Ameland. Daarom wordt het drukscenario waarbij communicatie ontstaat met het depletierende Nes veld niet verder onderzocht.



Figuur 5, Seismische N-Z dwarsdoorsnede van de breukgeometrie ten noorden van de MGT-2 put (noordoosten van het Nes veld) het Lauwersoog Oost veld. Ingekleurd het geologische model van de ROCLT en ROSLU, waarbij de gele kleuren de zandige delen aangeven en de grijze de meer kleiige delen. Het gas-watercontact is aangegeven met de blauwe horizontale lijn.

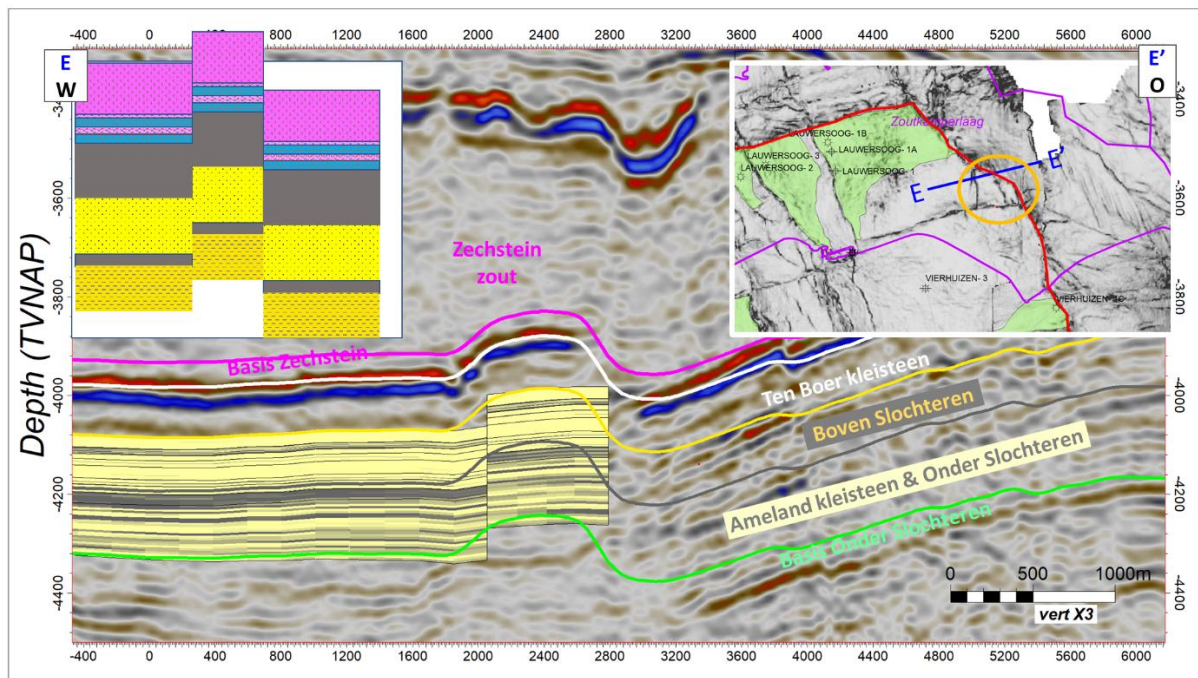
2.6 Oostelijke randbreuken

Langs de oostelijke randbreuk, die de Lauwersoog Oost en Vierhuizen Oost velden begrenst, is een variatie aan geometrieën te vinden. Langs de randbreuk in het noordelijke deel van het Lauwersoog Oost veld is de ROSLU in contact met de ROCLT kleisteen. De ROSLL in het Lauwersoog Oost veld is watervoerend, en ligt tegen het, eveneens watervoerende, ROSLU aan. Een doorsnede hiervan en een schematische weergave zijn gegeven in Figuur 6. Voor deze configuratie zou eventueel depletie ten oosten van Lauwersoog Oost kunnen plaatsvinden wanneer de ROCLA verticaal doorlatend is voor water en bovendien de randbreuk ook doorlatend is. Dit is niet waarschijnlijk aangezien beiden juist zeer slecht doorlatend zijn.



Figuur 6, Seismische W-O dwarsdoorsnede van de breukgeometrie ten noordoosten van het Lauwersoog Oost veld. Ingekleurd is Net/Gross van het geologische model voor de ROSLU, ROCLA en ROSLL, waarbij de gele kleuren de zandige delen aangeven en de grijze de meer kleiige delen. Het gas-watercontact is aangegeven met de blauwe horizontale lijn.

In het zuidoostelijke deel van het Lauwersoog Oost veld zijn enkele kleine horstblokken te vinden (zie Figuur 7, inzet, het gebied binnen de oranje cirkel). Aan de westkant is de ROSLU van het Lauwersoog Oost veld in contact met de ROSLU en ROCLA van de horstblokken. Aangezien deze kleinere blokken niet aangeboord zijn, is niet bekend of deze met gas gevuld zijn en daarmee in contact zijn met het veld. Aan de oostkant van deze horstblokken is het verzet groter, maar niet zodanig dat de gehele Slochteren Formatie is verzet. Langs dit deel van de breuk is de ROSLU in contact met de ROSLL. Hierdoor is er een verbinding mogelijk tussen de ROSLU in het Lauwersoog veld met de ROSLU in het aquifer blok ten oosten van de randbreuk, via de ROSLL in de horstblokken. Dit is te zien op de seismische doorsnede en schematische weergave in Figuur 7.



Figuur 7, Seismische O-W dwarsdoorsnede van de breukgeometrie ten zuidoosten van het Lauwersoog Oost veld. Ingekleurd is Net/Gross van het geologische model, waarbij de gele kleuren de zandige delen aangeven en de grijze de meer kleiige delen.

De oostkant van het Vierhuizen-Oost veld heeft een vergelijkbaar verzet en breukgeometrie als het noordelijke deel van het Lauwersoog Oost veld. De ROSLU is volledig verzet en is begrensd door de ROCLT in het blok ten oosten van de randbreuk. De ROSLL van het veld, dat watervoerend is, is wel in contact met de ROSLU van deze aquifer. Depletie van de aquifer zou dan alleen kunnen plaatsvinden in het geval dat zowel de randbreuk en de ROCLA beide doorlatend zijn. Zoals eerdergenoemd is dit scenario zeer onwaarschijnlijk.

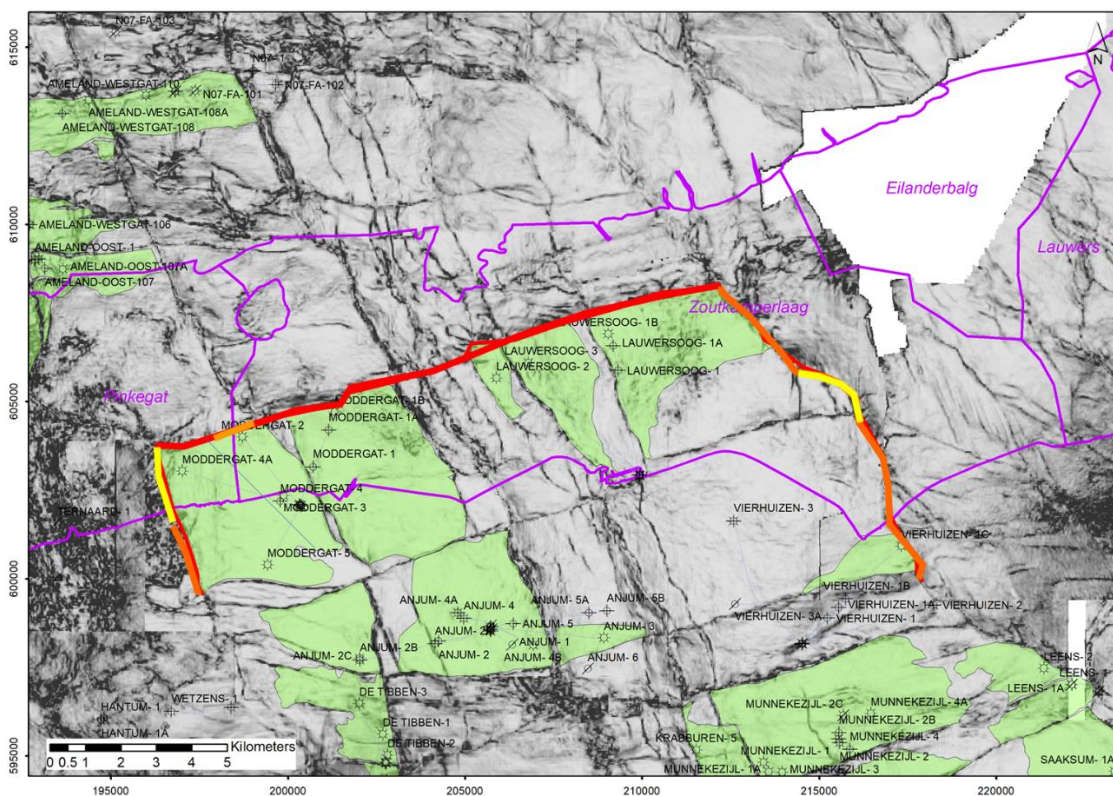
2.7 Mechanismen voor afsluitende breuken

Breuken met zand-zand juxtapositie kunnen toch ondoorlatend zijn. Voorbeelden hiervan zijn b.v. beschreven door Corona (2005; Ref. 2, voor het gebied in de Lauwerszee trog) en Ligtenberg et al (2011; Ref. 4). Over het algemeen worden er twee mechanismen genoemd die een breuk ondoorlatend kunnen maken. Dit zijn Shale Gouge Ratio (SGR), en cataclase en cementatie van de breuk. SGR geeft de hoeveelheid klei aan die is opgenomen op het breukvlak. Wanneer twee gesteentepakketten langs elkaar bewegen langs een breuk, zullen delen van het gesteente vermalen worden en in de breukzone terecht komen. De samenstelling van deze breuk-gouge is afhankelijk van de gesteenten die langs elkaar bewogen hebben. Wanneer deze kleirijk zijn zal dus ook de hoeveelheid klei groter zijn en is de kans groter dat de breuk afsluitend is. Voor de configuraties met zand-zand juxtapositie langs de randbreuken kan de shale -gouge ratio bepaald worden (b.v. Boven Slochteren juxtaposied tegen Onder-Slochteren geeft een shale gouge ratio van $\sim 35\%$). Dit suggereert dat de kans op afsluiting laag is. Echter, zoals beschreven in een EBN presentatie uit 2017 (Ref. 3), is SGR niet erg betrouwbaar voor Rotliggend velden. Door de ouderdom van de breuken en vaak ook hun aanzienlijke verzet is voor deze hoge Net to Gross zanden het tweede mechanisme, cataclase en cementatie dominant (Ligtenberg et al 2011). Bij het verschuiven langs de breuken wordt zoals eerder genoemd het gesteente vermalen. Ook zandkorrels worden tot een heel fijn poeder vermalen

dat afsluitend kan werken, zeker als er door inwerking van vloeistoffen ook cementatie van de overgebleven poriënruimte plaatsvindt. Ligtenberg et al hebben dit geanalyseerd door bestudering van aangeboorde breukgesteenten en beschouwen dit als voornaamste oorzaak voor de afsluitende eigenschappen van hoog Net/Gross gesteente (2001; Ref. 4). Dit mechanisme is echter moeilijk te kwantificeren en daarom kan niet definitief bepaald worden of de delen van de randbreuken met zand-zand juxtapositie doorlatend zijn of niet.

2.8 Het effect op bodemdaling

Samengevat is het langs de meeste delen van de randbreuken uiterst onwaarschijnlijk dat de breuken doorlatend zijn doordat er óf geen zand-zand juxtapositie is, óf de Ameland kleilaag ook doorlatend zou moeten zijn, óf verschillende contacten dit uitsluiten. Figuur 8 laat een schematische samenvatting zien op de kaart.

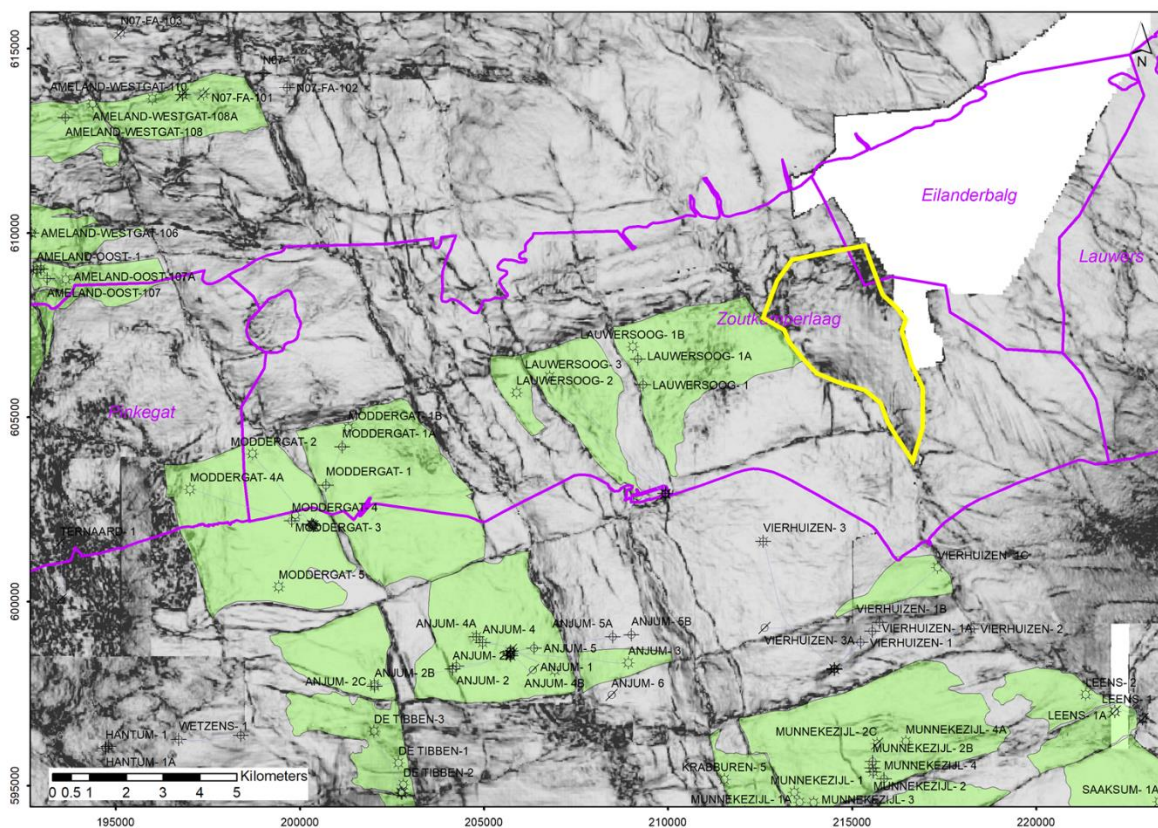


Figuur 8, Overzicht van de doorlatendheid scenario's van de randbreuken. Rood - geen zand-zand juxtapositie, oranje - zand-zand juxtapositie maar doorlatendheid uiterst onwaarschijnlijk, geel - relatief minst onwaarschijnlijke scenario voor doorlatendheid.

Alleen langs de oostelijke randbreuk is een scenario iets minder onwaarschijnlijk, waarin de zuidelijke laterale ROSLU aquifer van het Lauwersoog veld via een aantal horstblokken depletie kan veroorzaken in het aquifer blok ten oosten van de randbreuk. Dit blok heeft een vergelijkbare grootte als het Lauwersoog West veld inclusief de laterale aquifer (zie Figuur 9), en valt net als Lauwersoog - West in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De aquifer is naar alle waarschijnlijkheid ook vergelijkbaar in dikte en eigenschappen aangezien deze lateraal weinig variëren. Het effect van een dergelijke depletie op de bodemdaling kan dus in het meest extreme geval vergeleken worden met het effect van de productie uit Lauwersoog West op de bodemdaling. Een dergelijk scenario kan als extreem worden opgevat aangezien er van uit wordt gegaan dat de depletie gelijk is aan de depletie

veroorzaakt door actieve productie uit een gasveld. Ook zal naar verwachting de depletie en daarmee de bodemdalingssnelheid langzamer zijn dan in het Lauwersoog West veld, aangezien de depletie via de slechter doorlatende breuken plaats moet vinden. Een dergelijk hypothetisch scenario zal dus een lagere belasting geven.

De oostelijke begrenzing van dit gebied is onzeker, omdat er geen seismische data beschikbaar is in het gebied, aangegeven met de witte vlek in Figuur 9. De aquifer zou dus mogelijk een iets andere vorm of grootte kunnen hebben. De in geel aangegeven omtrek is de meest waarschijnlijke interpretatie gebaseerd op de trend van de noord-zuid breuken die bij elkaar komen in het meest zuidelijke punt van het blok. In het minder waarschijnlijke geval dat het blok zich verder uitstrekt naar het oosten zal dit de daling in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied niet of nauwelijks beïnvloeden, aangezien deze mogelijke daling daarbuiten zal plaatsvinden.

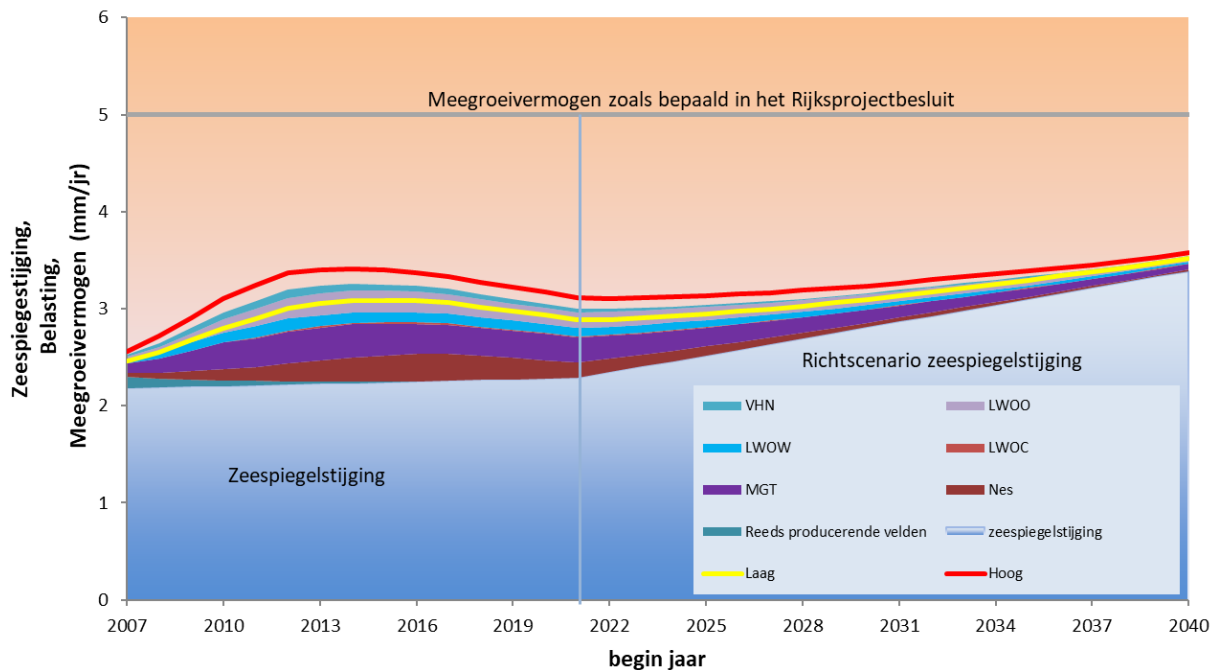


Figuur 9, Basis Zechstein kaart met daarop de ligging van de Waddenzee gasvelden en putten. In geel is het gebied gemarkeerd dat mogelijk via Lauwersoog gedepleteerd kan worden.

Om een indicatie te geven van het mogelijke effect van een dergelijk scenario op de belasting van de bodemdaling in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag geeft Figuur 10 een overzicht van de bodemdalingsbelasting per veld zoals uitgewerkt in de meest recente Meet- en regelrapportage (Ref. 1). Het lichtblauwe vlak presenteert de (beperkte) belasting door productie uit Lauwersoog West (LWOW). Dit bedraagt maximaal ongeveer 0.2 mm per jaar. Eenzelfde effect ten gevolge van aquiferdepletie ten oosten van Lauwersoog Oost kan dan verwacht worden in de toekomst. Op basis van dit kwalitatieve vergelijk kan geconcludeerd worden dat de belasting die volgt uit dit scenario derhalve beperkt is en ruim binnen de gebruikruimte valt (aangegeven met de horizontale grijze lijn

in Figuur 10). Bodemdalingsmetingen sluiten dit scenario nu uit. Wanneer het scenario in de toekomst optreedt, zal het meegenomen worden in de M&R cyclus.

Zoutkamperlaag



Figuur 10, Belasting in Zoutkamperlaag ten gevolge van gasproductie voor de verschillende scenario's (Ref. 1). Het verwachtingsscenario is weergegeven als de bovengrens van de gekleurde vlakken die de bijdrage per voorkomen weergegeven. Het lage en hoge scenario zijn getoond als lijnen (geel: laag scenario, rood: hoog scenario). De belasting veroorzaakt door productie uit Lauwersoog West (LWO-W) wordt weergegeven door het lichtblauwe vlak (LWOW).

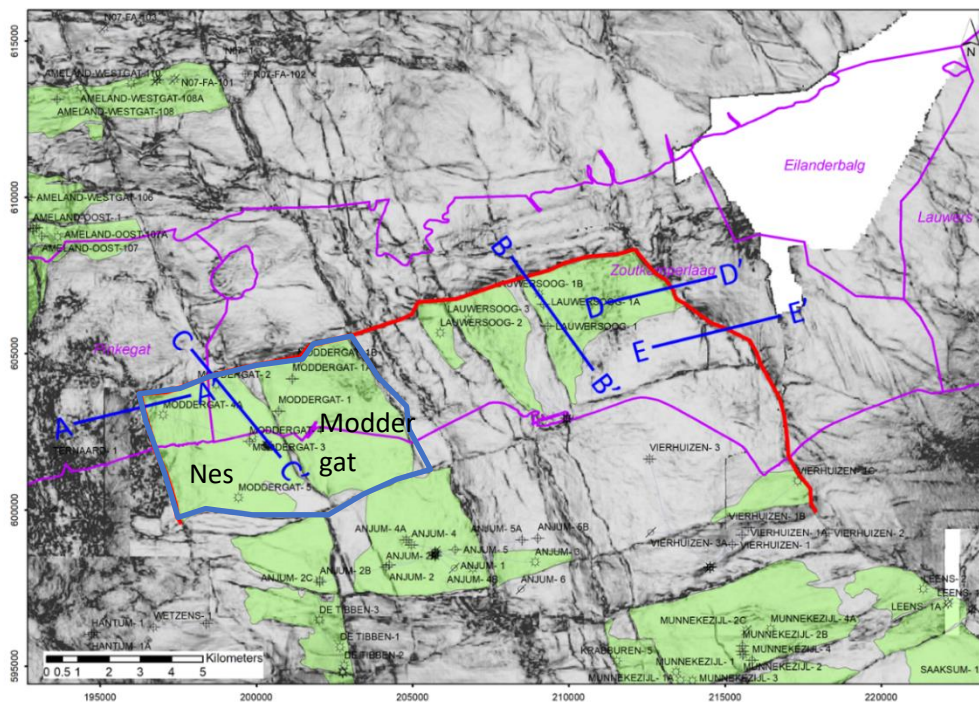
2.9 Samenvatting 'Doorlatendheid van randbreuken'

- Een analyse van geometrie van de randbreuken van de Waddenzee gasvelden laat zien dat het uiterst onwaarschijnlijk is dat het grootste deel van de noordelijke en de westelijke randbreuken doorlatend is.
- Enkele gebieden langs de oostelijke randbreuk laten juxtapositie van ROSLL met ROSLU zien. Het is zeer onwaarschijnlijk dat deze geometrie doorlatend is, aangezien daarvoor verticale communicatie door de slecht doorlatende ROCLA en ROSLL nodig is.
- Een klein deel van de noordelijke randbreuk ten noorden van MGT-2 laat een zeer complexe structuur zien. De complexiteit van de breuk en de geïnterpreteerde geometrie van ROSLU-ROCLA juxtapositie maken communicatie met het ten noorden hiervan gelegen blok (Ameland aquifer) onwaarschijnlijk. Daarbij komt dat de depletie van dit blok al wordt meegenomen in de bodemdalingsberekeningen.
- Langs de oostelijke randbreuk bestaat een klein segment waar mogelijk een verbinding kan ontstaan tussen het oostelijke, niet gedepleteerde en watervoerende blok aan de ene kant en het westelijke watervoerende blok dat mogelijk in druk is gedaald door de productie van gas uit het Lauwersoog Oost veld.
- De mogelijke consequenties voor de bodemdalingsbelasting in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag zijn kwalitatief bepaald. Eventuele belasting van een dergelijk onwaarschijnlijk scenario is beperkt: minder dan 0,2 mm/jaar. Dit valt ruim binnen de gebruiksruimte en wordt gemonitord.

3 Wat als Nes en Moddergat velden plotseling met elkaar in verbinding komen

3.1 Achtergrond en onderzoeksvragen

Van de producerende Waddenvelden hebben Nes en Moddergat initieel de grootste gasvolumes, oftewel grootste GIIP (Gas Initially In Place). Deze twee velden zijn in Figuur 11 omkaderd in blauw, waarbij het Nes veld zich ten westen van het Moddergat veld bevindt. Inmiddels zijn deze velden 14 jaar in productie en is er 15 miljard m³ (15 Nbcm) gas uit geproduceerd. Deze velden zullen naar verwachting produceren tot 2035, waarbij additioneel ongeveer 4 Nbcm gas wordt geproduceerd. De totale verwachte gasproductie uit deze velden komt daarmee uit 19 Nbcm. Als gevolg van de gasproductie daalt de druk in het reservoir, waardoor de hoeveelheid gas dat per jaar geproduceerd wordt ook daalt. Elk jaar neemt de jaarlijkse gasproductie dus af.



Figuur 11: Overzicht van de producerende Waddenvelden (in groen) waarbij de paarse contour de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag aangeven. De grootste gasvelden, Nes en Moddergat, zijn blauw omkaderd.

Op dit moment staan deze twee velden niet met elkaar in communicatie. Dit blijkt uit alle metingen van de drukken in de putten tot nu toe. Ook op geologische tijdschaal zijn ze niet in verbinding geweest, dit blijkt uit de verschillende dieptes van de gas-water contacten. Op verzoek van de Auditcommissie 'Gaswinning onder de Waddenzee', onderdeel van de commissie voor de milieueffectrapportage (m.e.r.), is onderzoek gedaan naar de mogelijke effecten als de Nes en Moddergat velden in de nabije toekomst onverwacht met elkaar kunnen communiceren:

- Kan dit gemeten worden, bijvoorbeeld in de putten?
- Wat is de mogelijke impact op de bodemdalingsbelasting?

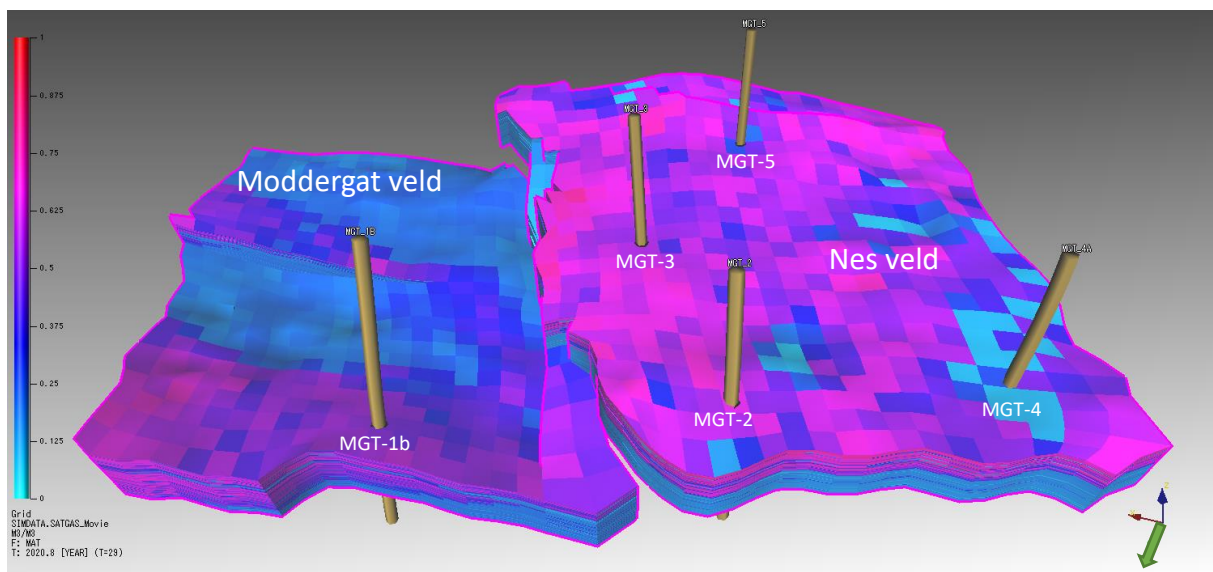
3.2 Aanpak

Om deze vragen te beantwoorden is gebruik gemaakt van de bestaande driedimensionale, gekalibreerde reservoirsimulatiemodellen van het Nes en Moddergat veld. Dezelfde modellen zijn

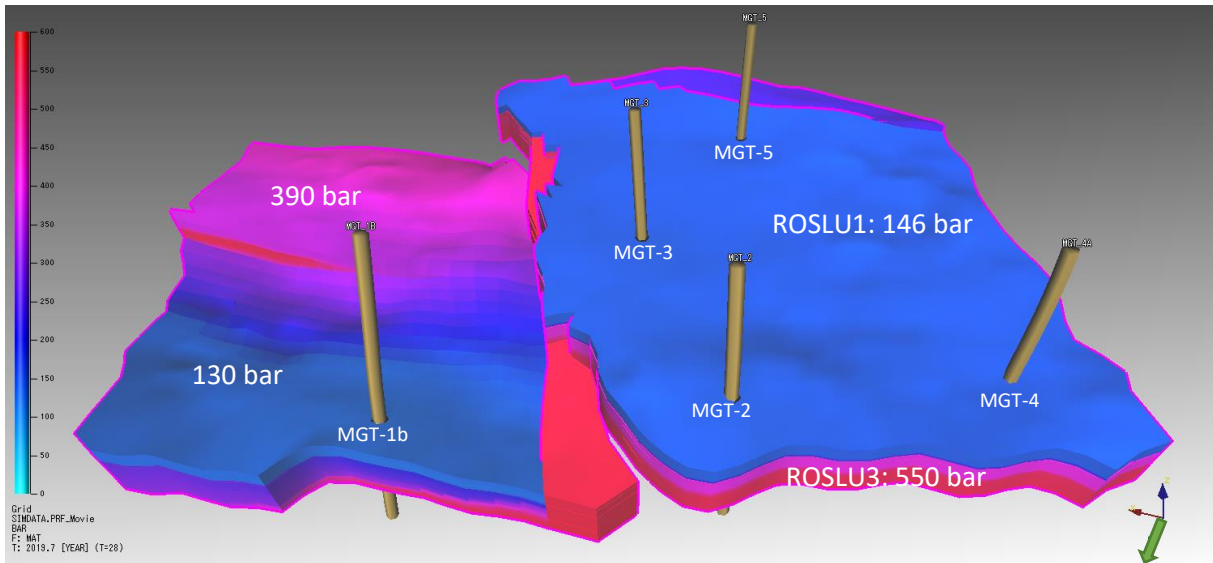
ook gebruikt in de M&R2019 rapportage (Ref. 1), maar dan zonder communicatie tussen de beide velden. Deze afzonderlijke reservoirsimulatiemodellen zijn hier samengevoegd in één gecombineerd model. Het gecombineerde model wordt gebruikt om drukprognoses te maken, die vervolgens worden gebruikt om de bodemdaling te berekenen.

De reservoirsimulatiemodellen berekenen de veranderingen in drukken en gas- en watersaturaties, zowel in de tijd als per gridblock (zogenaamd 'finite difference' model). Effecten zoals de verandering van relatieve permeabiliteit als gevolg van de hoeveelheid water en gas in het gridblock worden ook meegenomen door deze modellen. Voor meer informatie hierover wordt gerefereerd naar Ref. 1 en de referenties daarin.

In Figuur 12 en Figuur 13 worden respectievelijk de saturatie- en drukdistributie in het jaar 2020 weergegeven voor de gekalibreerde Moddergat en Nes modellen. Hierbij is tot deze tijd geen communicatie geweest tussen beide velden. In Figuur 12 is te zien dat de bovenste laag, hier ROSLU1 genoemd, merendeels gas bevat, en de onderste laag, hier ROSLU3 genoemd, merendeels water bevat (i.e. aquifer). Ook is te zien dat de bovenste laag van het Moddergat veld in het zuiden ook water bevat. De laag tussen ROSLU1 en ROSLU3, hier ROSLU2 genoemd, heeft een hoog kleigehalte en is daardoor beperkt doorlatend. Dit is gebleken uit de drukmetingen in de MGT-4 en MGT-5 putten, die geboord zijn nadat putten MGT-2 and MGT-3 al een tijd in productie zijn en dus het Nes veld gedeeltelijk gedepleteerd hebben. De beperkte doorlaatbaarheid is ook gebleken uit onderzoek van de kerndata van de MGT-3 put.

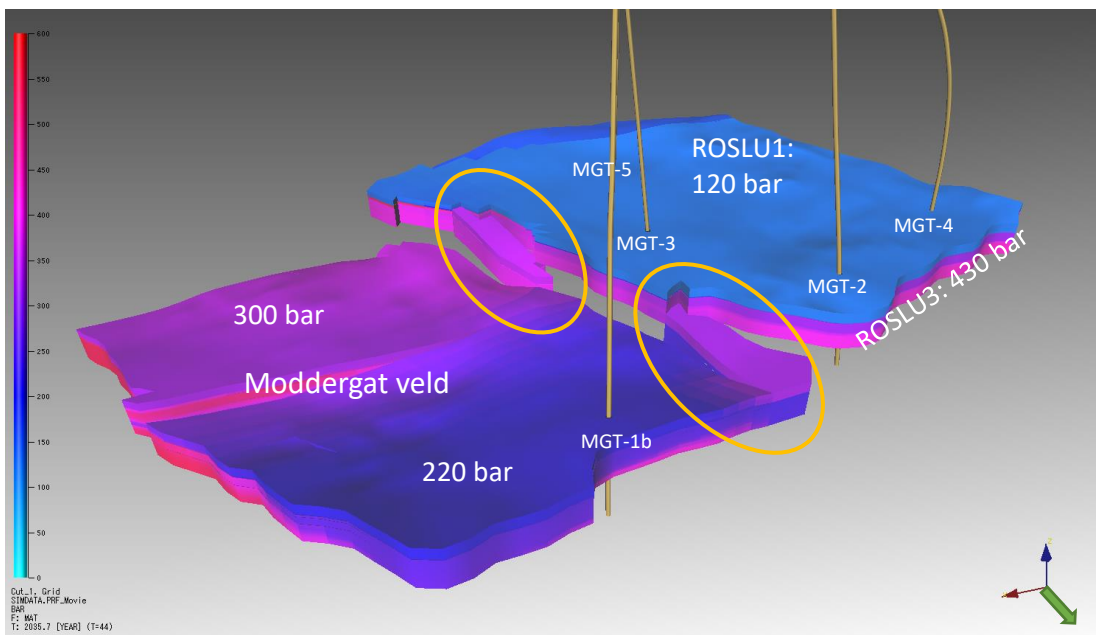


Figuur 12: Gecombineerd model van Nes en Moddergat, gezien vanuit het noorden: saturatiedistributie in het jaar 2020. Magenta geeft gas weer, blauw geeft water weer. Er is nog geen communicatie mogelijk tussen beide velden. Groene pijl geeft het noorden aan.



Figuur 13: Gecombineerd model van Nes en Moddergat: druk distributie in 2020. Rood en magenta geven hoge druk weer, blauw geeft lage druk weer. Er is nog geen communicatie mogelijk tussen beide velden. Groene pijl geeft het noorden aan.

In deze studie is aangenomen dat plotselinge communicatie tussen beide velden plaatsvindt vanaf het jaar 2021. Op basis van seismische data is de meest waarschijnlijke route van de gas- en waterstromen bepaald, aangegeven in Figuur 14 met de gele ovals. Omdat het Moddergat veld dieper ligt dan het Nes veld, staat het Moddergat veld in directe verbinding met de ROSLU3 van het Nes veld, en via ROSLU2 indirect ook met ROSLU1 van het Nes veld. In Figuur 14 is de resulterende drukverdeling weergegeven in het jaar 2035. Hieruit blijkt dat vergeleken met de situatie in 2020 (Figuur 13) de druk rondom de put in het Moddergat veld hoger is geworden en de druk in de ROSLU3 van het Nes veld met meer dan 100 bar is gedaald. De drukken in ROSLU1 van het Nes veld zijn in mindere mate gedaald, mede doordat de toekomstige verwachte jaarlijkse productie sterk afneemt vergeleken met de initiële jaarlijkse productie.

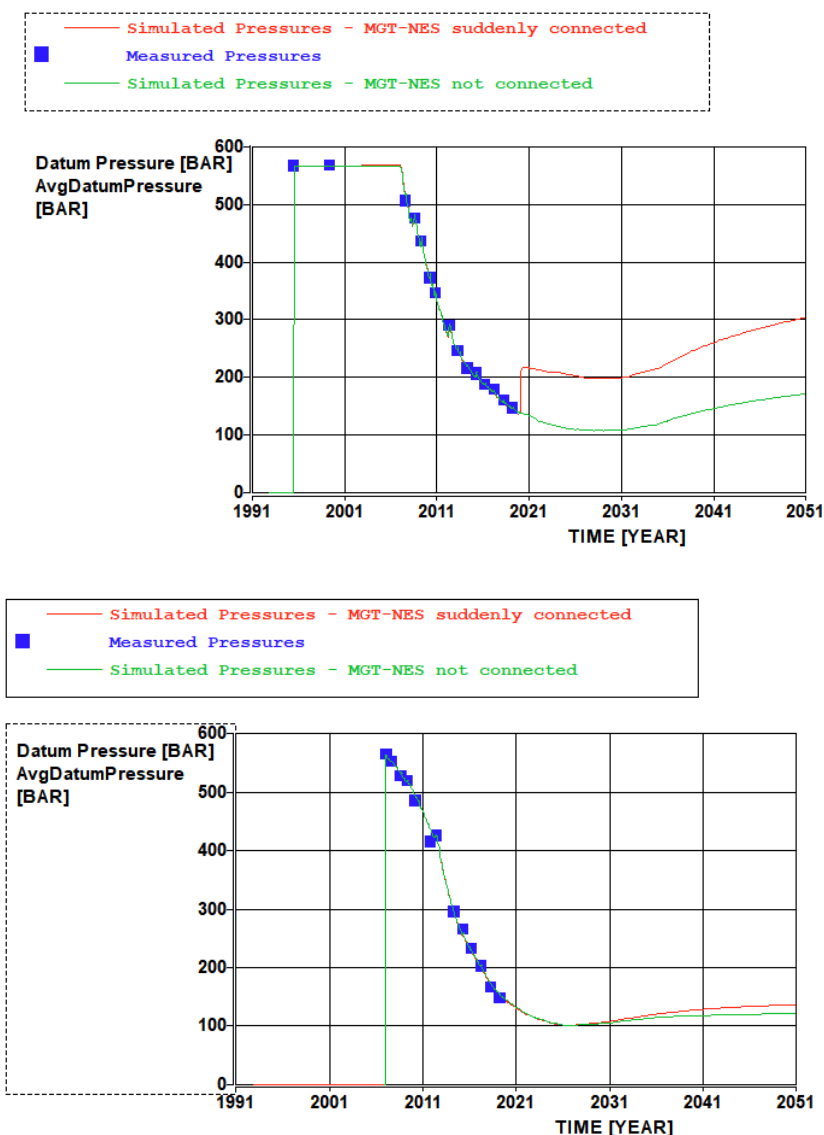


Figuur 14: Gecombineerd model, gezien vanuit het noordoosten: druk distributie in 2035 nadat productie is gestopt. Rood en magenta geven hoge druk weer, blauw geeft lage druk weer. Groene pijl geeft het noorden aan.

3.3 Impact op de drukmetingen in de putten

De eerste vraag is of een dergelijke situatie opgemerkt zou kunnen worden in putmetingen. Uit de simulatieberekeningen blijkt dat de impact op de reservoirdrukken vrijwel direct wordt gezien, met name in put MGT-1b in het Moddergat veld. In de bovenste grafiek in Figuur 15 is dit weergegeven met de rode lijn. De groene lijn in deze figuur geeft de verwachte situatie weer waarbij geen communicatie is tussen beide velden, zoals aangenomen in het M&R 2019 rapport, en de blauwe vierkanten de jaarlijks gemeten drukken in deze put.

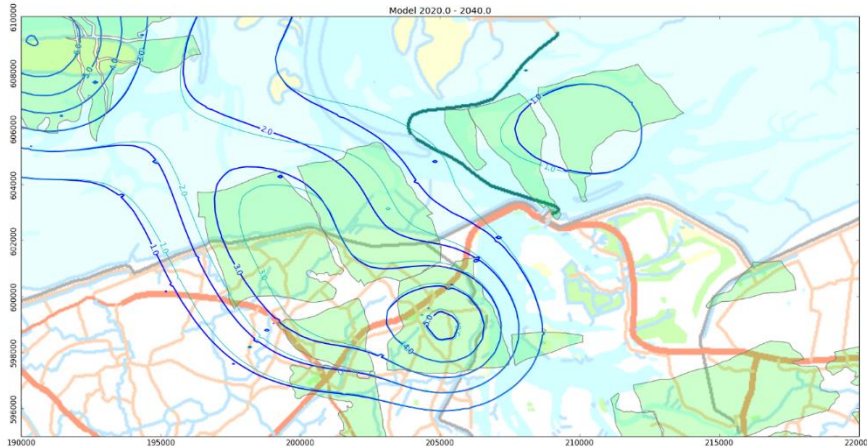
In put MGT-2 (Nes veld, zie onderste grafiek in Figuur 15) is de drukverandering nauwelijks detecteerbaar. De reden hiervoor is dat deze put op dit moment alleen produceert uit de bovenste lagen, i.e. ROSLU1), en de grootste drukdaling gezien wordt in het onderste deel van ROSLU (i.e. ROSLU3) van het Nes veld.



Figuur 15: Drukken in de MGT-1b put (boven) en MGT-2 put (onder) voor de situatie dat er geen communicatie is tussen beide velden (groen) en wel communicatie is (rood).

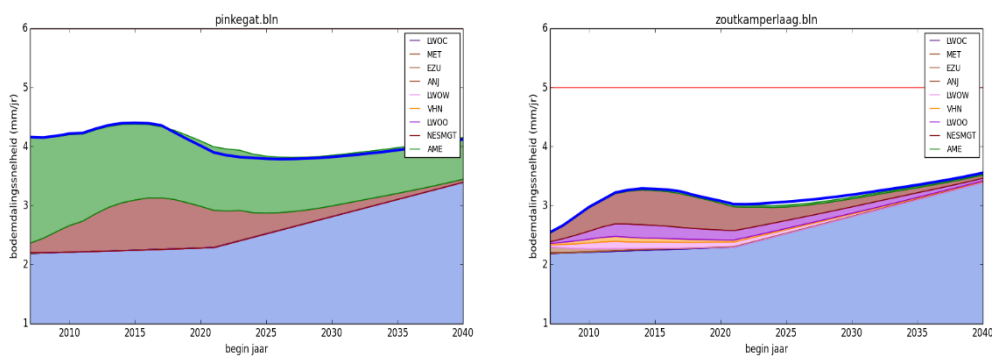
3.4 Impact op de verwachte bodemdaling

Voor de situatie dat er plotseling communicatie tussen beide velden is vanaf 2021 zijn de drukprognoses gebruikt als invoer voor de bodemdalingsberekeningen. Alle andere parameterwaardes zijn gelijk als gerapporteerd in Ref. 1.



Figuur 16: Donkerblauwe contouren geven de bodemdaling in cm tussen 2020 en 2040 volgens de realisatie met communicatie. Deze contouren laten iets meer bodemdaling boven Nes en iets minder boven Moddergat zien in vergelijking met de niet-verbonden velden (lichtblauwe contouren, M&R 2019).

Figuur 16 laat de contouren zien van de verwachte bodemdaling tussen 2020 en 2040 (in cm). Voor deze periode van 20 jaar is de verwachte bodemdaling als gevolg van gaswinning rond de 2 tot 3 cm. De donkerblauwe contourlijnen geven de situatie weer als er vanaf 2021 *wel* communicatie is tussen beide velden. De lichtblauwe contourlijnen geven de verwachte bodemdaling weer als er geen communicatie mogelijk is, gelijk aan Ref. 1. Hieruit valt op te maken dat de totale hoeveelheid bodemdaling nauwelijks verandert, en dat er boven het Nes veld iets meer bodemdaling verwacht wordt en boven het Moddergat veld iets minder bodemdaling.



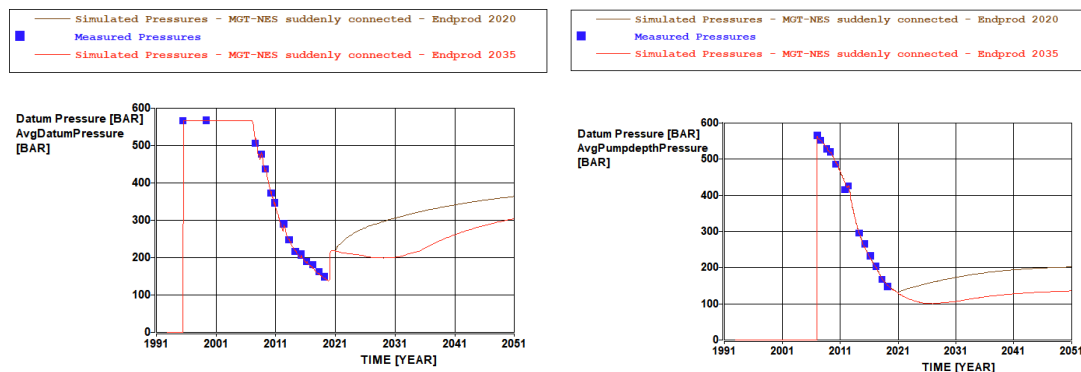
Figuur 17: Blauwe lijn duidt op M&R2019 waarbij geen communicatie mogelijk is tussen Nes en Moddergat. De bovenkant van de gekleurde vlakken geeft de belasting per veld weer volgens het scenario waarbij drukcommunicatie wordt toegestaan.

De gemiddelde bodemdalingsnelheid per kombergingsgebied, ook wel belasting genoemd, is voor beide situaties weergegeven in Figuur 17. Hieruit valt op te maken dat de impact op de

bodemdalingsnelheid rond het jaar 2023 minder is dan 0,1 mm/jaar in het Pinkegat kombergingsgebied en nog minder het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. Hieruit wordt geconcludeerd dat voor beide kombergingsgebieden de impact van drukcommunicatie tussen beide velden verwaarloosbaar is, en dat de belasting ruim binnen de gebruikruimte blijft.

3.5 Wat als de velden worden ingesloten op het moment er een significante drukverandering wordt gemeten

In de vorige secties is aangetoond met behulp van reservoirsimulatiemodellen dat drukmetingen (zeker in het Moddergat veld) duidelijk veranderingen laten zien als er plotselinge communicatie is tussen beide velden. In dit geval kan besloten worden om de productie te stoppen en verder onderzoek te doen naar de oorzaak van de significante drukveranderingen. Met behulp van dezelfde reservoirsimulatiemodellen is onderzocht wat de invloed op de drukken is als productie wordt gestopt vanaf 2021. In Figuur 18 laten de rode lijnen de drukprognoses zien als productie doorgaat, en de bruine lijnen als de productie direct gestopt wordt nadat de plotselinge drukveranderingen zijn bemerkt. Dit laat zien dat de druk rondom de putten snel oploopt als productie wordt gestopt, wat veroorzaakt wordt door de hogere drukken in de aquifer. De verwachte bodemdaling zal lager zijn indien gestopt wordt met productie wanneer dit scenario vergeleken wordt met het scenario van doorgaande productie. Aangezien de impact op de belasting minder dan 0,1 mm jaar is indien productie doorgaat, zal de belasting in het scenario waarbij de productie gestopt is nog minder zijn en behoeft geen verdere kwantificering.



Figuur 18: Drukprognoses in de MGT-1b put (links) en MGT-2 put (rechts), waarbij de rode doorgetrokken lijn de gesimuleerde druk geeft in het geval er plotselinge communicatie optreedt tussen de velden vanaf 2021 en waarbij de productie doorgaat. De bruine doorgetrokken lijn toont de druk wanneer de productie direct na het bemerken van de drukverandering gestaakt wordt.

3.6 Samenvatting ‘Nes en Moddergat plotseling verbonden’

- Op verzoek van de MER Auditcommissie is met behulp van gekalibreerde, gedetailleerde reservoirsimulatiemodellen onderzocht wat er gebeurt als de Nes en Moddergat velden in de nabije toekomst plotseling met elkaar communiceren.
- Hieruit blijkt dat de drukmetingen in de putten dit duidelijk zullen aangeven, zie Figuur 15.
- De impact op de verwachte belasting is zeer klein: minder dan 0,1 mm/jaar verandering in bodemdalingsnelheid en een kleine verschuiving van de bodemdalingskom (Figuur 16 en Figuur 17).
- De totale belasting blijft ook in geval van plotselinge communicatie tussen de velden ruim binnen de gebruikruimte.

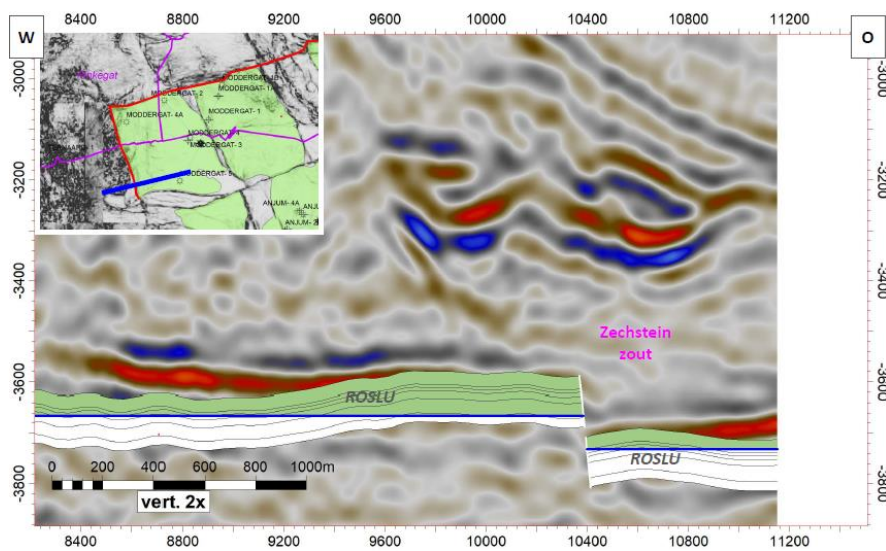
- Als de productie uit de velden wordt gestopt nadat de plotselinge drukveranderingen zijn gemeten (Figuur 18), zullen de verwachte bodemdaling en belasting nog minder zijn.

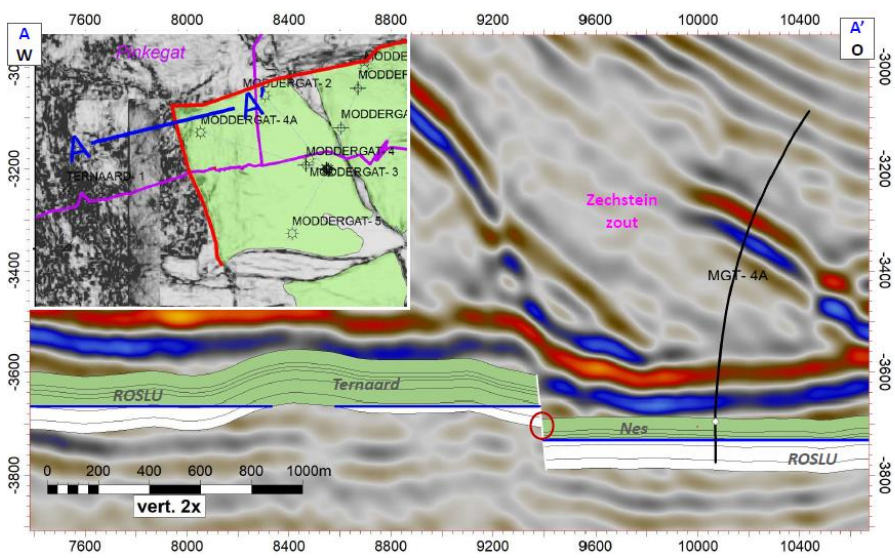
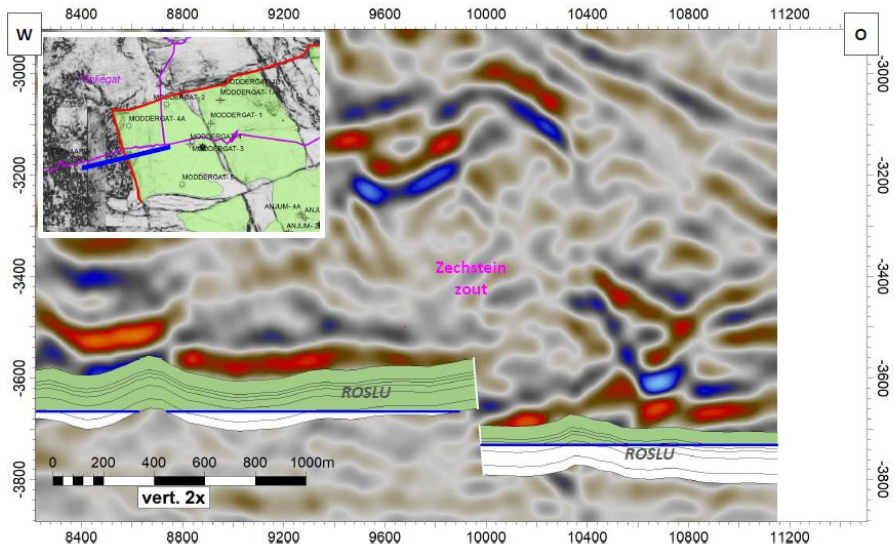
4 Referenties

- Ref. 1. NAM (2020) *Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2019*. NAM B.V. 2020. EP202002200220.
- Ref. 2. Corona, F.V. 2005. *Fault trap analysis of the Permian Rotliegend gas play, Lauwerszee Trough, NE Netherlands*. In: DORE, A. G. & VINING, B. A. (eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*, 327–335. q *Petroleum Geology Conferences Ltd. Published by the Geological Society, London*.
- Ref. 3. EBN, 2017, *Demystification of fault sealing statements & aspects*. <https://kennisbank.ebn.nl/dutch-exploration-day-2017/>.
- Ref. 4. Ligtenberg, H., Okkerman, J. and De Keijzer, M. 2011. *Fractures in the Dutch Rotliegend—An overview*. *SEPM Special Publications* 98:229-244.

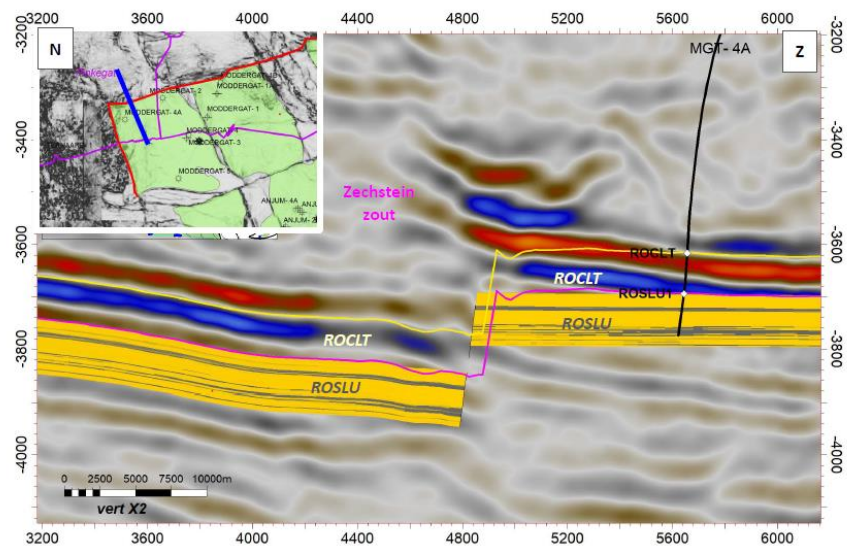
5 Bijlage

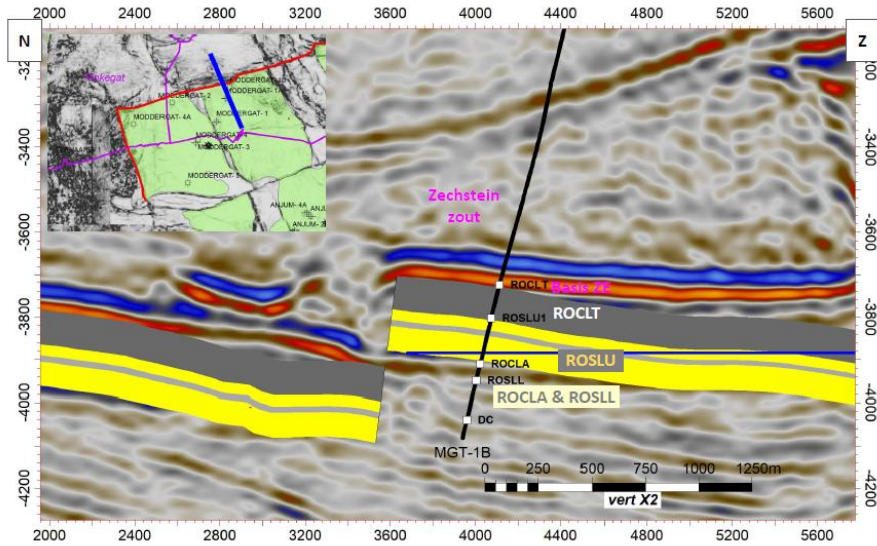
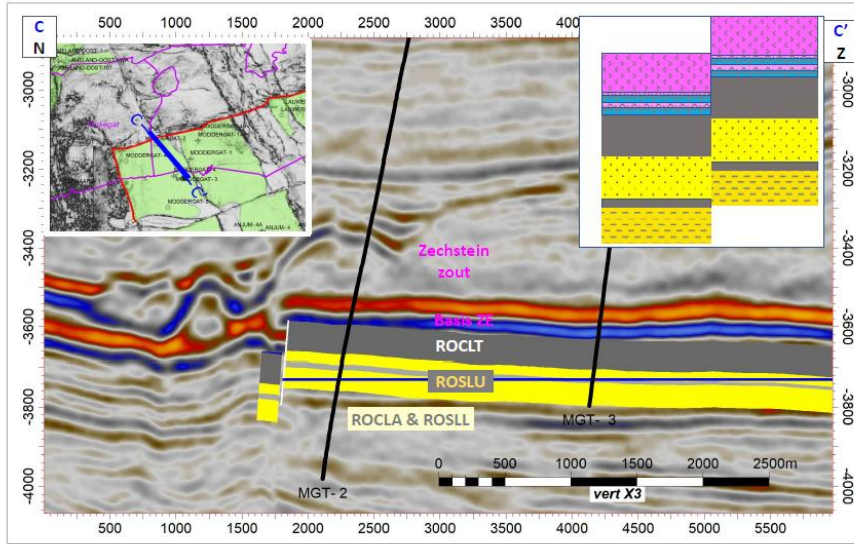
Westelijke randbreuk

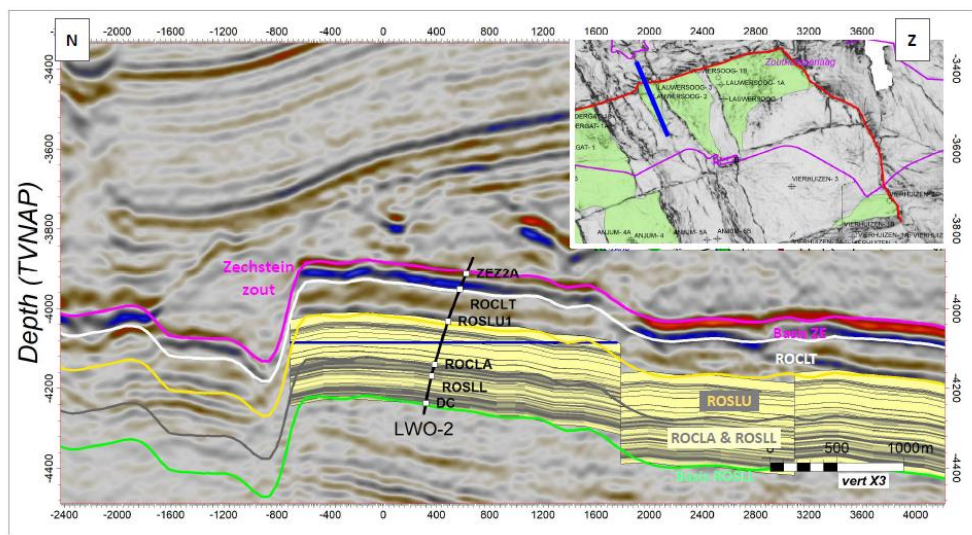
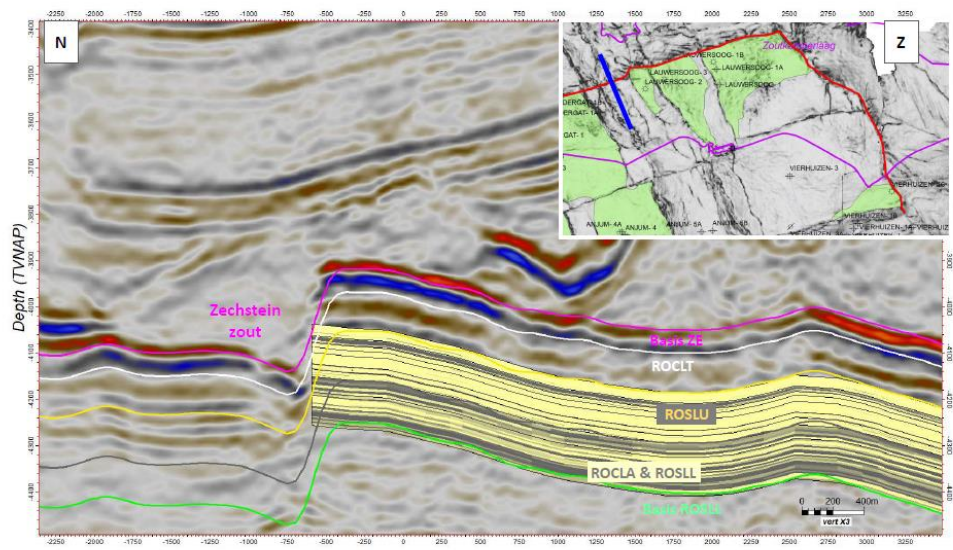


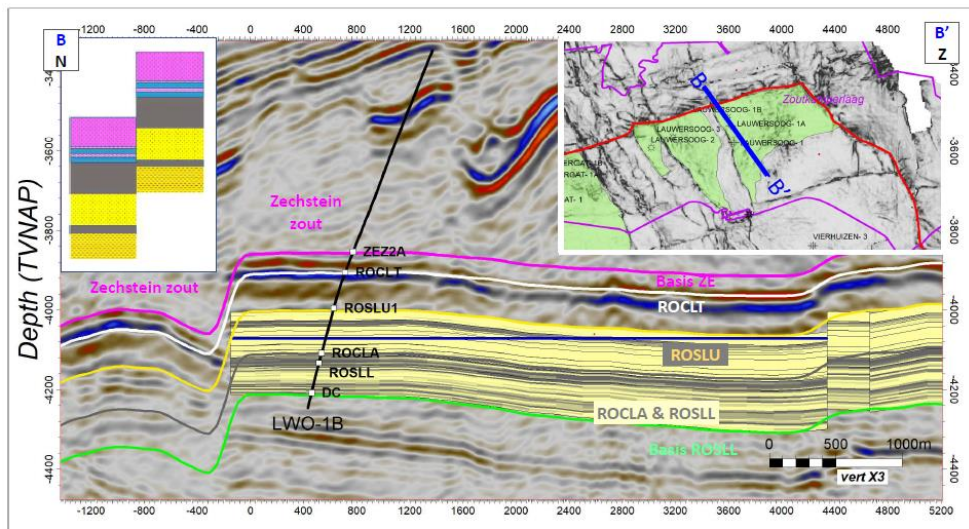
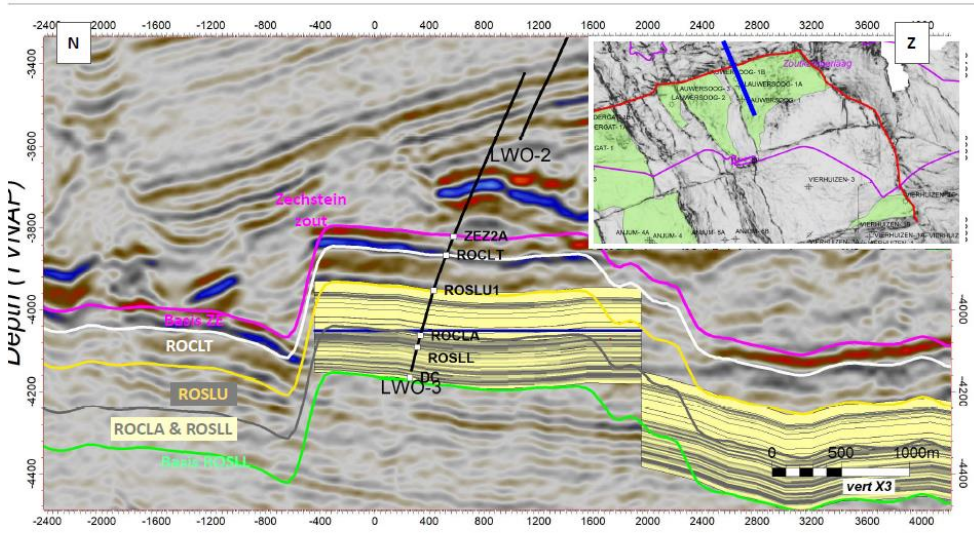


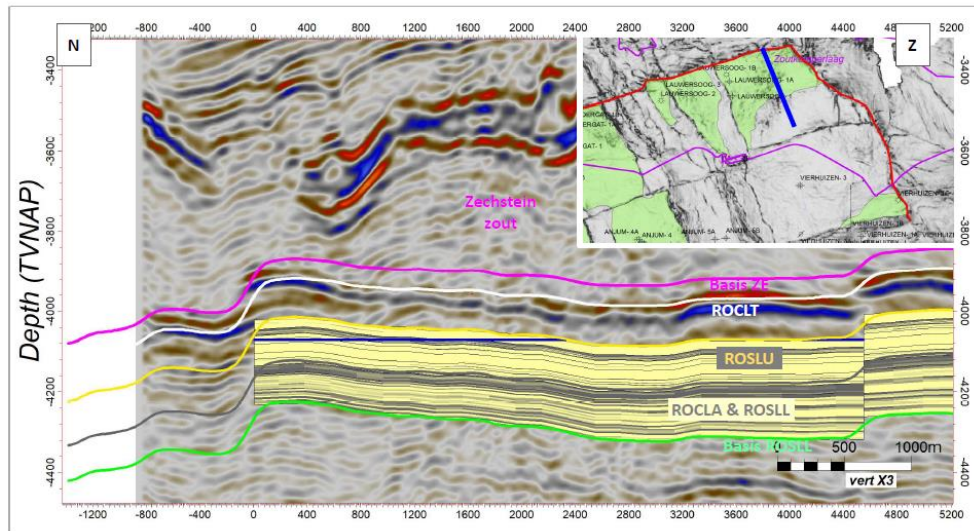
Noordelijke randbreuk











Oostelijke randbreuk

