

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +
F +

TNO-rapport

TNO 2016 R11209

Evaluatie mogelijke oorzaak aardbevingen bij Anna Paulowna in juni 2015

Datum 22 december 2016

Auteur(s)

Exemplaarnummer	1
Oplage	1
Aantal pagina's	56 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	SodM

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

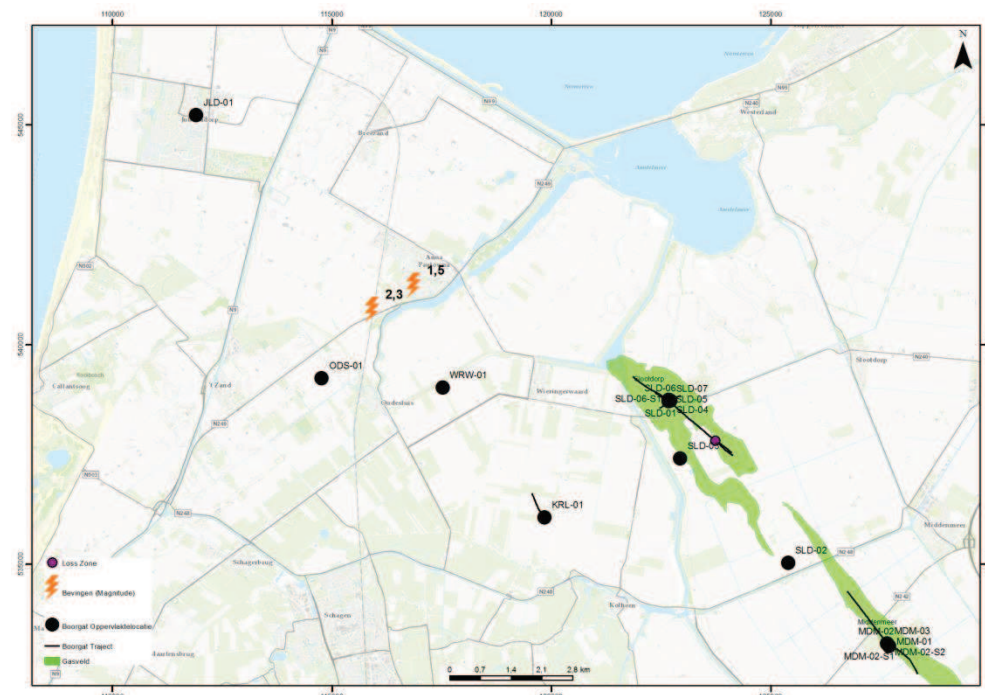
Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

Managementsamenvatting

Op 23 juni 2015 zijn er in de omgeving van Anna Paulowna twee aardbevingen geregistreerd (Figuur A). De centrale vraag voor dit onderzoek, op verzoek van SodM, is of een eenduidige oorzaak gegeven kan worden voor deze aardbevingen. Uit de evaluatie van de gegevens en informatie volgt dat geen eenduidige oorzaak gegeven kan worden voor de bevingen. De bevingen zijn waarschijnlijk door een samenloop van omstandigheden veroorzaakt.



Figuur A: Kaart met de locatie van de Anna Paulowna bevingen. Locatie van de bevingen conform de opgave van KNMI, de locatie van diepe boringen en de locatie van het Slootdorp gasveld.

Methode

Evaluatie van mogelijke oorzaken van de aardbevingen is uitgevoerd door een aantal hypothesen te testen. Naast natuurlijke seismiteit worden mijnbouwactiviteiten in het Slootdorp gasveld meegenomen (Figuur A). Tevens is een evaluatie op de plaatsbepaling van de bevingslocaties uitgevoerd.

Locatie bevingen

De plaatsbepaling van de bevingen door het KNMI is gebaseerd op interpretatie van gegevens en berekeningen met behulp van een ondergrondmodel. Vanwege onzekerheden in de parameterwaarden van de diepste modellagen kan de bevingslocatie enkele kilometers verschuiven. Hierdoor kan de locatie van de bevingen zowel nabij als ver weg van mijnbouwactiviteiten geplaatst worden.

Slootdorp gasveld

Het Slootdorp gasveld wordt sinds 1977 geproduceerd. Er is circa één miljard kubieke meter gas geproduceerd. Drukvaling in het reservoir ten gevolge van de

gasproductie is beperkt tot circa 20 bar, doordat een actieve aquifer aan het gasveld verbonden is. Bij de gasproductie wordt een kleine hoeveelheid formatiewater meegeproduceerd. Dit water wordt weer geïnjecteerd in het veld. Van het begin van productie tot juni 2015 zijn geen aardbevingen in of rond het Slootdorp gasveld geregistreerd.

Recentelijk (mei-juni 2015) zijn twee nieuwe putten geboord met gasproductie als doel. Bij het boren van één van deze putten zijn tijdens het boorproces flinke spoelingsverliezen opgetreden.

Evaluatie

Als de locatie van de bevingen zich bevindt:

- *Buiten het invloedsgebied van de mijnbouwactiviteiten*
Uitgaande van de locatie van de bevingen bij Anna Paulowna is het onwaarschijnlijk dat de bevingen veroorzaakt worden door mijnbouwactiviteiten in het Slootdorp gasveld. De evaluatie wijst dan in de richting van een natuurlijke oorzaak.
- *Binnen het invloedsgebied van de mijnbouwactiviteiten*
Uitgaande van de locatie van de bevingen in of nabij het Slootdorp gasveld, kan er een relatie verondersteld worden tussen de mijnbouwactiviteiten en de bevingen. Het is in dit geval waarschijnlijk dat de bevingen zijn veroorzaakt door het kritisch gespannen raken van breuken ten gevolge van productie en omhoogkomend gas-watercontact met als “trigger” spoelingsverliezen in een boring.

Bevinding

Het is niet mogelijk een eenduidige uitspraak te doen over de oorzaak van de bevingen. Het gebrek aan een voldoende dicht seismisch monitoring netwerk voor deze regio en nauwkeurig bepaalde parameters van (diepe) gesteentelagen staat dit in de weg.

Inhoudsopgave

	Managementsamenvatting	2
1	Inleiding	8
2	Beschrijving van het Slootdorp gasveld en de aardbevingen	9
2.1	Algemene beschrijving van het Slootdorp gasveld	9
2.2	Anna Paulowna aardbevingen	11
2.3	Onzekerheid positionering aardbevingen	16
3	Hypotheses & Werkwijze	19
3.1	Hypotheses	19
3.2	Werkwijze	19
4	Geologie van de diepe ondergrond van het gebied rond het Slootdorp gasveld en de Anna Paulowna aardbevingen.	21
4.1	Geologische opbouw	21
4.2	Natuurlijke spanning in de diepe ondergrond van het studiegebied.	25
5	Natuurlijke seismiciteit	30
6	Mijnbouw activiteiten in het Slootdorp gasveld	33
6.1	Reservoir drukdepletie	33
6.2	Aquifer drukdepletie	35
6.3	Injectie van productiewater	36
6.4	Spoelings-verliezen bij booractiviteit Slootdorp-7	42
7	Conclusie.....	49
8	Referenties	51
9	Ondertekening	52
	Bijlage 1: Spoelingsverliezen.	53
	Bijlage 2: Anna Paulowna bevingen in de media.	55

Figuren

Figuur 1: Top reservoirkaart van het Slootdorp gasveld. (Bron: Vermilion)	10
Figuur 2: P/Z grafiek van het Slootdorp gasveld. (Bron: Aanvulling WIPLA_Slootdorp.tiff, 2012)	10
Figuur 3: Kaart met de locatie van de Anna Paulowna bevingen. Locatie van de bevingen conform de opgave van KNMI, de locatie van diepe boringen en de locatie van het Slootdorp gasveld.....	12
Figuur 4: Kaart met de seismische meetstations waar de signalen van de Anna Paulowna beving zijn geregistreerd (bron KNMI).	13
Figuur 5: Interpretatie van aankomsttijden van de signalen behorend bij de bevingen van Anna Paulowna (Bron: KNMI)	14
Figuur 6: 3-D figuur van de opbouw van de ondergrond nabij Anna Paulowna. De groene puntjes in de gele cirkel zijn de locaties van de aardbevingshaarden geprojecteerd op het basis Zechstein laagvlak. De blauwe lijnen geven de positie van het Slootdorp gasveld aan waar de gesteenten van het Zechstein het gasreservoir vormen.	15
Figuur 7: KNMI onzekerheidsellipsen van de aardbevingshaardlocatie en de breuklijnen in de diepe ondergrond. Donkergrijze lijn waar de aardbevingshaard van 1,5 op plot is "Breuk-I".	16
Figuur 8: Zoom uit van figuur 7 waarbij de nieuwe haard locaties met het alternatieve snelheidsmodel (kleine bliksem schichten) zijn geplaatst. Indien deze omgeven worden met een zelfde onzekerheidsellips als de originele haard locaties leidt dit tot een grotere onzekerheidsellips. Deze nieuwe ellips is de paarse ellips. Het Slootdorp veld valt nu binnen de (nieuwe) onzekerheidsellips.	18
Figuur 9: Doorsnede van de seismische sectie met de geïnterpreteerde breuken langs het put-traject ODS-1 en de door het KNMI gepostuleerde bevingslocaties. Voor de locatie van de lijn (zie Figuur 10 doorsnede 1).	21
Figuur 10: Basis Zechstein horizon met daarop het Variance signaal geplot. Grijs betekent ongestoorde continue horizon; rood en zwarte kleuren betekend dat de continuïteit van de horizon is verstoord door bijvoorbeeld breuken.	23
Figuur 11: Basis Chalk kaart in het diepte domein met daarop het breukenmodel van de diepere lagen geprojecteerd.	23
Figuur 12: Basis Zechstein in het diepte domein.	24
Figuur 13: Allen-diagram van de Breuk-IV uit Figuur 7. In dit figuur is te zien hoe de gesteentepakketten aan weerszijde van de breuk naast elkaar zijn gepositioneerd. De golvende gestippelde lijnen geven de snijlijn van de laagpakketten met de breuk van de gesteenten aan de achterzijde van de breuk weer. De doorgetrokken golvende lijnen de snijlijnen van de gesteentepakketten met de breuk aan de voorzijde. De horizontale lijnen geven de positie van het Gas-Water-contact weer. De onderste het originele contact; de bovenste het huidige. Dikte van het interval tussen de gele lijn ROSL en de rode lijn DC is circa 160 m.....	24
Figuur 14: 3D weergave van de Chalk channel die loopt van het Slootdorp gasveld (zie lichtblauwe lijn die het boortraject van de boring SLD-7 is) naar het noordwesten waar de aardbevingshaardlocaties van KNMI liggen (Figuur 7)..	25

Figuur 15: Druk regimes in de ondergrond	26
Figuur 16: World stress map (bron: http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/pub/maps/northsea.gif)	27
Figuur 17: Mohr-Coulomb grafiek van de initiële natuurlijke spanning op breuken in de ondergrond bij de SLD-1 put voordat het reservoir in druk was gedepleteerd	29
Figuur 18: Tektonische (natuurlijke) aardbevingen in Nederland. (Bron: KNMI).....	31
Figuur 19: NE-ZW georiënteerde seismische sectie over het Slootdorp gasveld. Er is een duidelijk verzet te zien op basis NU (gele lijn in de rode cirkel) wat betekend dat die breuk na afzetting van die laag nog actief is geweest. Basis Upper North Sea (Base NU) is gedateerd op circa 22 mln jaar geleden. Voor de locatie van de sectie zie Figuur 10, doorsnede 3.	32
Figuur 20: Mohr-Colomb grafiek van de spanningssituatie bij drukdepletie van 20 bar in het ZEZ2C reservoir.	35
Figuur 21: Grafiek volume injectie water en injectiedruk.....	37
Figuur 22: Ondergrondse locatie van de doorsnijding van de Slootdorp-1 put met top reservoir. (voor positie sectie zie Figuur 10, doorsnede 2).	38
Figuur 23: Variance kaart van basis Zechstein van het gebied rond de putten SLD-1 en SLD-7. Rode kleuren geven de locaties aan waas het seismische signaal niet continue is. Mogelijk veroorzaakt door verbreuking.	39
Figuur 24: Links- Zoom in van Figuur 22. Rechts- variance display van hetzelfde stuk seismiek als a). merk de rode vlek op op de positie van de perforaties in de put SLD-1.....	39
Figuur 25: Seismische secties in de omgeving van SLD-1 ter illustratie van de complexe breukstructuur en de laterale variabiliteit. De middelste is dezelfde sectie als Figuur 24.....	40
Figuur 26: 3D-visualistait van de positie van de put SLD-1 en SLD-7 ten opzicht van de breuken in het Slootdorp gasveld.	40
Figuur 27: Indicatieve analyse breuk reactivatie ten gevolge van opgelegde injectiedruk 10bar van in het 20 bar gedepleteerde Zechstein 3 Carbonaat reservoir. Bij de berekening van de grootte van de ellipse is uitgegaan van een injectiewatertemperatuur van 45°C.....	41
Figuur 28: Pre-drill Top Zechstein 2 Carbonaat kaart uit het Slootdorp-7 eindrapport. De ster geeft de ondergrondse doel locatie weer. De paarse lijn het boortraject van de put SLD-7.....	43
Figuur 29: A) NW-ZO seismische sectie parallel langs het SLD-7 boorgat. B) ZW-NE seismische sectie door het punt van de losses in de put SLD-7. De seismiek is in het tijd-domein.....	44
Figuur 30: Kernplug Porositeit vs permeabiliteit van alle Chalk kernpluggen metingen bekend bij TNO-AGE in Nederland	46
Figuur 31: Porositeit/permeabiliteit plot van 2 Chalk reservoirs in het Gorm veld, Denemarken (Uit Mortensen et al., 1998).	46

Tabellen

Tabel 1: reservoir en geomechanische eigenschappen van de reservoirs van het Slootdorp gasveld.	11
Tabel 2: KNMI gegevens van de bevingen bij Anna Paulowna. (Bron: http://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/seismologie/all_induced.pdf)	15

1 Inleiding

Op 23 juni 2015 zijn er in de omgeving van Anna Paulowna twee aardbevingen geregistreerd. KNMI heeft dit bekend gemaakt in een persbericht eind juni 2015. In het persbericht wordt gesteld dat het geen natuurlijke bevingen betreft en dat ze gerelateerd zijn aan de gaswinning in de regio (Bijlage 2: bericht rtrvnh en ANP). Locatie en magnitude zijn door het KNMI berekend en vrijgegeven op de KNMI website in het document 'all_induced.pdf' (http://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/seismologie/all_induced.pdf).

De meest nabije gaswinningslocatie is het Slootdorp gasveld. Er zit ongeveer vijf kilometer afstand tussen de door KNMI bepaalde aardbevingshaarden en de rand van het Slootdorp gasveld. Een directe relatie tussen beide is vooralsnog niet eenduidig te bepalen (zie verklaring Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) hieronder).

Verklaring van SodM d.d. juni 2015

“Op 23 juni 2015 heeft het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) een melding gekregen van het KNMI dat er in de nacht twee bevingen zijn geweest in de buurt van Anna Paulowna. Hoe de bevingen zijn ontstaan en of er een mogelijke relatie is met gaswinning is nog onduidelijk. De locatie van de bevingen ligt hemelsbreed ruim 5 kilometer van het dichtstbijzijnde gasveld ‘Slootdorp’, in de buurt van de plaats Slootdorp. Aardbevingen veroorzaakt door gaswinning vinden meestal plaats in of aan de rand van een gasveld. Vooralsnog ligt een oorzakelijke relatie niet direct voor de hand.

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft TNO opdracht gegeven om nader onderzoek te doen naar een mogelijke relatie tussen de bevingen en de mijnbouwactiviteiten in het gebied. Het is nog niet bekend wanneer de onderzoeksresultaten bekend worden. SodM is zich bewust van de bezorgdheid die is ontstaan onder de bewoners in het gebied en streeft er naar om zo snel mogelijk uitsluitsel te kunnen geven.”

Bereik

Zoals in de bovenstaande verklaring gemeld heeft TNO – Adviesgroep Economische Zaken (TNO-AGE), op verzoek van SodM, een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijke oorzaak van de bevingen bij Anna Paulowna, al dan niet gerelateerd aan mijnbouw activiteiten in de diepe ondergrond.

Indeling

TNO-AGE heeft een aantal hypothesen opgesteld die mogelijke oorzaken van de aardbevingen beschrijven (Hoofdstuk 3). Om deze hypothesen te toetsen is de diepe ondergrond van deze regio in meer detail in kaart gebracht (Hoofdstuk 4). In Hoofdstuk 5 en 6 wordt naar een verklaring gezocht door het beschouwen van natuurlijke seismiteit en de hypothesen gerelateerd aan de gaswinning van het Slootdorp gasveld.

2 Beschrijving van het Slootdorp gasveld en de aardbevingen

2.1 Algemene beschrijving van het Slootdorp gasveld

Het Slootdorp gasveld is in 1965 ontdekt door de put Slootdorp-1 (SLD-1). Het veld is in 1977 in productie genomen door Elf-Petroland. Momenteel wordt het veld geproduceerd door Vermilion Oil and Gas Netherlands (VOGN). Het Slootdorp gasveld ligt in een langgerekt NW-ZO georiënteerd horstblok (Figuur 1 & Figuur 6), een breukbegrensde hoge structuur in de diepe ondergrond. De top van de structuur ligt op circa 1910 m.

De exploratieput SLD-1 trof gas aan in de Zechstein-2 en -3 Carbonaten. Daarnaast is er ook gas aangetroffen in het Rotliegend. Het afdichtende pakket wordt gevormd door bovenliggende Zechstein evaporiet- en kleisteenlagen. De hoeveelheid "Gas Initieel In Plaats" (GIIP) is bepaald op 2,89 mld m³¹. Het veld is sinds 1977 in productie en heeft tot nu toe 1,034 mld Nm³ geproduceerd. De laatste jaren is enkel door put SLD-4 gas geproduceerd uit het Rotliegend uit het (noord)westelijke breukblok van het Slootdorp gasveld. Het bij de gasproductie meekomende formatiewater wordt terug de formatie in geïnjecteerd door put SLD-1 in het centrale breukblok van het Slootdorp gasveld in het Zechstein 3 Carbonaat reservoir op een diepte van 1980.5 tot 1990 m langs het boorgat gemeten. De temperatuur van het injectiewater is variabel. Het waterinjectie rapport over 2009 geeft injectietemperaturen tussen 35 en 55°C, die van 2010 tussen 20 en 52°C. Putten SLD-2 (1965) en SLD-3 (1976) staan te boek als droge *appraisal* putten. De put SLD-5 geboord in 1988 heeft gas aangetroffen en is afgewerkt als productie / injectieput met een dual completion. Deze put is in 2011 definitief verlaten.

Het Slootdorp gasveld heeft een actieve aquifer. Bij een actieve aquifer neemt water de plaats in van het geproduceerde gas. Het formatiewater stroomt vanonder het Gas-Water Contact (GWC) naar boven en verlegt als zodanig het GWC naar een ondiepere positie in het gasveld. Dit resulteert in een beperkte drukdaling in het gasveld ten gevolge van de gasproductie (Figuur 2). De originele druk (P_{ini}) was 220 bar. Momenteel bedraagt de reservoirdruk 200 bar². Door de actieve aquifer is het GWC omhoog gekomen. Het originele GWC lag op 2004m. Momenteel ligt het GWC op ca 1986m. (Figuur 1³).

In de periode van de start van gasproductie en injectie van mee geproduceerd productiewater tot juni 2015 is er geen seismiteit geregistreerd in de ruime omgeving van het Slootdorp gasveld. Ook is er geen meetbare bodemdaling opgetreden ten gevolge van de gaswinning.

¹ NLOG_Field

Asset3793_2_WIPLA_SLOOTDORP_VERMILION_ACTUALISERING_WINNINGSPLAN_PUB.PDF

² Jaarrapportage 2015, 150130 - Annual_Report_VOGN_art113-1-h_pressure_2015.xls

³ Bron: End of well report SLD-07

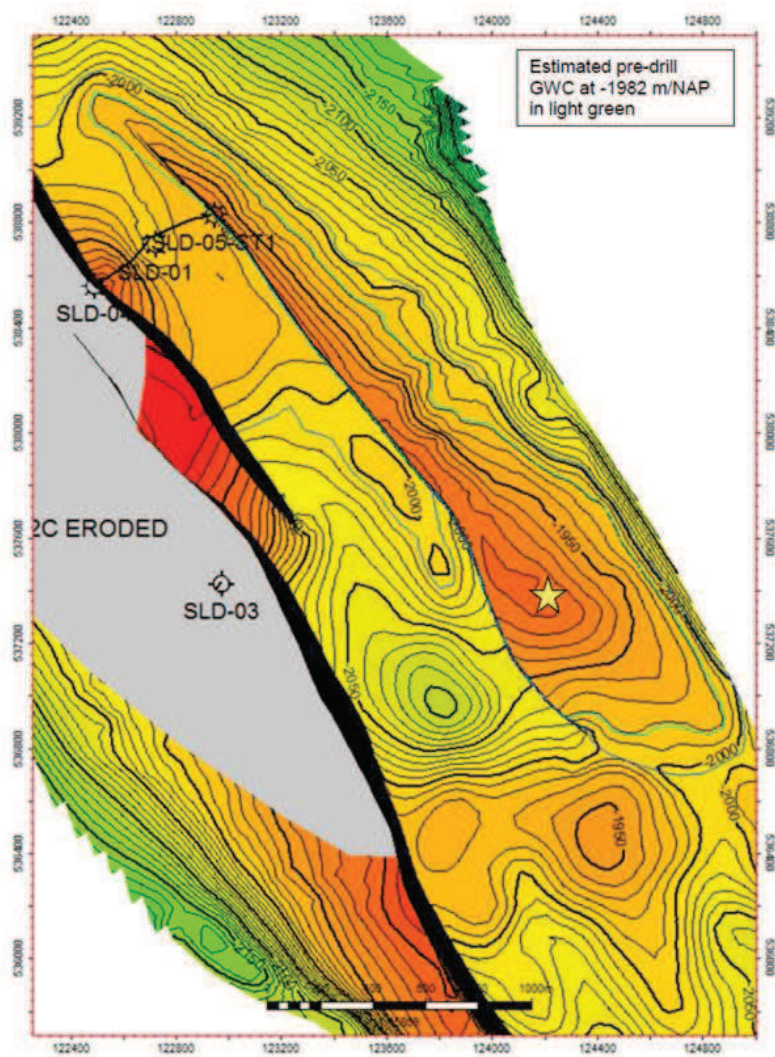
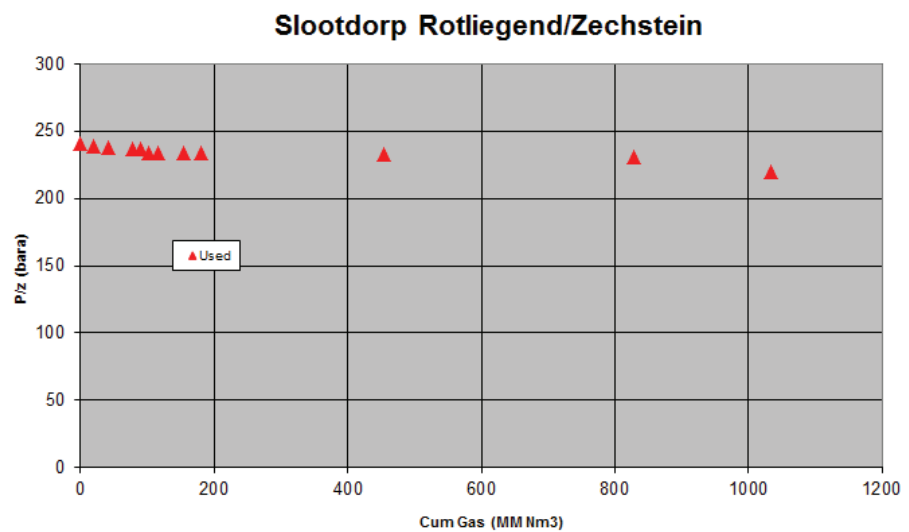


Figure 2: Top Z2 Carbonate depth map with pre-drill estimated GWC.

Figuur 1: Top reservoirkaart van het Slootdorp gasveld. (Bron: Vermilion)



Figuur 2: P/Z grafiek van het Slootdorp gasveld. (Bron: Aanvulling WIPLA_Slootdorp.tiff, 2012)

Recent (april, mei, juni 2015) zijn twee nieuwe productieputten geboord:

- SLD-6 met als doel het Rotliegend (i.p.v. de Zechstein) reservoir boven het GWC in een apart breukblok van het Slootdorp gasveld.
- SLD-7 met als doel het aansluiten van een achtergebleven hoeveelheid gas in een culminatie die los is komen te staan van het hoofdveld na het stijgen van het GWC.

Tijdens het boren van de put SLD-7 zijn significante hoeveelheden boorvloeistof verloren gegaan op een diepte van ca 2080m en vervolgens tijdens het boren van de Zechstein reservoir sectie (Bijlage 2).

Reservoir- en geomechanische parameters zijn gegeven in het openbare deel van het Winningsplan van het Slootdorp gasveld ⁴.

Parameter	Formatie	waarde	eenheid	Bron / opmerking
GIIP		2892	mln m ³	WIPLA 2012
RF		41.8	%	WIPLA 2012
UR		1210.1	mln m ³	WIPLA 2012
Bruto dikte	ZEZ2C	40	m	WIPLA 2003
Netto dikte	ZEZ2C	30	m	WIPLA 2003
N/B	ZEZ2C	75	%	WIPLA 2003
Porositeit	ZEZ2C	13	%	WIPLA 2003
Gas saturatie	ZEZ2C	70	%	WIPLA 2003
Permeabiliteit (uit test)	ZEZ2C	10	mD	WIPLA 2003
Bruto dikte	ZEZ3C	20	m	WIPLA 2003
Netto dikte	ZEZ3C	18	m	WIPLA 2003
N/B	ZEZ3C	90	%	WIPLA 2003
Porositeit	ZEZ3C	13	%	WIPLA 2003
Gas saturatie	ZEZ3C	70	%	WIPLA 2003
Permeabiliteit (uit test)	ZEZ3C	10	mD	WIPLA 2003
P _{ini}		219,8	bar	
P _{present}		199.7	bar	Jaarrapport 2015
dP	"	12.3	bar	Druk depletie
C _m	Zechstein	9.7*10 ⁻⁶	1/bar	Oedometric compressibility
Porositeit	"	13	%	
h	"	60	m	Reservoir dikte
v*	"	0.25	-	Poisson's ratio
z	"	1974	m	Diepte van de Formatie
R	"	988.5	m	Radius van het reservoir

Tabel 1: reservoir en geomechanische eigenschappen van de reservoirs van het Slootdorp gasveld.

* TNO-AGE heeft een analyse op de dipole sonic log van put SLD-6 uitgevoerd en de Youngs modulus en Poissons ratio voor de Zechstein ingeschat. Deze zijn respectievelijk 18300 MPa en 0,19.

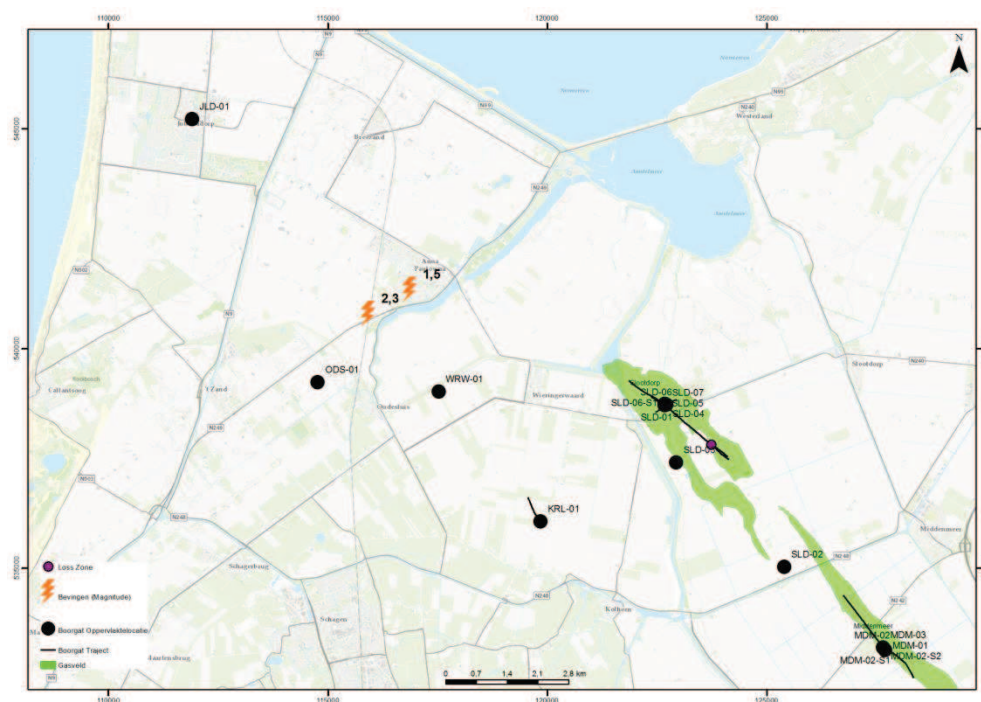
2.2 Anna Paulowna aardbevingen

De bevingen hebben plaats gevonden nabij Anna Paulowna. Ongeveer 5 km ten zuidoosten van de KNMI plaatsbepaling van de bevingen ligt het Slootdorp gasveld

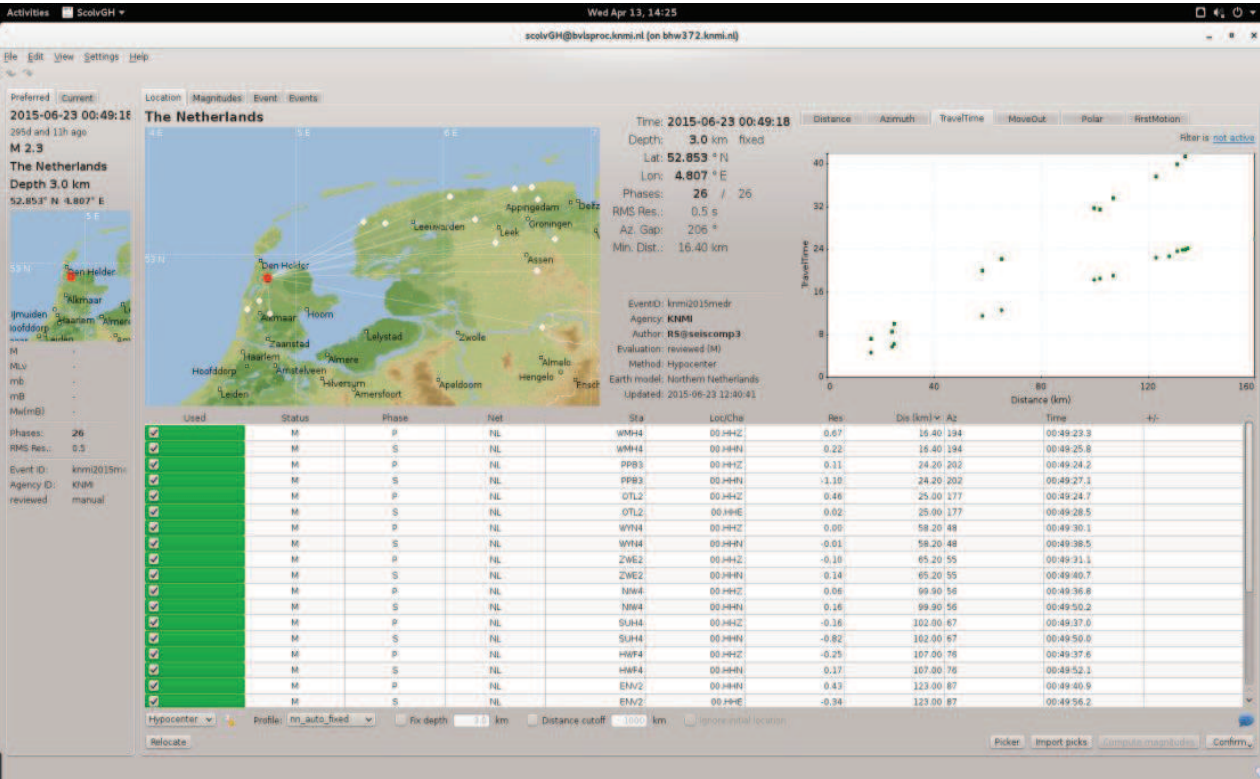
⁴ 2_WIPLA_SLOOTDORP_VERMILLION_ACTUALISERINGWINNINGSPLAN_PUB.pdf

(Figuur 3). De aardbevingen zijn geregistreerd in ver af gelegen seismische meetstations van het KNMI waaronder Bergen en Harlingen (Figuur 4). De aardbevingshaard is “excentrisch” ten opzichte van de locaties van de seismische stations (Figuur 4). Op basis van analyse van de metingen (Figuur 5), de aanname dat de beving is opgetreden rond drie km diepte onder maaiveld en met behulp van een homogeen gelaagd ondergrond model zijn de meest waarschijnlijke locaties van de twee aardbevingen berekend. In Tabel 2 worden de gegevens van de Anna Paulowna aardbevingen uit dit document weergegeven.

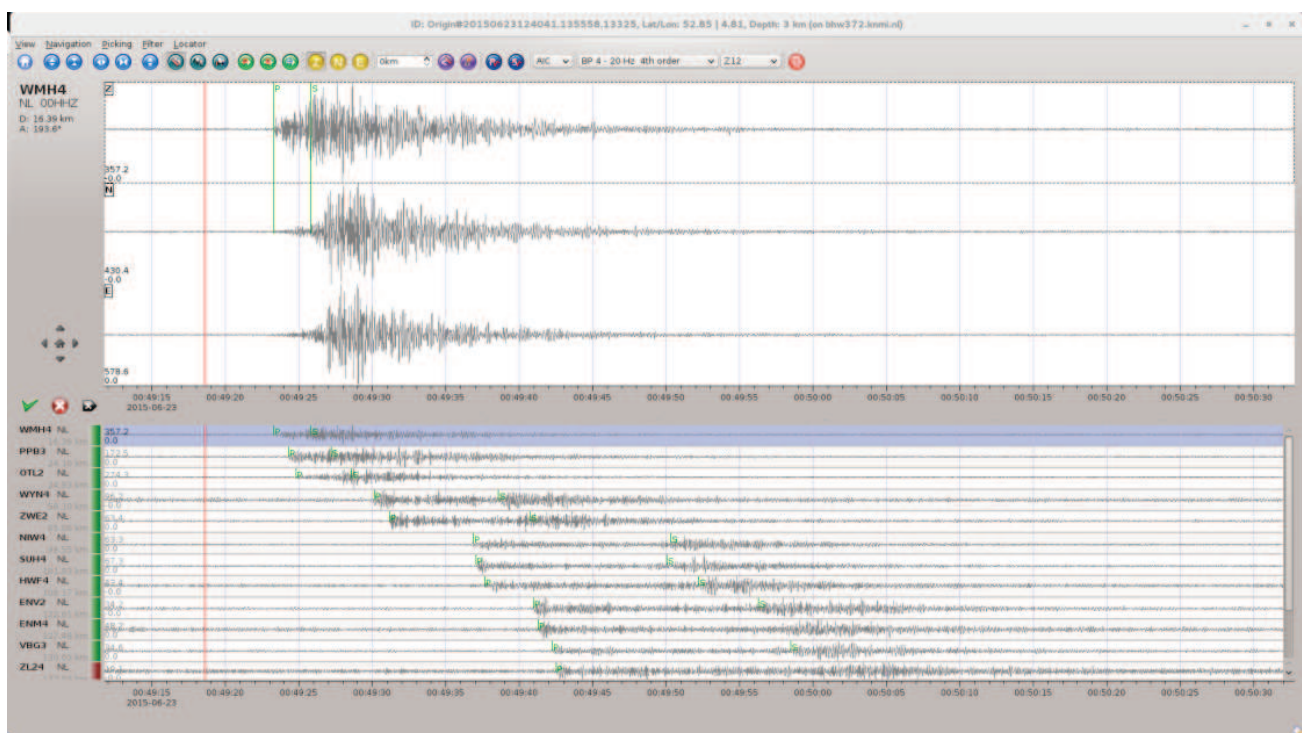
KNMI heeft in de weken na de bevingen geen meldingen binnen gekregen dat personen in de regio de bevingen hebben gevoeld (pers. comm., , KNMI).



Figuur 3: Kaart met de locatie van de Anna Paulowna bevingen. Locatie van de bevingen conform de opgave van KNMI, de locatie van diepe boringen en de locatie van het Slootdorp gasveld.



Figuur 4: Kaart met de seismische meetstations waar de signalen van de Anna Paulowna beving zijn geregistreerd (bron KNMI).

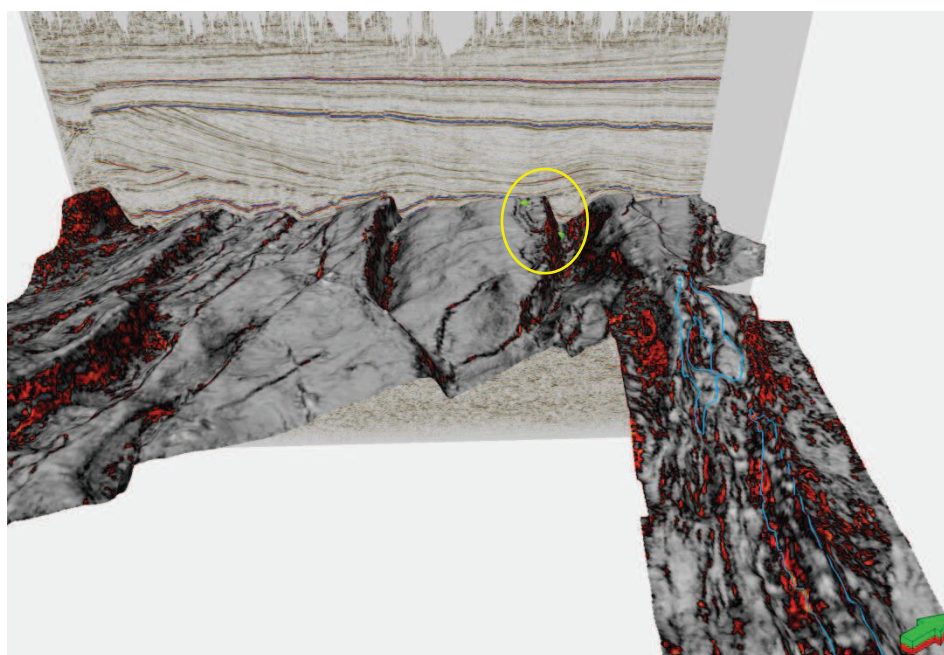


Figuur 5: Interpretatie van aankomsttijden van de signalen behorend bij de bevingen van Anna Paulowna (Bron: KNMI) .

YYMMDD	TIME	LOCATION	LAT	LON	DEPTH	MAG
20150623	004816.39	Anna Paulowna	52.858	4.821	3.0	1.5
20150623	004918.60	Anna Paulowna	52.853	4.807	3.0	2.3

Tabel 2: KNMI gegevens van de bevingen bij Anna Paulowna. (Bron: http://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/seismologie/all_induced.pdf)

De ondergrond van Nederland heeft een gelaagde opbouw. Tot diep in de Nederlandse ondergrond zijn sedimentaire gesteentelagen op elkaar gestapeld. Figuur 6 geeft een 3D-beeld van de ondergrond van de ruime omgeving van de aardbevingshaarden. In de achtergrond is een seismische sectie te zien waar de gelaagdheid duidelijk waarneembaar is (zie ook 4.1 Geologische opbouw). De lijnen op de seismische secties zijn doorsnijdingen van geologische laagvlakken met de verticale sectie. Het grijze vlak (met rode vlekken) dat naar voren komt uit de seismische sectie is zo'n laagvlak. Dit laagvlak vertegenwoordigt de basis van het Zechstein gesteentepakket (het reservoir van het Slootdorp gasveld) en ligt tussen 1500 tot 2300 meter onder maaiveld. Opvallend zijn de grote sprongen in het laagvlak van ondiep naar diep. Dat zijn de locaties van breuken in de diepe ondergrond die de laagvlakken langs een breukvlak verzetten. De twee groene puntjes (in de gele cirkel) geven de locatie van de aardbevingshaarden weer geprojecteerd op het laagvlak op een diepte van circa 2 km onder maaiveld. Er is duidelijk te zien dat deze aardbevingshaardlocaties zich in een breukzone bevinden.

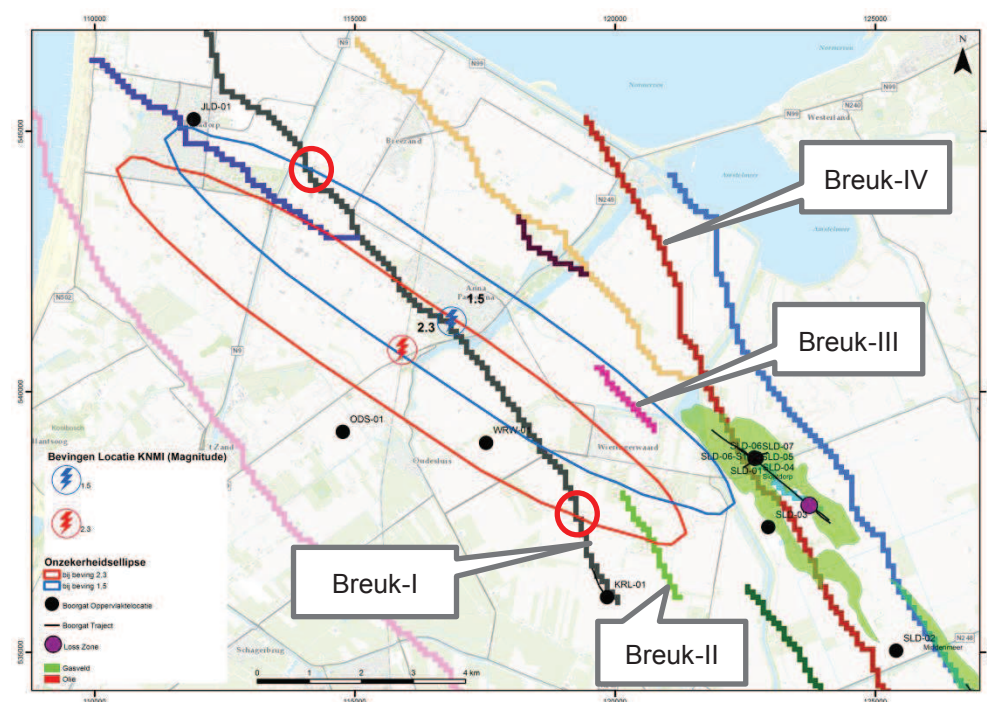


Figuur 6: 3-D figuur van de opbouw van de ondergrond nabij Anna Paulowna. De groene puntjes in de gele cirkel zijn de locaties van de aardbevingshaarden geprojecteerd op het basis Zechstein laagvlak. De blauwe lijnen geven de positie van het Slootdorp gasveld aan waar de gesteenten van het Zechstein het gasreservoir vormen.

2.3 Onzekerheid positionering aardbevingen

De locatie van een aardbevingshaard wordt berekend aan de hand van aankomsttijden van het aardbevingssignaal bij seismische meetstations en een seismisch snelheidsmodel van de ondergrond. De locaties van de aardbevingshaarden zijn door het KNMI bepaald. In Figuur 3 zijn deze posities in kaartbeeld gegeven; Tabel 1 geeft de posities. Omdat de aardbevingen op grote afstand en excentrisch liggen ten opzichte van de seismische stations is de plaatsbepaling vrij onzeker.

Daarnaast moet bij de bepaling van de aardbevingshaarden rekening gehouden worden met een aantal onzekerheden, zoals die in de interpretatie van de aankomsttijd van het signaal bij een seismisch station en die in het gebruikte seismisch snelheidsmodel van de ondergrond. Het KNMI heeft per aardbeving een onzekerheidsellips bepaald (Figuur 7). Deze ellips geeft het gebied aan waarin met circa negentig procent zekerheid de aardbevingshaard is gelokaliseerd.



Figuur 7: KNMI onzekerheidsellipsen van de aardbevingshaardlocatie en de breuklijnen in de diepe ondergrond. Donkergrijze lijn waar de aardbevingshaard van 1,5 op plot is "Breuk-I".

Het Slootdorp gasveld, de randbreuken van het Slootdorp gasveld en ook de positie van de zone van spoelingsverliezen in de ondergrond vallen niet binnen de onzekerheidsellipsen zoals bepaald door KNMI. De afstand van de aardbevingshaarden en de injectielocatie SLD-1 of de locatie van de spoelingsverliezen in de put SLD-7 is 6 à 7 km respectievelijk circa 8 km.

Aardbevingen vinden plaats op breuken of in breukzones. Op basis van de aardbevingshaardlocatie, de KNMI-onzekerheidsellipsen en de aanwezigheid van een breuk waarop de aardbevingshaarden geprojecteerd kunnen worden is het aannemelijk dat de bevingen op breuk-I tussen de rood omcirkelde kruispunten

tussen de breuk en de onzekerheids-ellipsen in, ontstaan zijn. De afstand van deze punten tot de injectie-locatie SLD-1 in het Slootdorp gasveld is tussen de 3,5 en 10 km. De afstand van deze punten tot de locatie van de spoelingsverliezen in het Slootdorp gasveld is tussen de 4,5 en 11,6 km. In de onzekerheidsellipsen zijn naast breuk-I nog twee kleine breuken. Voor breuk-II zijn de afstanden tot SLD-1 circa 2,5 tot 3 km en voor breuk-III circa 2 tot 3,5 km.

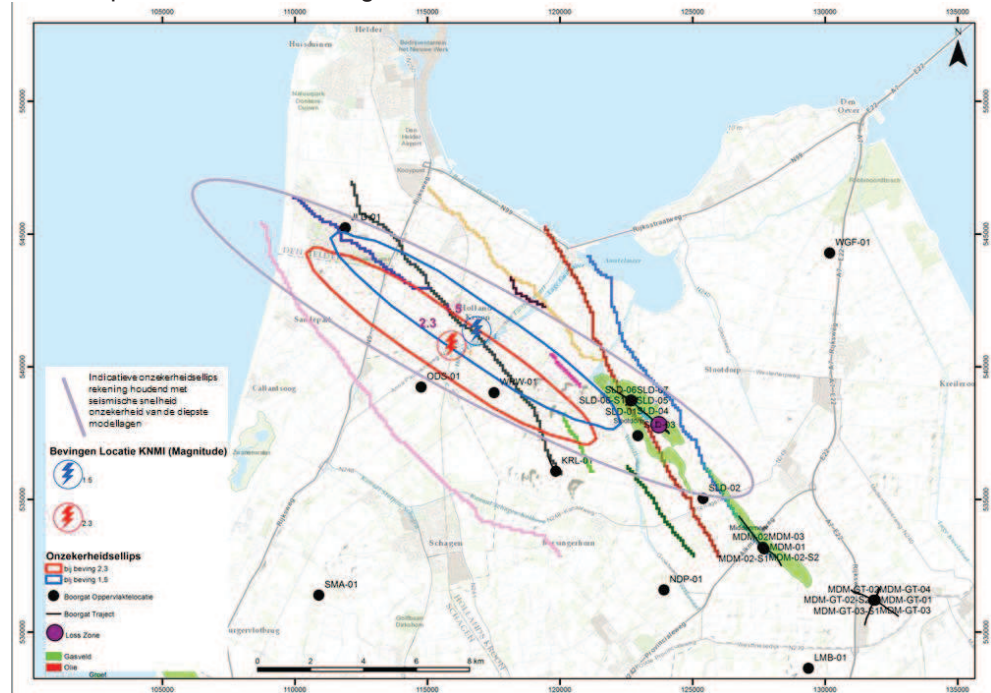
De KNMI-onzekerheidsellips is vooral gebaseerd op de geobserveerde mismatch tussen modelvoorspelling en waarnemingen. Door de excentrische ligging van de bevingen t.o.v. het monitoringnetwerk en de grote afstand tot de meetstations is het mogelijk dat er aanvullende modelonzekerheden zijn die een verschuiving in de locatie van de aardbevingshaard zouden kunnen veroorzaken. Deze modelonzekerheden zouden niet in de mismatch tussen modelvoorspelling en waarnemingen tot uitdrukking komen. Dit betreft vooral het golfsnelheidsmodel van de diepere ondergrond die de aardbevingsgolven doorkruisen op de weg van de beving naar het waarneempunt. Ook de diepte van de beving is een onzekere factor. Deze kan aan de hand van de metingen slecht bepaald worden en wordt daarom bij voorbaat gefixeerd, in dit geval op 3km.

Met vergelijkbare methodieken en modellen als die van het KNMI en met inachtneming van alternatieve snelheidsmodellen voor de ondiepe lagen (tot circa 5 km diep) en onzekerheden in de interpretatie van de golfvorm data kan TNO-AGE de positie van de haarden bij benadering confirmeren. Ook de grootte van de onzekerheidsellipsen is in die TNO-AGE evaluatie vergelijkbaar. De volgende paragrafen behandelen het effect van de diepte van de aardbevingshaard en het effect van de seismische snelheden van de model lagen op de verkregen locatie van de bevingen nabij Anna Paulowna.

Indien verondersteld wordt dat de aardbevingshaard op 2 km i.p.v. 3 km diep ligt dan verschuiven de haardlocaties circa 700 m naar het zuidoosten (Figuur 8). De onzekerheidsellipsen schuiven dan mee wat resulteert in een overlap van het Slootdorp gasveld met de (blauwe) onzekerheidsellips.

In het gebruikte ondergrondmodel zitten ook intervalsnelheidswaarden van de zeer diepe lagen (meer dan elf km diepte) die niet bepaald zijn op basis van meetwaarden uit putten. Deze waarden zijn te typeren als schattingen op basis van indirecte waarnemingen. Desalniettemin zijn die gebruikte waarden **meest waarschijnlijke waarden** die met een grote onzekerheidsmarge omgeven zijn. Deze onzekerheidsmarge is niet in de bepaling van de KNMI onzekerheidsellipsen meegenomen. Als bijvoorbeeld als de snelheid van de diepste lagen met 5% onzekerheid wordt omgeven dan verschuift de aardbevingshaard circa 5 km naar het noordwesten of zuidoosten. In het geval van een 5% snelheidsreductie valt één van de aardbevingshaarden samen met het Slootdorp gasveld en van de andere zou het Slootdorp gasveld in de onzekerheidsellips vallen (Figuur 8). Vijf procent reductie in seismische snelheid valt ruim binnen de onzekerheidsbandbreedte van deze schattingen (van Dalfsen et al., 2006). TNO-AGE gaat voorzichtigheidshalve van uit dat het gebied waarbinnen de aardbevingshaarden met even grote waarschijnlijkheid gepositioneerd kunnen worden aanzienlijk groter is dan nu door de KNMI ellipsen wordt gesuggereerd. Figuur 8 geeft het gebied aan waar de aardbevingshaarden gelokaliseerd kunnen zijn rekening houdend met de

additionele onzekerheden in het onderliggende snelheidsmodel (paarse ellips). Het Slootdorp veld valt binnen dit gebied



Figuur 8: Zoom uit van figuur 7 waarbij de nieuwe haard locaties met het alternatieve snelheidsmodel (kleine bliksem schichten) zijn geplaatst. Indien deze omgeven worden met een zelfde onzekerheidsellips als de originele haard locaties leidt dit tot een grotere onzekerheidsellips. Deze nieuwe ellips is de paarse ellips. Het Slootdorp veld valt nu binnen de (nieuwe) onzekerheidsellips.

3 Hypotheses & Werkwijze

3.1 Hypotheses

Samen met SodM heeft TNO-AGE een aantal hypotheses opgesteld die alleen of in combinatie een mogelijke oorzaak kunnen aangeven van de bevingen in het gebied van Anna Paulowna. De hypotheses worden hieronder puntsgewijs en in willekeurige volgorde genoemd.

- 1) **Ondiepe oorzaak.** Door de onttrekking of injectie van gas en / of water uit het reservoir kan in de gesteentepakketten van Trias tot Krijt ouderdom boven het reservoir spanningsveranderingen plaatsvinden. Kunnen deze spanningstoestanden bevingen tot gevolg hebben?
- 2) **Reservoir drukdepletie door gas productie.** Door de onttrekking van gas daalt de druk in het gasvoerende deel van het reservoir. Kan deze drukdaling de bron zijn van de aardbevingen?
- 3) **Aquifer drukdepletie ten gevolge van gasproductie uit het Slootdorp gasveld.** Door de onttrekking van het gas daalt de druk in het reservoir en de aanpalende / onderliggende aquifer. Kan de mate van drukdaling in de aquifer de bron van de aardbevingen zijn?
- 4) **Injectie van productiewater in de put Slootdorp-1.** Bij de productie van het gas uit het Slootdorp gasveld komt een relatief kleine hoeveelheid formatiewater mee. Dit productiewater wordt via de put Slootdorp-1 weer terug in het reservoir gepompt. Kan de injectie van deze hoeveelheid water de bron van de bevingen zijn?
- 5) **Breuksterkte verlaging door opkomend Gas-Water-Contact.** Het Slootdorp gasveld heeft een actieve aquifer. Kan de oorzaak van de trillingen gezocht worden in de gewijzigde breuksterkte/wrijving ten gevolge van het “nat” worden van een voorheen “droge” (met gas gevulde) breuk?
- 6) **Spoelingsverliezen bij booractiviteiten.** Tijdens het boren van de put Slootdorp-7 zijn in de periode van 3 juni 2015 tot en met 6 juni 2015 significante hoeveelheden boorvloeistof verloren gegaan. Kan dit spoelingsverlies de bron van de bevingen zijn?
- 7) **Natuurlijke seismiciteit.** Op de regionale kartering zijn veel grote breuken gekarteerd. Zijn deze breuken nog van nature actief zoals bijvoorbeeld de Peel randbreuk? ⁵

3.2 Werkwijze

Om de hypotheses 1 t/m 7 te kunnen toetsen is een goed en gedetailleerd beeld van de ondergrond een randvoorwaarde.

Indien de drukverandering in de vloeistof en/of gasvulling van het reservoir als oorzaak wordt beschouwd is dit enkel mogelijk als de twee locaties: haard van de beving en bron van de spanningsverandering, via een permeabele / doorlatende zone met elkaar verbonden zijn. Dit om de drukperturbatie van de ene naar de andere locatie te kunnen doorgeven.

⁵ (http://nlog.nl/resources/NCP-1/depth%20maps/pdf/Zechstein_depth_version1-12-06.pdf)

Het is daarom belangrijk om een eventuele permeabele zone in de vorm van gesteentelagen of breuken te karteren. Daarvoor heeft TNO-AGE alle relevante gegevens (putten en seismiek) en interpretaties verzameld. Hiermee is het ondergrond model van de ruime omgeving van de aardbevingshaarden inclusief het Slootdorp gasveld geactualiseerd. Dit is beschreven in Hoofdstuk 4.

Per hypothese wordt op basis van de evaluatie een kwalitatieve uitspraak gedaan of het waarschijnlijk is of het mechanisme, gepostuleerd in de hypothese, de oorzaak van de beving is.

Kwalitatieve classificaties zijn:

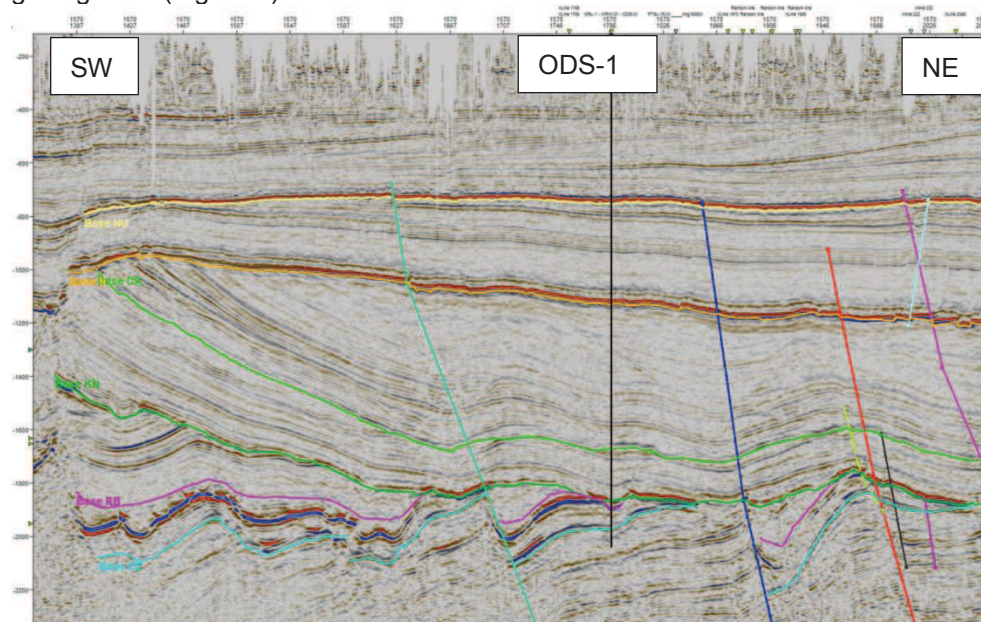
- *Ze*er *waarschijnlijk*: als eenduidig uit de evaluatie blijkt dat dit de oorzaak is. Bijvoorbeeld als aardbevingshaard en bron/mechanisme op nagenoeg dezelfde positie zijn gelokaliseerd en er een valide fysische onderbouwing te geven is,
- *Waarschijnlijk*: als uit de evaluatie blijkt dat dit met redelijke zekerheid de oorzaak kan zijn. Bijvoorbeeld als aardbevingshaard en bron/mechanisme binnen de KNMI-onzekerheidsellips zijn gelokaliseerd en er een valide fysische onderbouwing te geven is,
- *Mogelijk*: als uit de evaluatie blijkt dat dit de mogelijke oorzaak kan zijn maar dat het niet eenduidig of niet met grote zekerheid bepaald kan worden. Bijvoorbeeld als aardbevingshaard en bron/mechanisme in het bereik van de onzekerheidsbandbreedte is gelokaliseerd als de bij de aardbevingshaard-locatiebepaling alle onzekerheden worden meegenomen en er een valide fysische onderbouwing te geven is,
- *Onwaarschijnlijk*: als uit de evaluatie blijkt dat het mechanisme met redelijke zekerheid niet gekoppeld kan worden aan de aardbeving(s locatie). Bijvoorbeeld als er geen valide fysische onderbouwing te geven is,
- *Ze*er *onwaarschijnlijk*: als uit de evaluatie blijkt dat er geen directe relatie is te vinden tussen mechanisme en aardbevingshaard en geen valide fysische onderbouwing is te geven.

4 Geologie van de diepe ondergrond van het gebied rond het Slootdorp gasveld en de Anna Paulowna aardbevingen.

Voor het actualiseren en detailleren van het ondergrond model van de ruime omgeving van de Anna Paulowna bevingen zijn bestaande seismische interpretaties opnieuw bekeken en zo nodig geherinterpreteerd. In dit hoofdstuk worden de relevante observaties en resultaten gepresenteerd.

4.1 Geologische opbouw

De geologische opbouw van de ondergrond kenmerkt zich door een duidelijke gelaagdheid (Figuur 9).



Figuur 9: Doorsnede van de seismische sectie met de geïnterpreteerde breuken langs het put-traject ODS-1 en de door het KNMI gepostuleerde bevingslocaties. Voor de locatie van de lijn (zie Figuur 10 doorsnede 1).

De ondiepe laagpakketten (tot ca 1000 m) behoren tot de lithostratigrafische Noordzee Groep (NS). In dit gebied bestaan deze laagpakketten uit niet gelithificeerde klei en zand sedimenten. Onder de Noordzee Groep liggen de kalk sedimenten van de Chalk groep (CKGR & CK). De Noordzee Groep sedimenten liggen lokaal (hoek)discordant op de Chalk Groep sedimenten. Onder de Chalk Groep liggen de sedimenten van de Rijnland Groep. Dit zijn klei- en zandstenen. De sedimenten van de Rijnland Groep liggen met een zeer duidelijke hoekdiscordantie op oudere sediment pakketten. Deze laatste behoren van jong naar oud tot laagpakketten van: Trias (RB), Zechstein (ZE), Rotliegend (RO) en uiteindelijk Carboon (DC) ouderdom.

Naast de gelaagdheid van de diepe ondergrond is ook duidelijk te zien dat de gelaagdheid verstoord is (Figuur 10). Niet alle laagpakketten liggen horizontaal

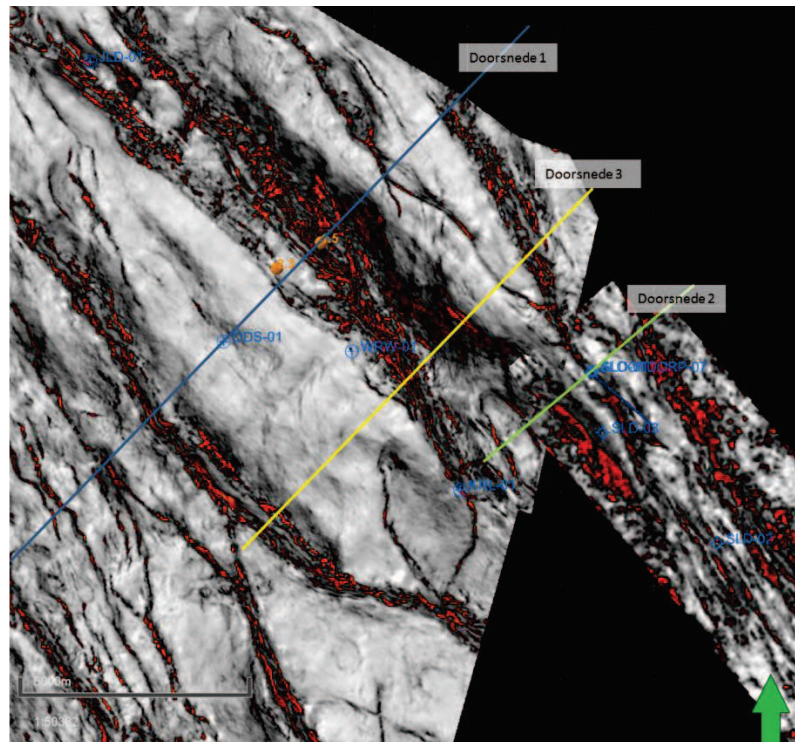
zoals origineel bij en direct na afzetting van de sedimenten het geval is geweest. Vanaf de Chalk Laagpakketten zijn de lagen geplooid en zoals eerder genoemd hebben sommige laagpakketten een (hoek)discordante relatie met het onderliggende pakket.

Ook worden de laagpakketten door breuken doorsneden. In veel gevallen neemt het verzet van de laagpakketten langs de breuken af naarmate de breuk door jongere / ondiepere lagen snijdt.

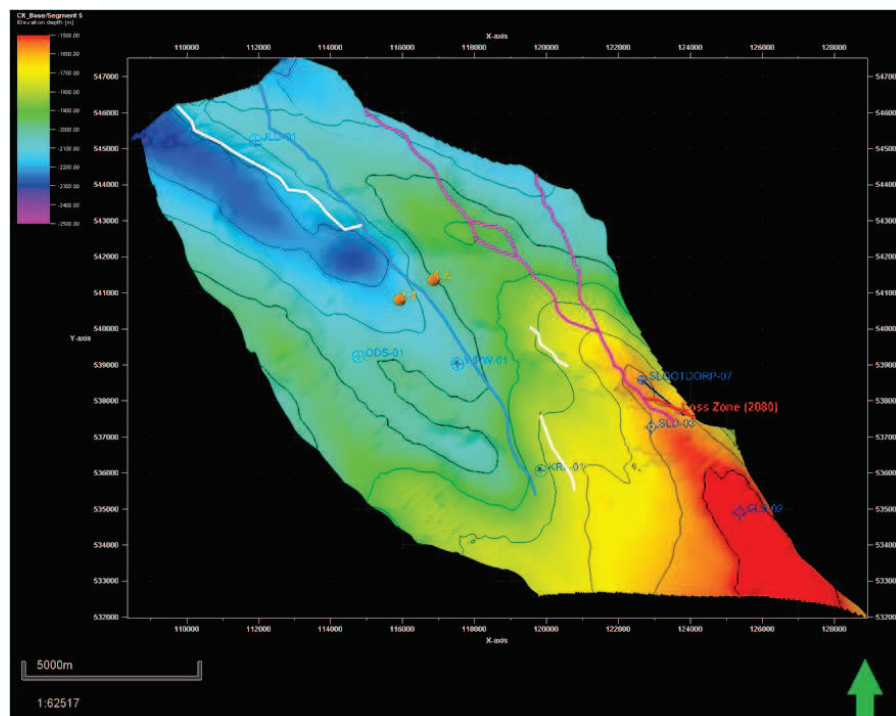
In het kaartbeeld van Figuur 11 is duidelijk te zien dat de plooiing van de Chalk en de Rijnland Groepen een plooias heeft in NW-ZO richting. Dit is dezelfde richting als de hoofdrichting van de breuken zoals te zien is in Figuur 12, de diepte basis Zechstein kaart. Tussen de breuken, die een duidelijk verzet hebben onder de basis van de Rijnland Groep, bevinden zich de zogenaamde “breukblokken”. Deze breukblokken zijn gekanteld waarbij het zuidwestelijke deel van het breukblok het diepste is komen te liggen (Figuur 6). De breuken zijn niet allemaal aan elkaar verbonden maar verspringen in een zogenaamde en-echelon configuratie. Op de kaart gepresenteerd in Figuur 7 is duidelijk te zien dat de aardbevingshaarden, zoals bepaald door KNMI, op een andere breuk liggen, binnen de onzekerheid van de haardbepaling door het KNMI, dan de randbreuken van het horstblok waarin het Slootdorp gasveld zich bevindt.

Het verzet van de randbreuken van het Slootdorp gasveld is in de orde van 170 m op reservoir niveau. Dit is meer dan de reservoirdikte van het Zechstein echter minder dan de gecombineerde dikte van Zechstein en Rotliegend reservoir tezamen. Dit betekent dat de (potentiële) reservoir intervallen (Zechstein Carbonaat en Rotliegend Zandsteen) aan weerszijden van de zuidwestelijke randbreuk van het Slootdorp gasveld tegen elkaar liggen. Dit is weergegeven in Figuur 13 waar de lagen aan weerszijde van de breuk op het breukvlak zijn geprojecteerd.

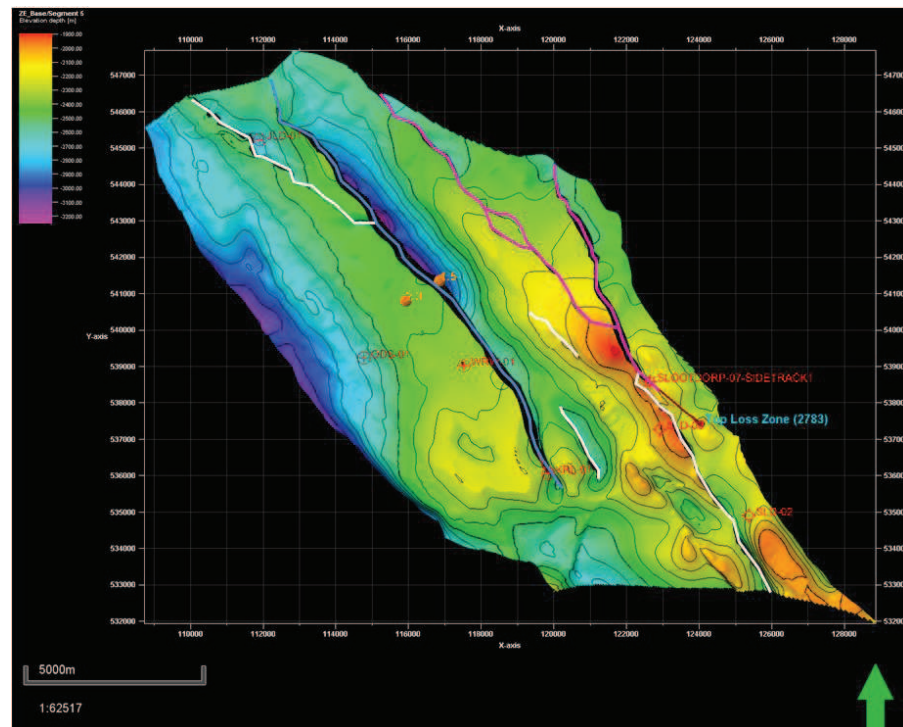
Breuken en breukzones in de diepe ondergrond kunnen “afsluitend / dicht” of “doorlatend / open” zijn. Dicht betekent dat er geen gas of vloeistof doorheen kan stromen. Open betekent dat door de breuk vloeistof of gas kan stromen zowel dwars door de breuk heen als parallel aan de breuk. Het open of dicht zijn van breuken is van veel geologische elementen afhankelijk waaronder de opbouw van de gelaagdheid en de aard van de breukbeweging. Het feit dat alle compartimenten in het Slootdorp gasveld (nagenoeg) dezelfde druk hebben zowel voor start van de productie als in de eindfase van productie, het bestaan van een actieve aquifer en het voorkomen van boorvloeistofverliezen in boorintervallen nabij breukzones doet sterk vermoeden dat de breuk(zones) in deze regio open zijn.



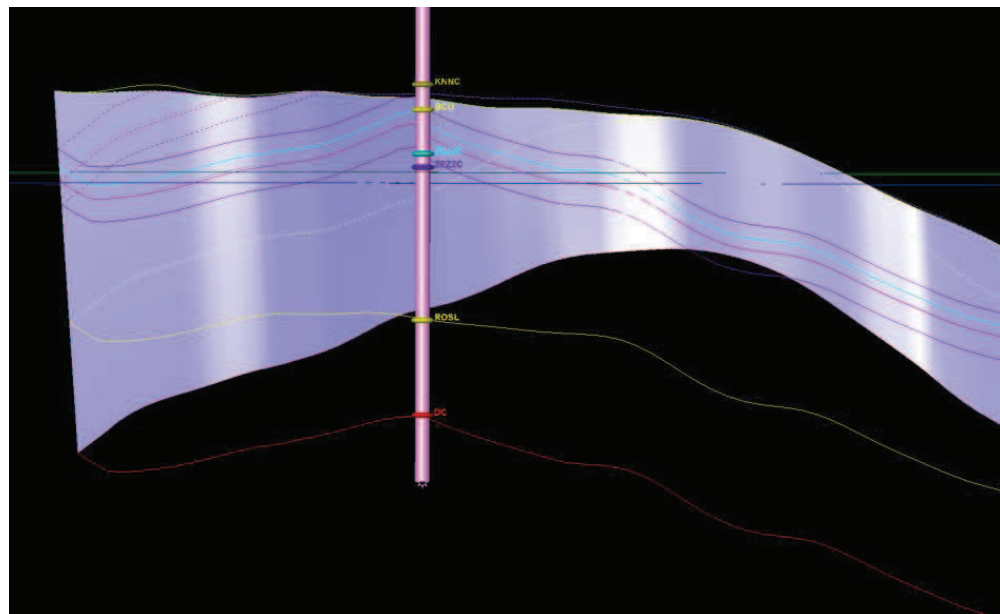
Figuur 10: Basis Zechstein horizon met daarop het Variance signaal geplot. Grijs betekent ongestoorde continue horizon; rood en zwarte kleuren betekend dat de continuïteit van de horizon is verstoord door bijvoorbeeld breuken.



Figuur 11: Basis Chalk kaart in het diepte domein met daarop het breukenmodel van de diepere lagen geprojecteerd.

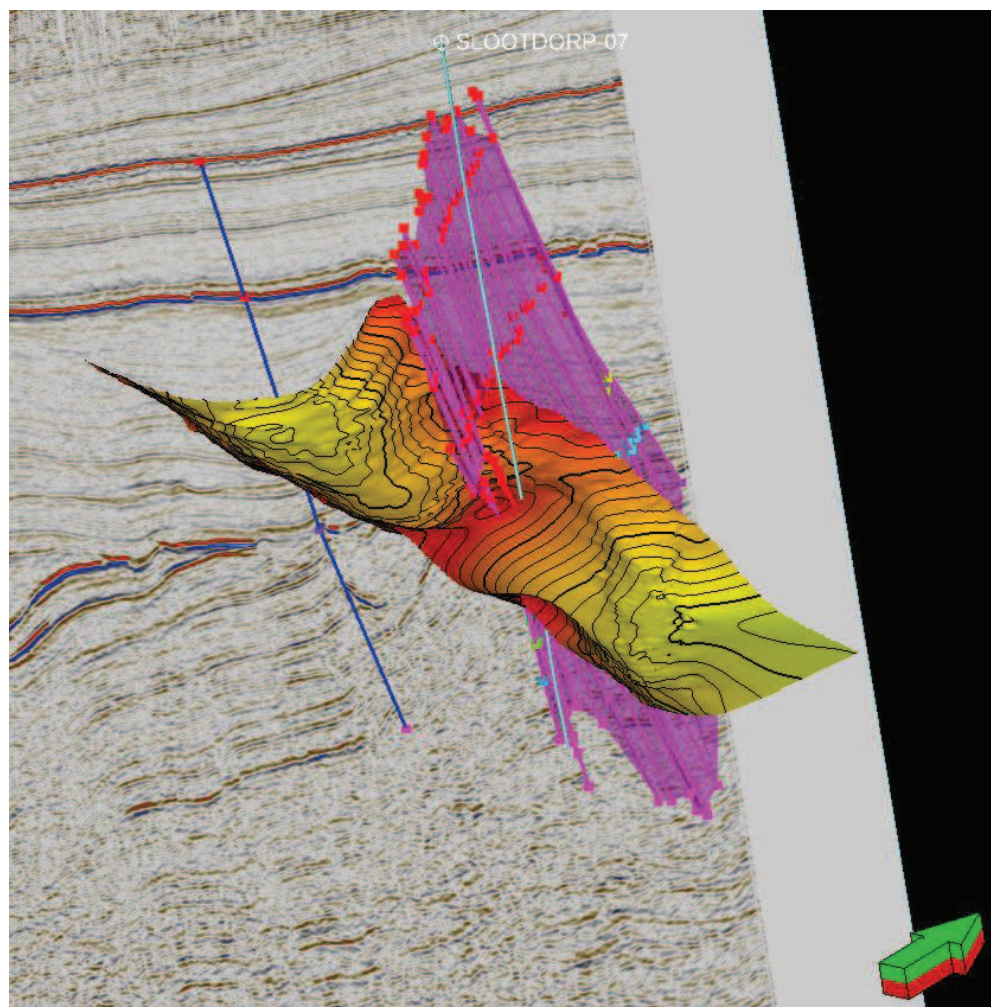


Figuur 12: Basis Zechstein in het diepte domein.



Figuur 13: Allen-diagram van de Breuk-IV uit Figuur 7. In dit figuur is te zien hoe de gesteentepakketten aan weerszijde van de breuk naast elkaar zijn gepositioneerd. De golvende gestippelde lijnen geven de snijlijn van de laagpakketten met de breuk van de gesteenten aan de achterzijde van de breuk weer. De doorgetrokken golvende lijnen de snijlijnen van de gesteentepakketten met de breuk aan de voorzijde. De horizontale lijnen geven de positie van het Gas-Water-contact weer. De onderste het originele contact; de bovenste het huidige. Dikte van het interval tussen de gele lijn ROSL en de rode lijn DC is circa 160 m.

Een opvallend fenomeen in de Chalk Groep is de aanwezigheid van een z.g. “Channel” (NL: geul). In de seismiek, in het ruime gebied rond Anna Paulowna, is deze chalk *channel* te zien. De noordwest-zuidoost georiënteerde *channel* strekt zich uit ten oosten van het Slootdorp gasveld tot ver onder de huidige Noordzee. Het volledige voorkomen van de *channel* is niet te bepalen omdat dat zich tot buiten het studiegebied en de gebruikte 3D seismiek uitstrekt. De basis van de *channel* is gekarteerd en weergegeven in Figuur 14. De *channel* kruist de breuk-I uit Figuur 7 die qua locatie samenvalt met de KNMI locatie van de aardbevingshaarden.

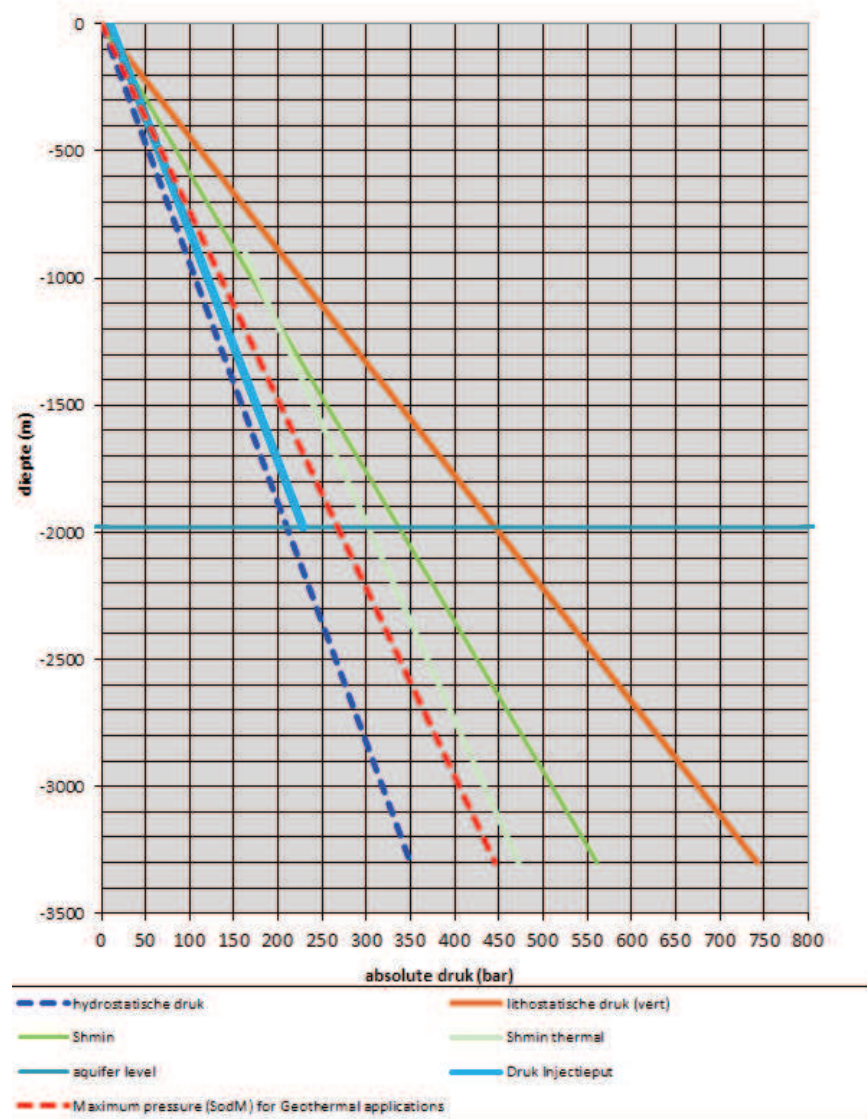


Figuur 14: 3D weergave van de Chalk channel die loopt van het Slootdorp gasveld (zie lichtblauwe lijn die het boortraject van de boring SLD-7 is) naar het noordwesten waar de aardbevingshaardlocaties van KNMI liggen (Figuur 7).

4.2 Natuurlijke spanning in de diepe ondergrond van het studiegebied.

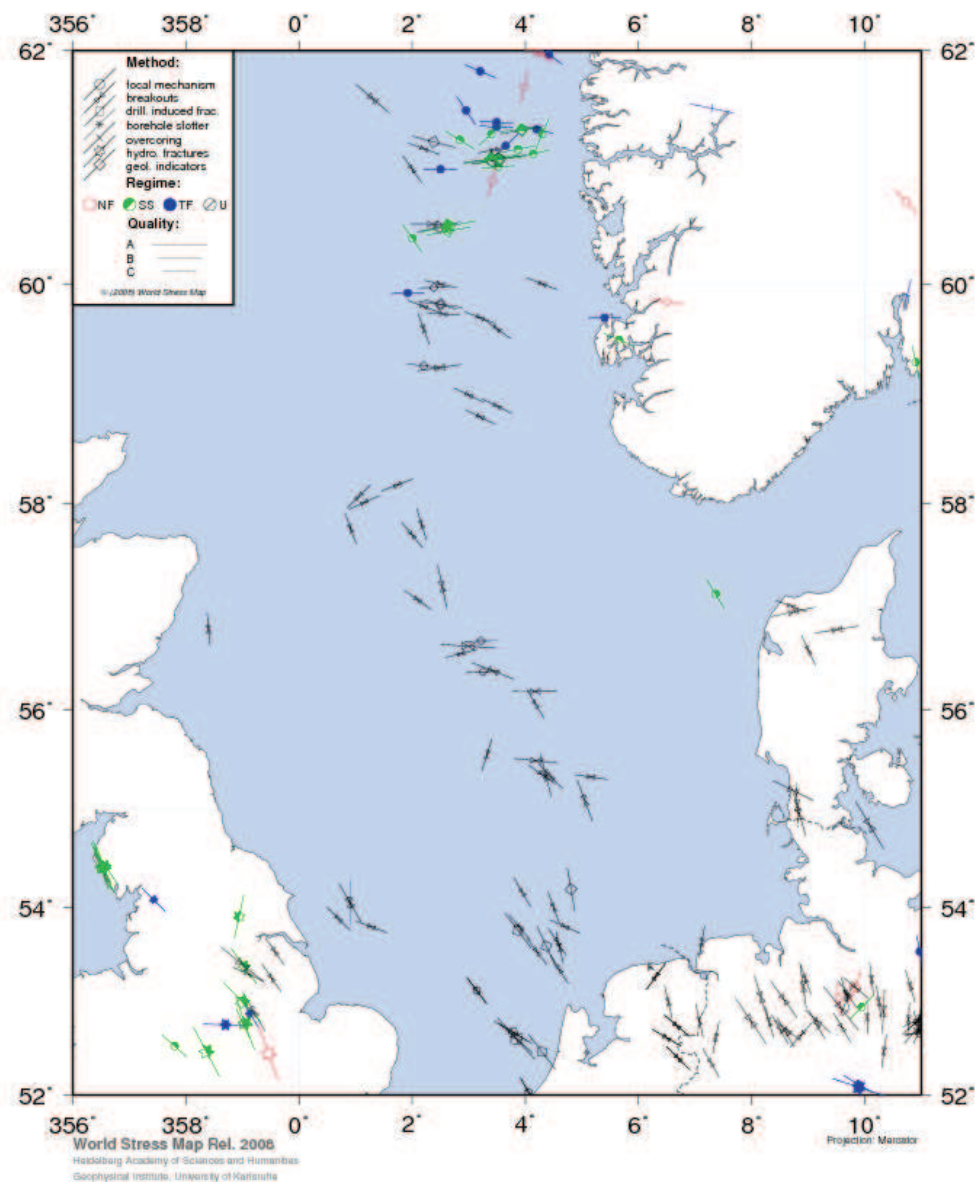
Overall in de aardkorst is in en op het gesteente in de diepe ondergrond spanning aanwezig. Het meest duidelijk is de druk en daarmee spanning die aan diep begraven gesteenten wordt opgelegd ten gevolge van het enorme pakket gesteenten dat er bovenop ligt, de lithostatische druk (of verticale spanning). Voor het reservoir in het Slootdorp gasveld is dat een 2 km hoge gesteente kolom. In Figuur 15 is dat weergegeven als de lithostatische (verticale) druk; dit is vrijwel altijd de maximale druk in Nederland. Naast de lithostatische druk is er ook

hydrostatische druk in de ondergrond. Dat is de druk die op het gesteente en de vloeistof of gas in de porieënruimte van het gesteente op een bepaalde diepte wordt uitgeoefend door de bovenliggende kolom water (zie ook Figuur 15).



Figuur 15: Druk regimes in de ondergrond

Vervolgens zijn er nog twee relevante spanningen in de ondergrond: de minimale ($S_{h\min}$, Figuur 15) en maximale horizontale spanning. Die zijn aanwezig in de aardkorst als gevolg van, onder meer de plaatbewegingen. Als de minimale horizontale spanning wordt overschreden door de gevolgen van een proces, bijvoorbeeld langzame natuurlijke spanningsopbouw of waterinjectie in een breukzone, kan een aardbeving ontstaan. Volgens de “World stress map” (Figuur 16) is in Noord-Holland de minimale horizontale spanning NO-ZW gericht en de maximale horizontale spanning NW-ZO. De hoofdbreuken in Noord-Holland lopen parallel aan de maximale regionale spanningsrichting.



Figuur 16: World stress map (bron: <http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/pub/maps/northsea.gif>)

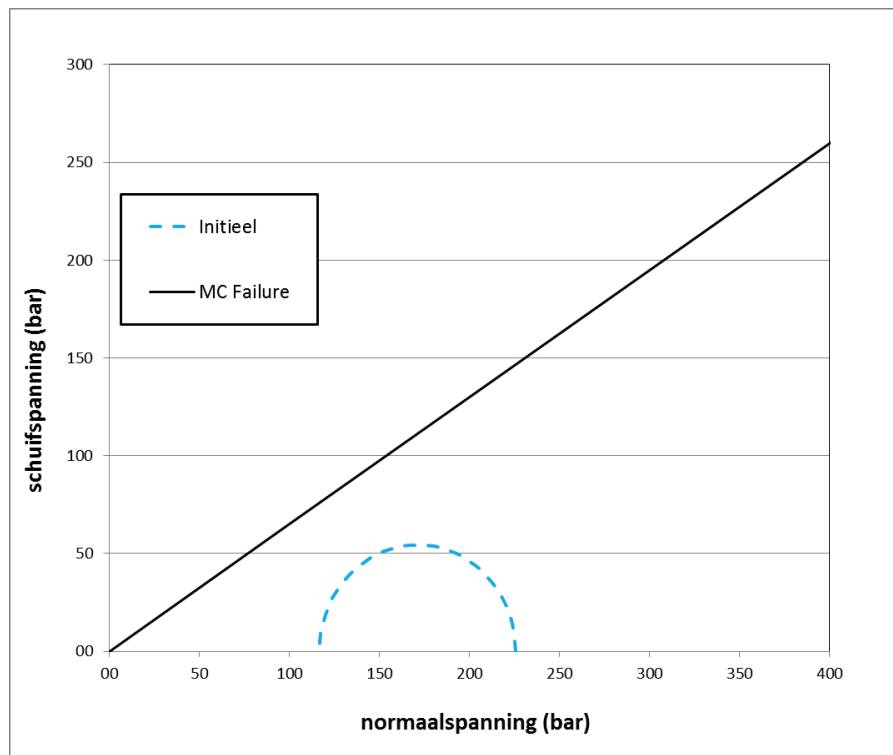
In en rond het Slootdorp gasveld zijn breuken. Deze kunnen beschouwd worden als zwakke zones in de aardkorst die gereactiveerd kunnen worden. De breuken kunnen alleen gereactiveerd worden als zij zich in een kritische spanningstoestand bevinden. Hoe de spanningstoestand van een breuk is kan weergegeven worden in een Mohr-Coulomb (MC) grafiek (Figuur 17). In een normaal spanningsregime (zoals in Nederland het geval is) wordt op de x-as de effectieve minimale horizontale spanning en de verticale spanning aangegeven. Op basis van die twee punten wordt een halve cirkel geconstrueerd die de spanningstoestand van breuken met verschillende oriëntaties representeert in het spanningsveld. De blauwe gestreepte cirkel in Figuur 17 geeft de spanningstoestand weer in de ondergrond op de locatie van het Slootdorp gasveld voordat er gas geproduceerd werd: het rechter snijpunt met de x-as bij 226,5 bar geeft de verticale spanning weer en het linker snijpunt met de x-as de effectieve minimale horizontale spanning.

De grootte van de cirkel is afhankelijk van het verschil tussen de minimale horizontale spanning en verticale spanning. Een verandering van dit verschil kan onder meer veroorzaakt worden door injectie van water. Hoe groter dat verschil hoe groter de cirkel.

De zwarte lijn, MC-failure, in de MC-grafiek (Figuur 17) geeft de drempel waarde van niet kritisch naar kritisch gespannen breuken. De sterkte van de breuk wordt gegeven door de “hoek van inwendige wrijving”. Dit uit zich in de helling van de zwarte lijn van de MC-failure. Als de aard van de porievulling in de breuk (vloeistof of gas) verandert dan kan de sterkte van de breuk wijzigen. Als in een gas gevulde breuk het gas verdrongen wordt door water is de verwachting dat de breuk zwakker wordt en dus de MC-failure lijn vlakker gaat lopen (kleinere hoek van interne wrijving).

Als de cirkel onder de MC-failure lijn valt dan wordt gesteld dat de breuk **niet kritisch** gespannen is. Als de cirkel de MC-failure lijn raakt of overschrijdt is de breuk kritisch gespannen. De oriëntatie van de kritisch gespannen breuk wordt gegeven door het snijpunt van de cirkel met de MC-failure lijn. Dat wil niet zeggen dat er dan meteen een aardbeving optreedt maar wel dat dit kan gebeuren. Door enerzijds het wijzigen van de hellingshoek van de zwarte MC-failure lijn door vermindering van de breuksterkte of anderzijds verandering van de spanningstoestand in de breuk kan een breuk kritisch gespannen worden.

Berekening op basis van algemene waarden van de sterkte van breuken en geomechanische parameters geven aan dat de breuken rond de put SLD-1 niet kritische gespannen waren bij aanvang van de productie in 1977 (Figuur 17).



Figuur 17: Mohr-Coulomb grafiek van de initiële natuurlijke spanning op breuken in de ondergrond bij de SLD-1 put voordat het reservoir in druk was gedepleteerd

4.2.1 Onzekerheid van de *in-situ* spanning

De horizontale en verticale spanningen zijn bepaald met algemeen geaccepteerde gradiënten. Echter kunnen de exacte waarden van de spanningen van locatie tot locatie verschillen. Om de waarden te achterhalen zijn metingen nodig van de *in-situ* spanning zoals bijvoorbeeld leak-off tests. Bij gebrek aan gemeten spanningen worden de algemene waarden aangenomen. De Mohr cirkels zijn hierdoor minder exact. De relatieve beweging van de Mohr cirkel gedurende depletie/injectie, naar de faallijn toe of ervan af, is belangrijker dan de exacte afstand tot de faallijn.

In Nederland geldt, volgens de world stress map, een normaal spanningsregime. Dit betekent dat de verticale spanning de grootste spanning is en de minimale horizontale spanning de laagste spanning. De maximale horizontale spanning zit tussen de minimale horizontale spanning en de verticale spanning in. Uit sommige bevingen (bijvoorbeeld de Bergermeer bevingen) zijn haardmechanismes bepaald. Hieruit bleek, in Bergermeer, dat de beving een normale beweging had met een component van strike-slip. Hiervoor geldt dat de verticale spanning het grootste was en dat de maximale horizontale spanning lager was, maar wellicht niet veel lager dan de verticale spanning. Haardmechanismes van de Anna Paulowna bevingen kunnen niet bepaald worden door het gebrek aan registratie op verschillende seismische stations rondom de bevingen. We weten dus niet exact het mechanisme van de beving maar een normale beweging (met wellicht een component strike-slip) is het meest waarschijnlijk.

5 Natuurlijke seismiciteit

Bij de regionale kartering van de diepe ondergrond van Nederland zijn veel grote breuken gekarteerd. Een aantal van deze breuken zijn nog van nature actief zoals bijvoorbeeld de Peel randbreuk⁶. In Figuur 18 is een aantal natuurlijke bevingen in kaart gebracht. De meest noordelijke beving, die als natuurlijke beving is aangemerkt door het KNMI, is die van 1997 bij Beverwijk. De locatie van de bijbehorende bevingshaard is op of nabij een grote NW-ZO lopende breuk. Het is niet uit te sluiten dat de grote breuken in de regio Anna Paulowna ook, tot op zekere hoogte, actief zijn. Wellicht minder actief dan die in zuidoost Nederland want die zijn actief op de tijdschaal van het menselijke “geheugen”, maar op tijdschalen van miljoenen jaren. Seismisch karteerbare breuken zijn waarneembaar tot een tijddiepte van 700 ms (Figuur 19). Dit komt overeen met de lagen van de Boven Noordzee Groep. Deze lagen zijn gevormd vanaf 23 miljoen jaar geleden.

Een momenteel gangbare aanname is dat de breuken in dit deel van Nederland (evenals in de noordelijke provincies Groningen en Friesland, (van Wees et al. 2014)) nu niet kritisch gespannen zijn en langs die breuken geen aardbevingen kunnen ontstaan door een natuurlijk mechanisme. De argumentatie hiervoor is dat er lange tijd (in de historisch bekende tijd) geen bevingen zijn geweest en dat er pas bevingen worden geïnduceerd als er significante depletie van een reservoir is gerealiseerd door gasproductie. De drukdepletie en dientengevolge reservoircompactie zorgen voor lokaal kritisch gespannen breuksegmenten die seismiciteit kunnen veroorzaken als ze getriggerd worden.

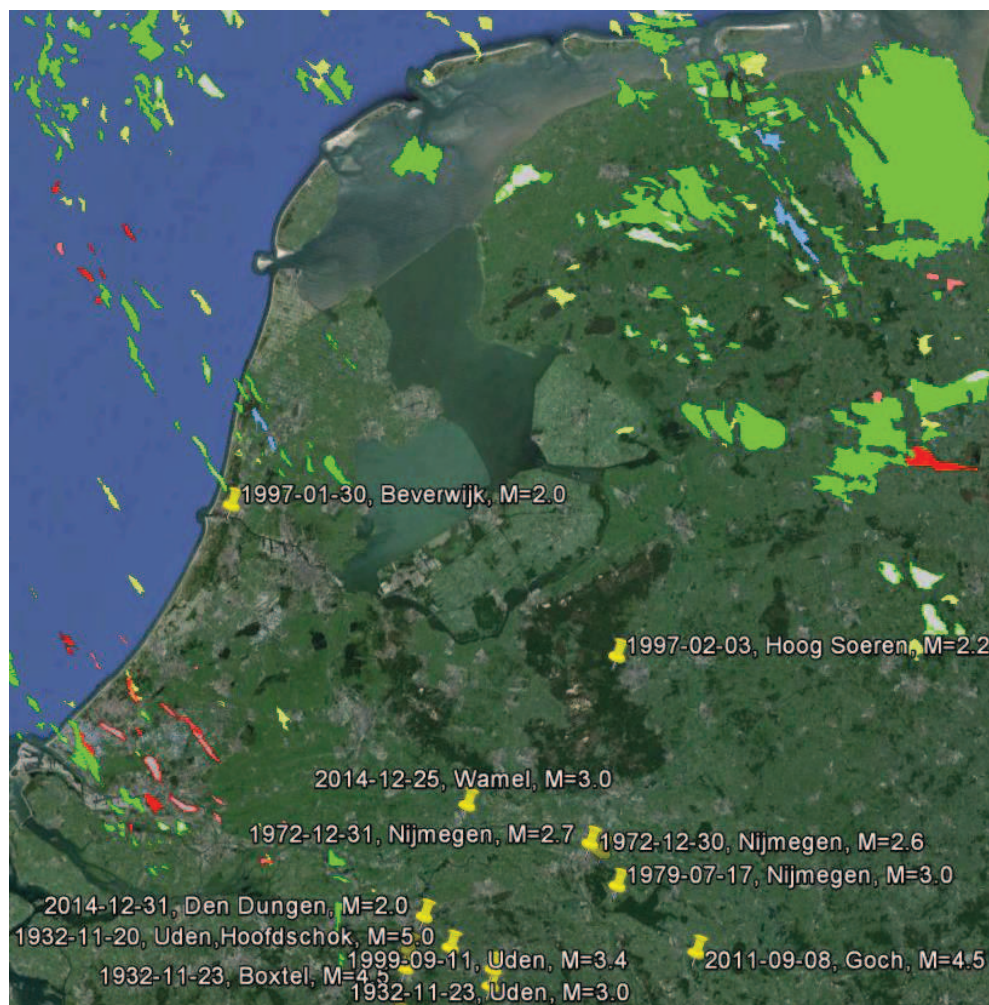
Derhalve kan geconcludeerd worden dat enkel natuurlijke seismiciteit als

- trigger voor aardbeving in Slootdorp gasveld mogelijk tot onwaarschijnlijk is

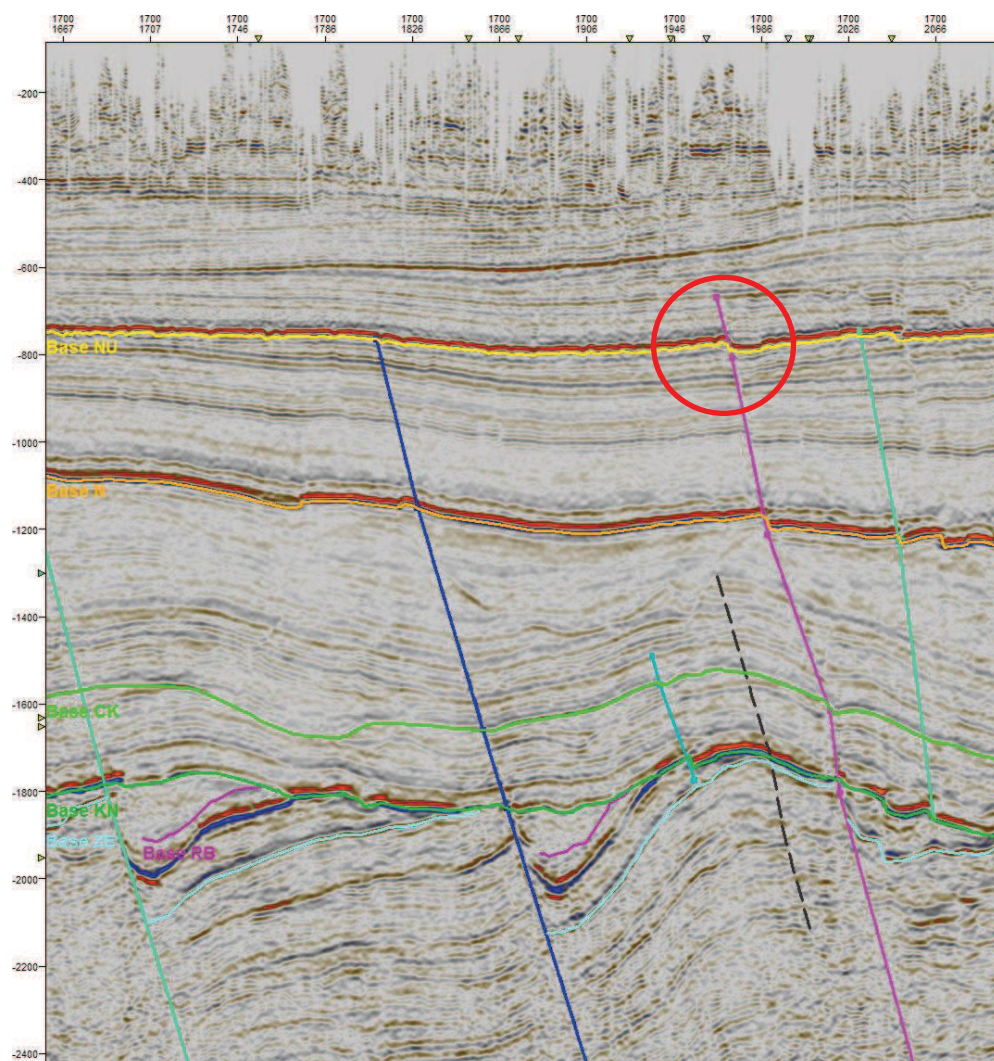
En als

- trigger voor aardbeving op KNMI locatie nabij Anna Paulowna mogelijk tot onwaarschijnlijk is.

⁶ (http://nlog.nl/resources/NCP-1/depth%20maps/pdf/Zechstein_depth_version1-12-06.pdf).



Figuur 18: Tektonische (natuurlijke) aardbevingen in Nederland. (Bron: KNMI).



Figuur 19: NE-ZW georiënteerde seismische sectie over het Sloodorp gasveld. Er is een duidelijk verzet te zien op basis NU (gele lijn in de rode cirkel) wat betekent dat die breuk na afzetting van die laag nog actief is geweest. Basis Upper North Sea (Base NU) is gedateerd op circa 22 mln jaar geleden. Voor de locatie van de sectie zie Figuur 10, doorsnede 3.

6 Mijnbouw activiteiten in het Slootdorp gasveld

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op het nabij liggende Slootdorp gasveld, de activiteiten in dit gasveld en de actieve aquifer behorende bij dit gasveld. Per hypothese wordt in beeld gebracht of het veronderstelde mechanisme als enige (dus niet in samenhang met de andere voorgestelde mechanismes) de aardbevingen op de locatie van KNMI nabij Anna Paulowna dan wel op een locatie in het Slootdorp veld kan hebben veroorzaakt.

6.1 Reservoir drukdepletie

Het Slootdorp gasveld wordt sinds 1977 geproduceerd. Er is inmiddels circa 1034 mln Nm³ aan gas geproduceerd (Vermilion jaarrapportage 2015). De expansiefactor voor dit gasveld is op circa 204 gesteld. Het geproduceerde gasvolume onder reservoircondities bedraagt dus circa 5 mln m³. Uit drukmetingen blijkt dat de reservoirdruk niet significant is gedaald. Bij aanvang van de productie was de reservoirdruk circa 219 bar. Momenteel bedraagt de reservoir druk circa 200 bar (Tabel 1 en Figuur 2).

Kans van optreden van aardbevingen ten gevolge van drukdepletie in het reservoir ten gevolge van gaswinning is adequaat behandeld conform de DHAIS methodiek (TNO 2004, TNO 2012 en TNO 2016). De conclusie uit deze studies is dat het Slootdorp gasveld een verwaarloosbare kans heeft op seismiteit ten gevolge van de beperkte drukdaling in het reservoir (zie ook paragraaf 6.1.2).

6.1.1 Bodemdaling

Onttrekking van gas uit de diepe ondergrond heeft tot gevolg dat drukdaling in het reservoir en, in het geval van een actieve aquifer, de aanpalende/onderliggende aquifer optreedt. Deze drukdaling veroorzaakt samendrukking van het reservoirgesteente (compactie). Door de samendrukking op reservoirniveau vindt bodemdaling plaats aan het maaiveld. Operators zijn verplicht bodemdaling ten gevolge van de gaswinning te monitoren. Hiertoe worden periodiek geodetische metingen verricht op vaste punten (peilmerken) die de daling door de gaswinning ten opzichte van referentiepunten bepaald. Rapportage van deze monitoring gebeurt naar SodM (art.123 van de mijnbouwwet).

In het winningsplan, aangeleverd in 2003, wordt gesteld dat de bodemdaling minder dan 1 cm zal bedragen. In het winningsplan d.d. 28-03-2012 wordt gesteld dat de maximale bodemdaling bij het eind van de productie activiteiten minder dan 2 cm zal zijn. Daarnaast wordt gesteld dat deze zeer geringe bodemdaling kleiner is dan de nauwkeurigheid van de ter beschikking staande meettechnieken. De technische commissie bodembeweging (TCBB) heeft op 15 april 2004 een positief instemmingsadvies gegeven voor het winningsplan Slootdorp 2012.

6.1.2 Bodemtrillingen

Het winningsplan 2003 classificeert het Slootdorp gasveld in klasse C "Ander velden waar geen trillingen zijn geregistreerd". "De seismische monitoring wordt uitgevoerd door KNMI met behulp van een daartoe aangelegd netwerk van

seismische registratie apparatuur" (WIPLA Slootdorp 2003). Er wordt gesteld dat er in de afgelopen 26 jaar van productie (statusdatum rapportage 2003) geen bevingen zijn geregistreerd.

De technische commissie bodembeweging (TCBB) heeft op 15 april 2004 een positief instemmingsadvies gegeven voor het winningsplan Slootdorp. Uit de deterministische hazard-analyse (TNO 2004 en TNO 2012) blijkt dat de conclusie van Vermillion onderschreven wordt dat het Slootdorp een verwaarloosbare kans op beven heeft.

Er zijn drie parameters geïdentificeerd die belangrijk zijn in de evaluatie van de kans voor het optreden van bodemtrillingen bij de productie / extractie van gas uit een reservoir (TNO 2012). Deze zijn:

- 1) Drukval in het reservoir, gegeven als absolute depletie gedeeld door de initiële druk (beide in bar), dP/P_{ini} . De grenswaarde van deze parameter $((dP/P_{ini})_{grens})$ is $0,28 \pm 0,034$,
- 2) Verhouding tussen Young's modulus (E) van het reservoir en de direct bovenliggende lagen. De grenswaarde van deze parameter (E_{grens}) is $1,01 \pm 0,08$ en
- 3) De breuk dichtheid (B) in het veld. Kritische grens: $B_{grens} = 0,86 \pm 0,29$.

Als de factor dP/P_{ini} beneden de grenswaarde blijft, geeft de ervaring met de gaswinning in Nederland aan dat er geen bevingen zullen ontstaan door drukdepletie ten gevolge van de gaswinning. Indien de drempelwaarde voor de drukdepletie is overschreden dan kan de kans op bevingen nader bepaald worden als de E en / of de B parameter hun grenswaarden overschrijden.

Voor het Slootdorp gasveld zijn deze waarden:

- 1) $dP/P_{ini} = (219.8 - 199.7) / 219.8 = 0.09^*$
- 2) $E_{overburden} / E_{reservoir} = 52.2/30.7 = 1,7^{**}$
- 3) $B = \frac{breukoppervlakte^{3/2}}{Brutogesteentevolume} = \frac{l_b^{3/2} \cdot h^{3/2}}{A \cdot h} = \frac{l_b^{3/2} \cdot \sqrt{h}}{A} = 1,836^{**}$

*"huidige situatie

** TNO 2012"

h = maximale hoogte gaskolom (m), l_b = totale breuklengte (m) van de intra reservoir breuken en de randbreuken, A = oppervlakte van het veld (m^2)

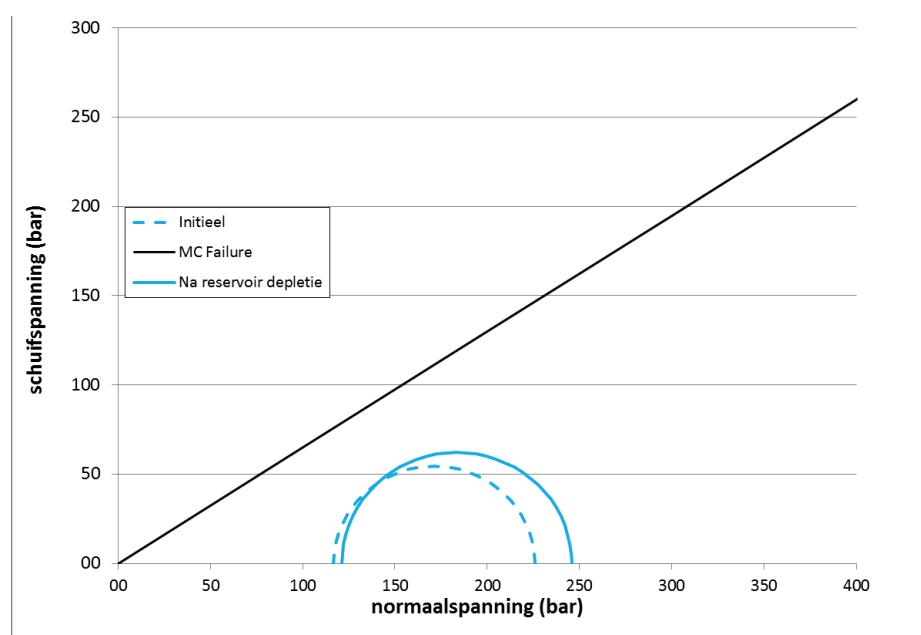
De dP/P_{ini} valt ruim onder de grenswaarde. Derhalve kan de conclusie worden getrokken dat het voorkomen van bevingen direct ten gevolge van drukdepletie door gasproductie onwaarschijnlijk is op basis van de huidige inzichten.

Bodemdaling vanwege compactie van het reservoir door deze relatief geringe drukdaling is zoals gesteld in Hoofdstukken 2.1 & 6.1 zeer gering. Beïnvloeding van de spanning in de overliggende lagen ten gevolge van de reservoircompactie wordt derhalve ingeschat als nihil.

In de recent vrijgegeven studie van TNO (Seismiciteit onshore gasvelden Nederland. TNO 2016 R10164, 21 juni 2016) wordt het Slootdorp gasveld wederom geclassificeerd als veld met *verwaarloosbaar seismisch risico ten gevolge van drukdepletie in het reservoir door de winning van gas* (TNO 2016 R10164 Bijlage B blz 4). Uit dit rapport en eerdere rapportages is te concluderen dat de

geotechnische situatie van het Slootdorp gasveld essentieel anders is dan gasvelden waar de drukdepletie in het reservoir wel de grenswaarde overschrijdt en aardbevingen kunnen ontstaan ten gevolge van reservoircompactie zoals bijvoorbeeld het Groningen gasveld.

Uit de grafiek van Figuur 20 is af te leiden dat door de drukdepletie de blauw gestreepte cirkel naar rechts is verplaatst en groter is geworden. Echter de afstand van de nieuwe Mohr-cirkel tot de MC-Failure lijn is niet gewijzigd. Dit betekent dat de Mohr cirkel stabiel is gebleven of niet significant onstabiel is geworden. Er is dus geen reden om aan te nemen dat breuken in het veld gereactiveerd kunnen worden ten gevolge van de drukdaling door gaswinning.



Figuur 20: Mohr-Colomb grafiek van de spanningssituatie bij drukdepletie van 20 bar in het ZE2C reservoir.

Derhalve kan geconcludeerd worden dat enkel reservoir depletie als

- trigger voor aardbeving in Slootdorp gasveld zeer onwaarschijnlijk is en als
- trigger voor aardbeving op KNMI locatie ook zeer onwaarschijnlijk is en als
- trigger voor aardbeving in de bovenliggende lagen ook zeer onwaarschijnlijk is.

6.2 Aquifer drukdepletie

Uit de geringe drukdaling is te concluderen dat het Slootdorp gasveld een actieve aquifer heeft. Water uit de ruime omgeving van het veld neemt de plaats in van het weggeproduceerde gas. Dit uit zich in het omhoogkomen van het Gas-Water contact (zie Hoofdstuk 2)

Op basis van een evaluatie van het bruto gesteente volume dat door water is ingenomen (gas water contact verhoging van 18 m) en een porositeit (Tabel 1) is berekend dat ongeveer 3,6 mln m³ water de plaats van gas heeft ingenomen. Water kan niet of maar beperkt uitzetten. Als aangenomen wordt dat water niet uitzet en de druk in de aquifer in evenwicht is met de huidige druk in het veld dan is een gebied van circa 1 km rond het veld met een gelijke druk depletie nodig om de druk daling van slechts 20 bar in het Slootdorp gasveld te verklaren. De MC-diagram van Figuur 20 geldt ook voor deze situatie. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de drukdepletie in de aquifer breuken in kritische toestand zou brengen.

In de loop van de productieperiode van het Slootdorp gasveld is het Gas Water Contact (GWC) omhoog gekomen. Het initiële GWC lag op 2004 m, momenteel ligt het GWC op 1986m. Het is mogelijk dat door de stijging van het GWC de breuk is “verzwakt” en dat er makkelijker beweging geïnduceerd kan worden. Dit uit zich in een lagere hoek van interne wrijving van de breuk. Als deze hoek ten gevolge van de verwatering van een deel van de breuk circa 17 graden is geworden dan zou de breuk kritisch gespannen kunnen zijn. Op basis van breukvlak reconstructie (Figuur 13) en literatuur studie is te concluderen dat het onwaarschijnlijk is dat de interne hoek van wrijving voor deze breuk lager is dan 30 graden.

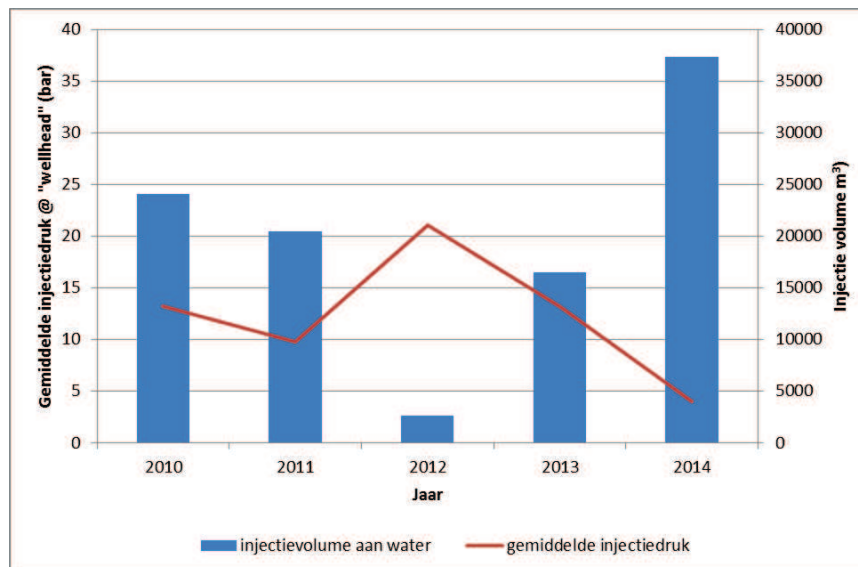
Derhalve kan geconcludeerd worden dat enkel aquiferdepletie als

- trigger voor aardbeving in Slootdorp gasveld zeer onwaarschijnlijk is en als
- trigger voor aardbeving op KNMI locatie ook zeer onwaarschijnlijk is.

6.3 Injectie van productiewater

In de put SLD-1 wordt het water dat meekomt bij de productie van gas uit het Slootdorp gasveld (momenteel enkel SLD-4 productieput) weer teruggeïnjecteerd in het reservoir. De cumulatieve hoeveelheid geïnjecteerd water bedraagt 125.139 m³ (status datum 31-12-2014). De temperatuur van het geïnjecteerd water is variabel; in 2010 lag dat tussen de 10 °C en 50 °C. Figuur 21 geeft hoeveel productiewater er per jaar wordt geïnjecteerd bij welke gemiddelde jaarlijkse injectiedruk ⁷.

⁷ Bron: Slootdorp_1_Jaarrapportage_Waterinjectie uit de verschillende jaren



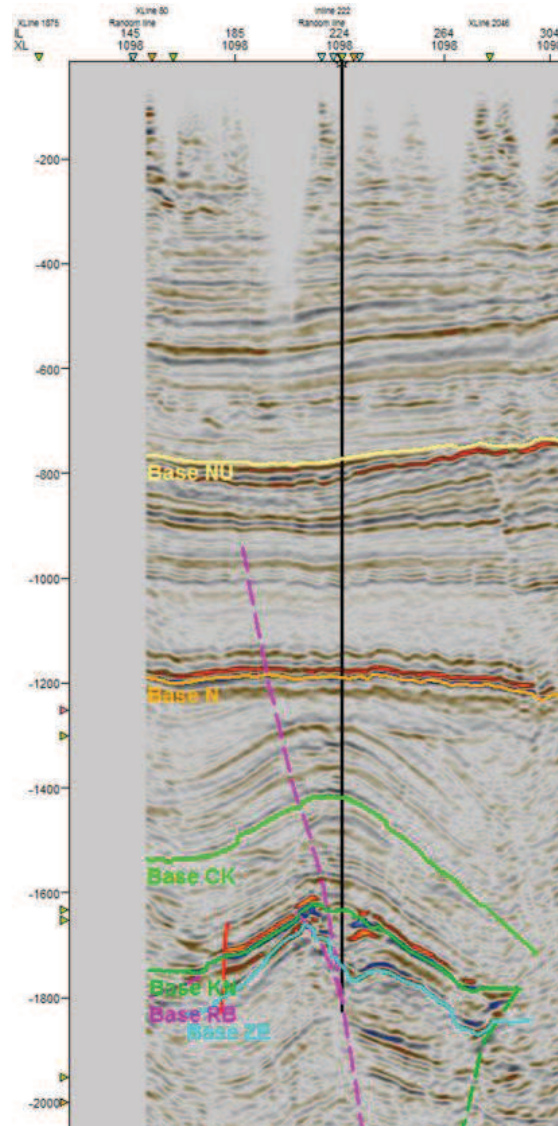
Figuur 21: Grafiek volume injectie water en injectiedruk.

Het puttraject van de SLD-1 put ten opzichte van de geologie in de diepe ondergrond is gevisualiseerd in Figuur 22. De put doorsnijdt een NW-ZO- lopende breuk nabij basis Zechstein - top Rotliegend (paarse gestreepte lijn) (licht blauwe lijn met annotatie “base ZE”). De breuk is één breuk uit het breuksysteem dat ook door de put SLD-7 is aangeboord. Figuur 24 is een uitvergroting van Figuur 22 op de locatie van het injectie-interval. Hier wordt duidelijk dat het Slootdorp gasveld zich in een complex verbreukte structuur bevindt. Eenduidige interpretatie van breuklocaties is niet mogelijk. Er is veel speelruimte om een breuklijn interpretatie te positioneren. Daarnaast zijn er veel breuken die de gesteentelagen doorsnijden. Dit geeft aan dat enerzijds er onzekerheid is over de positionering van de breuk dan wel dat het een vrij brede breukzone betreft. Figuur 25 geeft de interpretatie van de seismische lijn waarop de put SLD-1 ligt alsmede de lijnen ten noordwesten en zuidoosten daarvan om ook de laterale variabiliteit van de breuken inzichtelijk te maken. Voor de positionering is ook de variance sectie gebruikt.

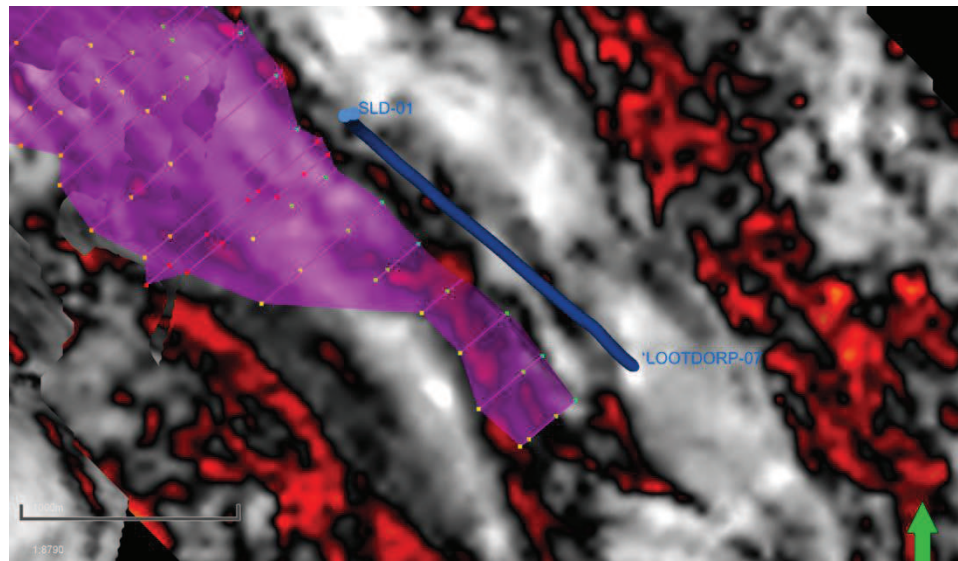
Figuur 23 geeft de variance map van de basis van het Zechstein pakket weer. De put SLD-1 ligt in of nabij de zone met rode kleurindicatie wat aangeeft dat de gelaagdheid (het seismische signaal) verstoord is. Dit is waarschijnlijk door verplaatsing langs een breuk. Figuur 26 geeft een 3D seismische weergave van het de ondergrond weer rond de SLD-1 en SLD-7 puttrajecten. waarin te zien is dat beide putten in of nabij hetzelfde breuksysteem zijn gezet.

Notities op de “composite well log” geven aan dat de Zechstein 3 Carbonaten sterk verbreukt zijn. Het interval van de Zechstein Carbonaten is het reservoir waar het water wordt geïnjecteerd. De Zechstein Formatie in de put SLD-1 is gekernd. Op de “wellsite core log” wordt het interval 1991,8-1993,8 / 1995,7m gekarakteriseerd als een breccie. Uit evaluatie van detail kernbeschrijvingen uitgevoerd door Total en eigen inspectie van de kernen kan geconcludeerd worden dat de breccie een zogenaamde “collapse breccia” is die niet aan de breukwerking is gerelateerd. Er is wel indicatie dat er een enkel klein breukje op reservoirniveau in het gesteente is. Deze breuk is echter gecementeerd met anhydriet. Het onderste deel van de kern nabij de basis van het Zechstein interval is “rubble”. Dat betekent dat het gesteente

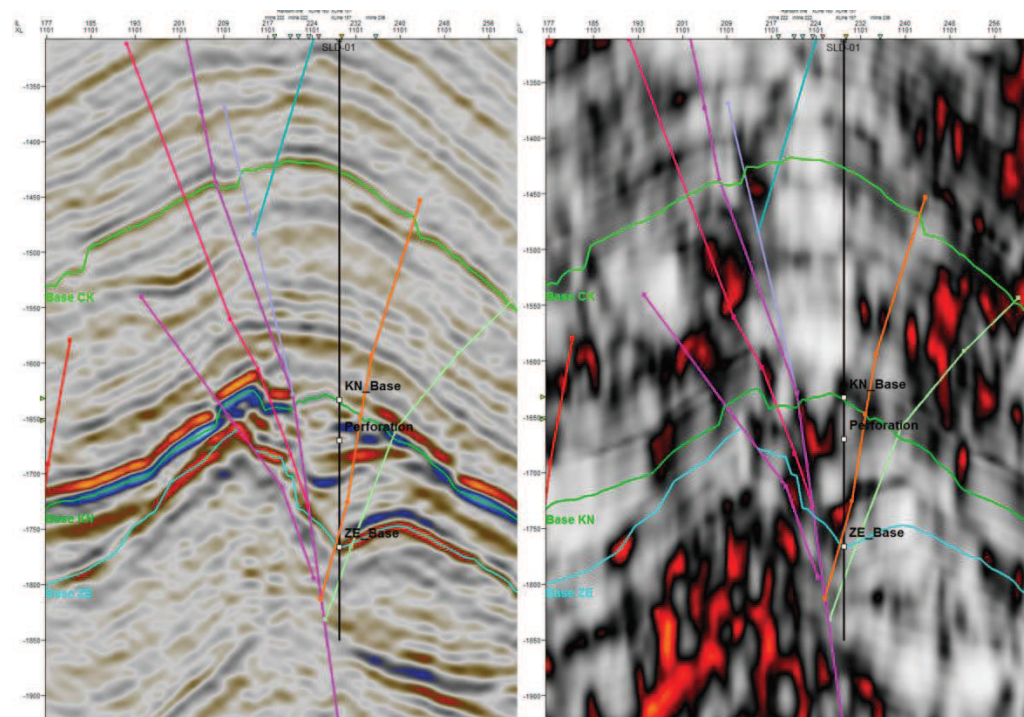
in brokken uiteen gevallen is. In een aantal van die brokstukken zijn typische breukvlakstructuren te zien met glijspiegels. Op basis hiervan zou geconcludeerd worden dat de put een breukvlak doorboort aan de basis van het Zechstein. Dit correspondeert met de interpretatie van de seismiek (Figuur 24). De helling van de breuken is in de orde van 60 tot 70 graden; de dikte van basis Zechstein tot reservoir niveau is circa 200 meter wat resulteert dat de breuk op een afstand van 70 tot 115 meter van de injectie locatie is verwijderd. Seismische interpretatie geeft aan dat dit een reëel scenario is.



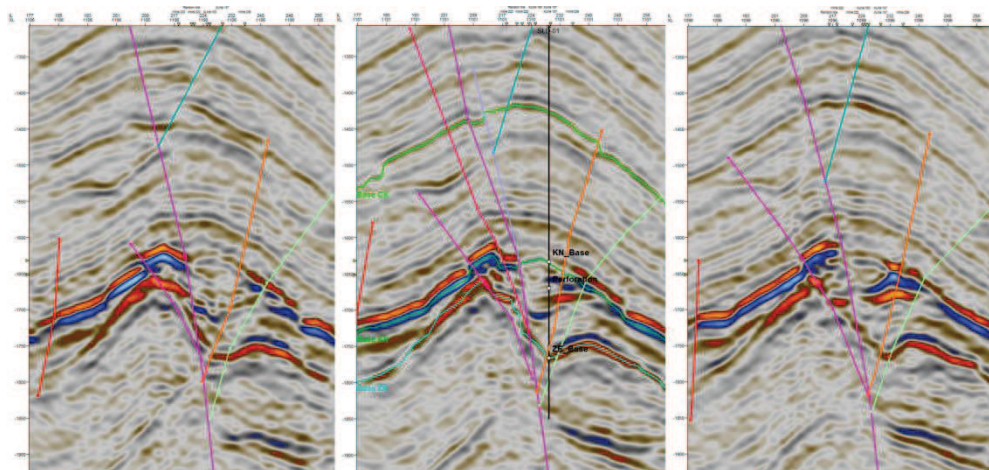
Figuur 22: Ondergrondse locatie van de doorsnijding van de Sloodorp-1 put met top reservoir. (voor positie sectie zie Figuur 10, doorsnede 2).



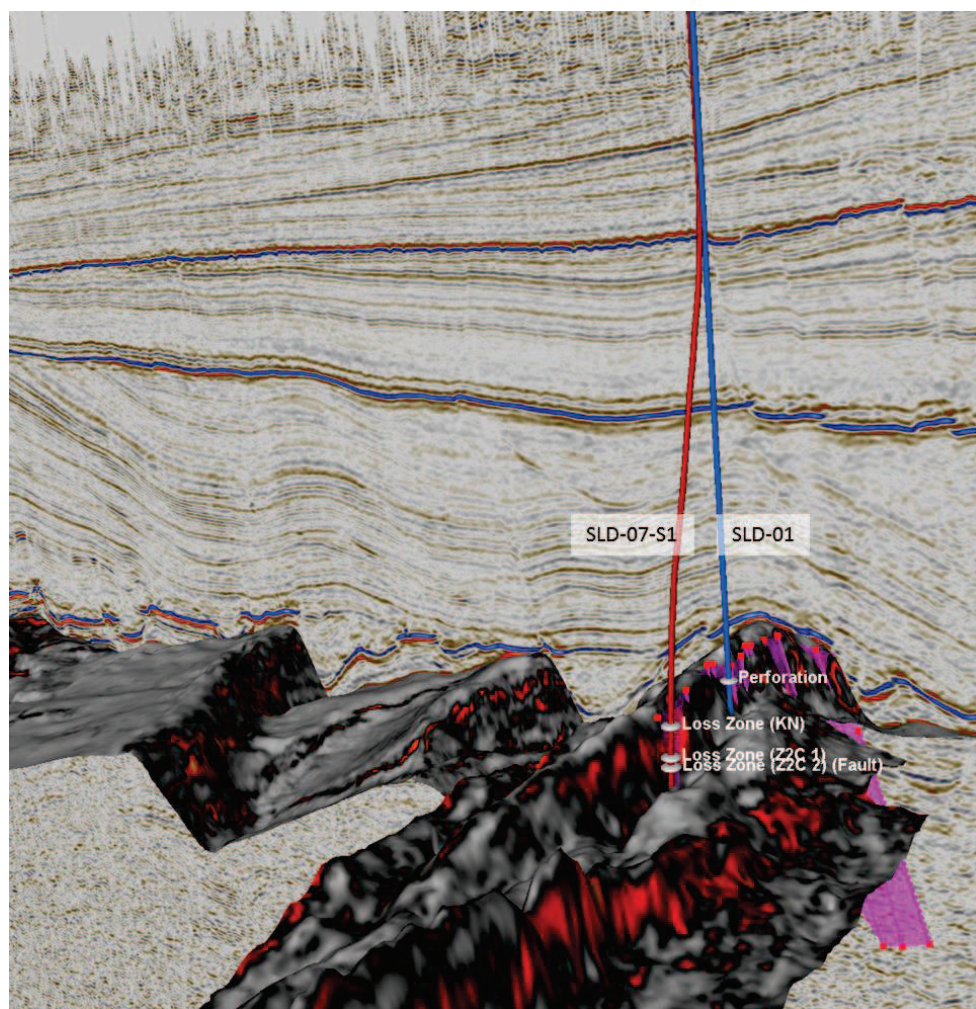
Figuur 23: Variance kaart van basis Zechstein van het gebied rond de putten SLD-1 en SLD-7. Rode kleuren geven de locaties aan waas het seismische signaal niet continue is. Mogelijk veroorzaakt door verbreuking.



Figuur 24: Links- Zoom in van Figuur 22. Rechts- variance display van hetzelfde stuk seismiek als a). merk de rode vlek op op de positie van de perforaties in de put SLD-1.



Figuur 25: Seismische secties in de omgeving van SLD-1 ter illustratie van de complexe breukstructuur en de laterale variabiliteit. De middelste is dezelfde sectie als Figuur 24

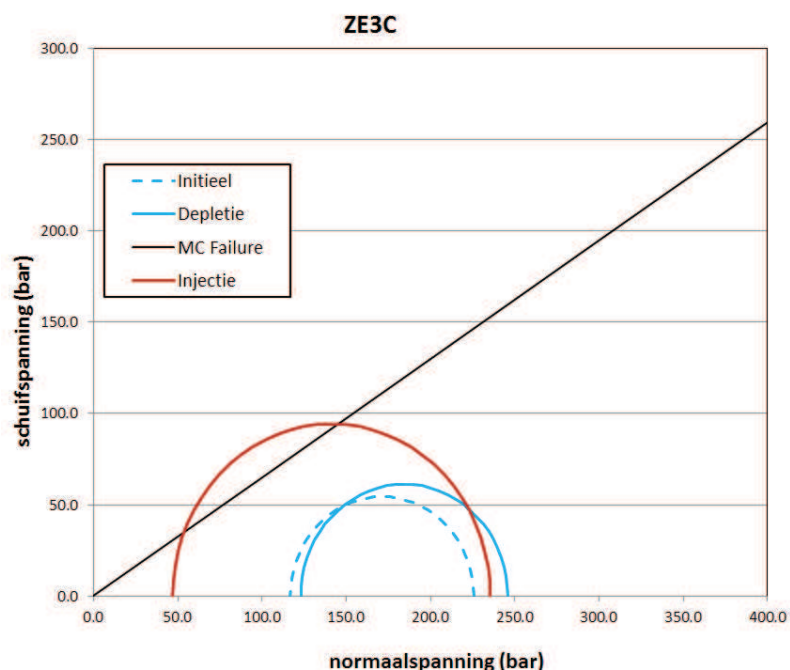


Figuur 26: 3D-visualisatie van de positie van de put SLD-1 en SLD-7 ten opzichte van de breuken in het Slootdorp gasveld.

Stel -het niet bewezen scenario- dat het injectie-interval in directe verbinding staat met een breuk: uitgaande van een hydrostatische kolom in de put is de druk in de put op reservoir niveau circa 220 bar. De huidige druk in het reservoir is ca 200 bar (Tabel 1). De “Well Head Pressure” (WHP) ligt in de orde van 10 bar. Figuur 27 laat zien dat, aannemende dat de geomechanische invoerparameters adequaat zijn ingeschat (Youngs modulus 25,27 MPa, Poissons Ratio 0,24), de opgelegde extra spanning op de eventuele breuken door de injectie van koud water (de doorgetrokken rode cirkel in Figuur 27) de MC-faallijn lijn overschrijdt. Dit wordt vooral veroorzaakt door de lagere temperatuur van het injectiewater. Hierdoor zou een beving kunnen zijn ontstaan.

Echter, de hoeveelheid geïnjecteerd water is klein (Figuur 21) bij een lage injectiedruk en er wordt niet direct in een breuk geïnjecteerd. De afstand tot de breuk is 70 tot 115 meter van de injectie locatie (zie hierboven). De verwachting is dat de hoeveelheid water in korte tijd wordt opgewarmd voordat het de breuk bereikt heeft. Enkel de extra druk op de breuk door de injectie leidt niet tot een kritische spanning op de breuk.

Als deze analyseresultaten in acht worden genomen is het niet waarschijnlijk dat de injectie van het productiewater tot verstoring van het oude evenwicht in de ondergrond heeft gezorgd, en mogelijk de NW-ZO breuk zeer lokaal in kritische spanningstoestand heeft gebracht.



Figuur 27: Indicatieve analyse breuk reactivatie ten gevolge van opgelegde injectiedruk 10bar van in het 20 bar gedepleteerde Zechstein 3 Carbonaat reservoir. Bij de berekening van de grootte van de ellipse is uitgegaan van een injectiewatertemperatuur van 45°C

Derhalve kan geconcludeerd worden dat enkel injectie van productiewater als

- trigger voor aardbeving in Slootdorp gasveld onwaarschijnlijk is
- en als
- trigger voor aardbeving op KNMI locatie zeer onwaarschijnlijk is.

6.4 Spoelings-verliezen bij booractiviteit Slootdorp-7.

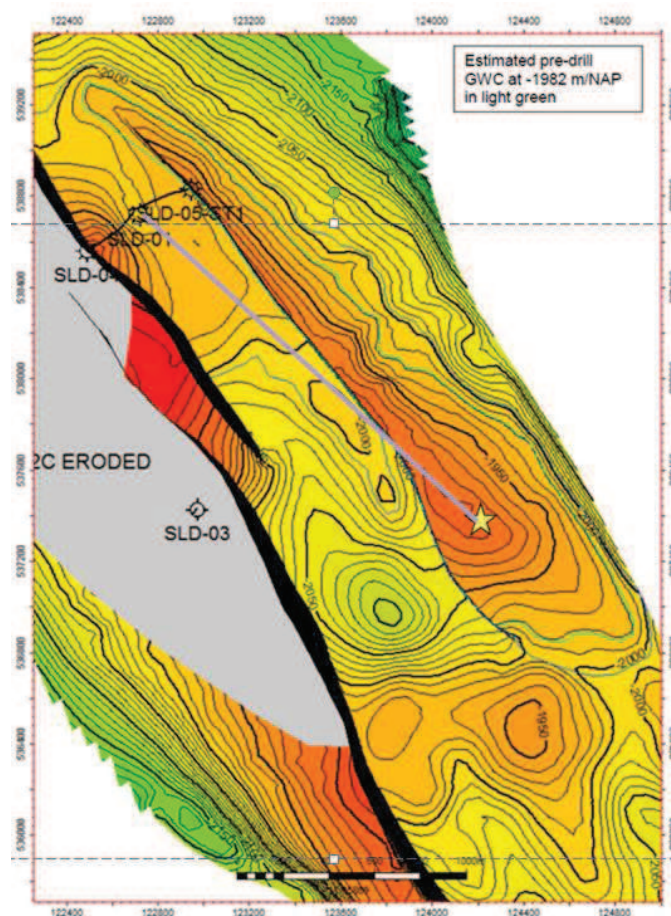
Boorspoeling is over het algemeen zwaarder dan het formatiewater in de aan te boren gesteentelagen. Als er een zeer permeabele zone wordt aangeboord gevuld met formatiewater of gas onder een lagere druk dan de druk van de kolom boorvloeistof in het boorgat dan is het mogelijk dat de boorvloeistof spontaan de permeabele zone in vloeit. Dit fenomeen wordt “losses” genoemd. Hoever de vloeistof de permeabele zone instroomt, is lastig te bepalen.

Als de permeabele zone een breuk betreft kunnen spoelingsverliezen de spanningstoestand van een breuk zodanig beïnvloeden dat deze de kritische grens overschrijdt zeker als de breuk “zwakker” is geworden. Dit laatste kan door:

1. Drukdaling in het gasveld zie ook paragraaf 6.2
2. het omhoogkomen van het GWC in het gasveld (afname van de inwendige wrijving, zie ook paragraaf 6.3) komen of
3. doordat de minimale horizontale spanning in en rond de breuk wordt verlaagd waardoor de kritische grens voor breukbeweging wordt overschreden (zie ook paragraaf 6.3).

Het is theoretisch mogelijk dat spoelingsverliezen tijdens het boren de oorzaak is van een (geïnduceerde) aardbeving op afstand van de locatie van de spoelingsverliezen. De geïnjecteerde spoelingsvloeistof brengt een drukgolf teweeg die zich verplaatst door een permeabel medium. De drukgolf kan het stressveld in een breuk beïnvloeden zodanig dat de kritische drempel wordt overschreden en een aardbeving wordt veroorzaakt.

In de periode van 09-04-2015 tot 22-06-2015 is de put Slootdorp-7 (SLD-7) geboord. Deze put had als doel een volume van gas aan te tappen dat niet door de bestaande productieputten gewonnen kon worden. De put is van de oppervlakte locatie gedeveerd geboord in zuidoostelijke richting naar de einddiepte van 2864 meter *Along Hole* (mAH) op de top van een kleine culminatie van het reservoir (ster op de kaart van Figuur 28).



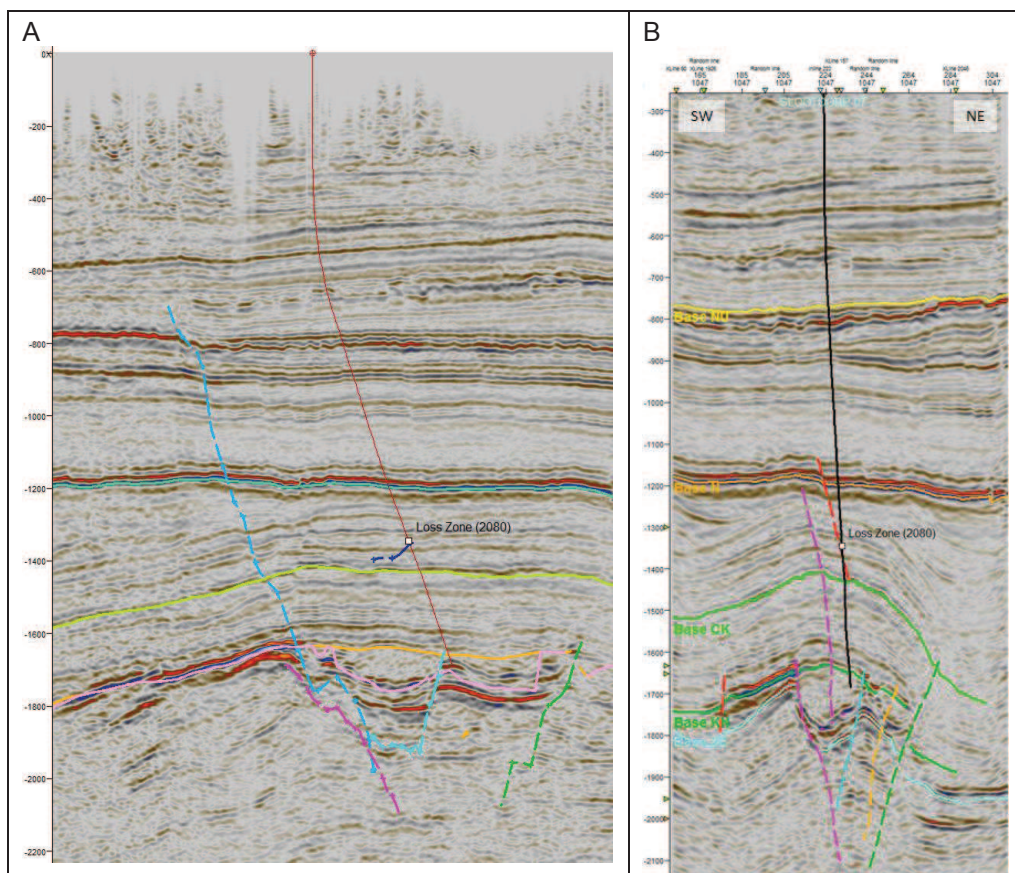
Figuur 28: Pre-drill Top Zechstein 2 Carbonaat kaart uit het Slootdorp-7 eindrapport. De ster geeft de ondergrondse doel locatie weer. De paarse lijn het boortraject van de put SLD-7.

Tijdens het boren van de put SLD-7 zijn in de periode van 16 mei 2015 tot en met 30 mei 2015 relatief grote hoeveelheden boorvloeistof verloren gegaan. In deze periode was het boorgat “*open hole*” van 1697 tot en met 2818 mAH. Lithostratigrafisch gezien van top Chalk Groep tot basis Zechstein Groep. VOGN heeft de “*loss zone*” op een diepte van 2080 mAH geplaatst. Deze “*loss zone*” is op ongeveer dezelfde locatie als een in de seismiek geïnterpreteerde breuk in de Texel Chalk Formatie (Figuur 29). Daarnaast correspondeert de loss zone ook met de locatie van de “Chalk channel” langs het boorgat.

Het originele boorgat is wegens technische complicaties verlaten en er is een tweede boorgat (sidetrack) geboord. Ook daar zijn spoelingsverliezen opgetreden in de periode van 3 juni 2015 tot en met 6 juni 2015. Uit de dagboorrapporten is op te maken dat de “*loss zones*” op 2080 m AH en 2620 m AH zaten, respectievelijk in de Texel Chalk Formatie en de Vlieland Kleisteen Formatie. De verliezen zijn uiteindelijk verholpen door het plaatsen en cementeren van de 7” casing. In het eindrapport van de boring SLD-7 vermeldt VOGN dat er 988 m³ aan boorspoeling verloren is gegaan in dit interval. Waar de spoelingverliezen plaatsvinden (diepte langs de boorgaten) ten tijde van het boren van het gat kan niet eenduidig bepaald worden. Een valide aanname is dat het merendeel van de spoelingverliezen in de breukzone in de Chalk en/of de Chalk channel plaatsvinden.

Daarna zijn tijdens het doorboren van ZE22C reservoirsectie spoelingsverliezen opgetreden van 10 juni 2015 tot en met 16 juni 2015. Tientijde van deze spoelingsverliezen was er van 2761 tot 2864 (mAH) een open boorgat. In dit interval bevinden zich de Vleiland Kleisteen en de Zechstein formaties waaronder de reservoir formaties. Bovendien kan uit de seismiek opgemaakt worden dat in dit interval een breuk wordt doorboord (Figuur 29). Door middel van LCM pills (Lost Circulation Material, waarbij de poriën van de formatie wordt gevuld met een grovere substantie) werden de verliezen geminimaliseerd. Uiteindelijk is aan 409 m³ boorspoeling verloren gegaan in het reservoir.

De registratie van spoelingsverliezen in de tijd is gedocumenteerd in Bijlage 1: Spoelingsverliezen.



Figuur 29: A) NW-ZO seismische sectie parallel langs het SLD-7 boorgat. B) ZW-NE seismische sectie door het punt van de losses in de put SLD-7. De seismiek is in het tijd-domein.

De horizontale afstand tussen de vermoede locatie van de spoelingsverliezen en de door het KNMI geprojecteerde aardbevingshaarden bedraagt ongeveer 8 kilometer (Figuur 3).

De aardbevingen in Anna Paulowna hebben maximaal 38 dagen plaatsgevonden na het eerste moment van spoelingsverliezen. De eventuele drukgolf heeft 8 kilometer te overbruggen van SLD-7 loss zone tot de aardbevingshaarden locatie. Met deze informatie is te berekenen hoe permeabel de zone moet zijn tussen oorzaak en bevingshaard die de drukgolf moet afleggen.

Spoelingsverliezen in de Chalk

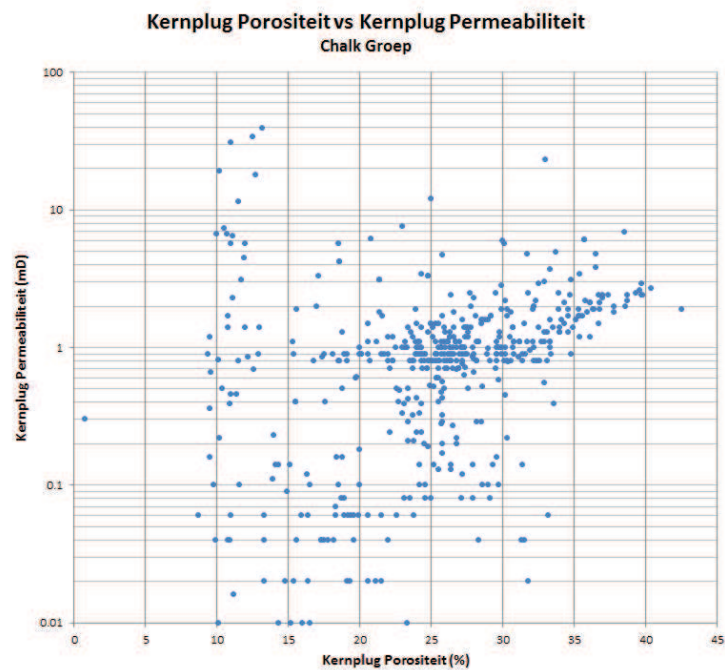
De aardbevingen hebben 38 dagen na de eerste en 23 dagen na de laatste spoelingsverliezen in de Chalk plaatsgevonden. Rekening houdend met een aantal (onbekende) parameters waaronder de porositeit (variabel tussen de 10 en 35%), een viscositeit van Chalk formatiewater (0.0038 Pa*s) en de compressibiliteit van zeewater ($4,35 \cdot \exp(-10)$) uit op een berekende permeabiliteit van een dergelijke zone tussen de 800 en 4000 mD uit.

De sterkte van de drukgolf is niet in beschouwing genomen. Die is bijzonder lastig te bepalen vooral vanwege gebrek aan gegevens.

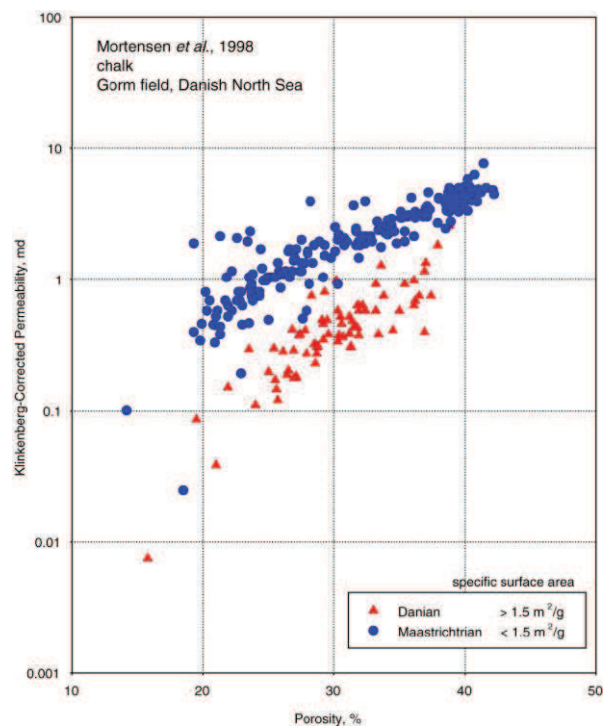
In theorie kan een openstaande breuk(zone) in de Chalk zo'n hoog permeabele zone zijn. Figuur 11 laat het breukenmodel zien, waarbij te zien is dat de door het KNMI bepaalde bevingslocaties zich rond blauwe breuk(-projectie) concentreren. Deze breuk staat niet direct in contact met de (rode) breuk die nabij de spoelingsverliezen ligt. Het is daarom niet aannemelijk dat de verloren boorvloeistof en/of de drukgolf via het breuken systeem van de *loss zone* naar de bevingszone is gevloeid / gelopen en aldaar een aardbeving heeft veroorzaakt.

De Chalk Channel nabij de spoelingsverlies-zone in put SLD-7 loopt direct naar de breuk met de KNMI aardbevingshaarden (Figuur 14).

Chalk sedimenten hebben in de regel hoge porositeit. Echter, in de Chalk is een hoge porositeit geen garantie voor een hoge permeabiliteit zoals bekend bij zandsteenreservoirs. In Figuur 30 is de porositeit-permeabiliteit grafiek van gesteentemonsters van de Chalk uit de Nederlandse ondergrond. Uit deze grafiek blijkt dat er een grote variatie in porositeit is tussen de circa 10 en 40%. Permeabiliteit komt niet hoger dan circa 40 mD. Opmerkelijk is dat de gesteentemonsters met hoge permeabiliteiten in de lage porositeitklasse zitten. Dit zou kunnen wijzen op "fracture permeabiliteit". De chalk sedimenten komen nagenoeg over het hele zuidelijk Noordzee gebied voor in de ondergrond. De reservoir karakteristieken zijn vergelijkbaar voor de verschillende sediment typen in de Chalk over dit gebied. In Figuur 31 is de porositeit uitgezet tegen de permeabiliteit van de chalk in het Gorm veld, Denemarken. Bij een porositeit tussen de 35 en 50% is er een permeabiliteit tussen de 1 en 10 mD.



Figuur 30: Kernplug Porositeit vs permeabiliteit van alle Chalk kernpluggen metingen bekend bij TNO-AGE in Nederland



Figuur 31: Porositeit/permeabiliteit plot van 2 Chalk reservoirs in het Gorm veld, Denemarken (Uit Mortensen et al., 1998).

Op basis van deze inventarisatie van de mogelijke Chalk permeabiliteiten is het onwaarschijnlijk dat de spoelingsverliezen in de Chalk in de put SLD-7 de oorzaak

zijn van de aardbevingen. De permeabiliteit van de Chalk channel is te laag om de drukgolf binnen 23 tot 38 dagen naar de aardbevingshaardlocaties te transporteren.

Derhalve kan geconcludeerd worden dat enkel spoelingsverliezen in de Chalk als

- trigger voor aardbeving in Slootdorp gasveld mogelijk is
- en als
- trigger voor aardbeving op KNMI locatie zeer onwaarschijnlijk is.

Chalk channels zijn gevormd door sterke stromingen die de zeebodem erodeerde. (Lykke-Andersen & Surlyk, 2004; Esmerode et al., 2007). De nog ongelithificeerde chalk op de zeebodem werd door zelfs vrij zwakke zeestromingen ingesneden (Esmerode et al., 2007). De fluctuatie in de zeespiegel heeft een invloed op de sterkte van de zeestromingen en daardoor dus ook op de mate van insnijding (Esmerode et al, 2007; Surluyk et al., 2008). Uplift ten tijde van het Boven Krijt heeft voor een relatieve zeespiegeldaling gezorgd en in vervolg dus een toename van insnijding in de zeebodem door de sterkere zeestromen. Tegen het einde van het Krijt stond de zeespiegel relatief hoog. De kracht van de zeestromen nam af door een toename van de waterdiepte. Chalk afzettingen gedreven door de zeestroming (contourieten) en door seismic events (turbidieten, massflows) zijn de voornaamste afzettingen in een dergelijke channel (Surluyk et al., 2008). In beide afzettingen wordt primair afgezette chalk herwerkt door zeestroming of massabeweging; dit wordt allochtone chalk genoemd (van der Molen et al., 2005). De Noorse offshore bevat veel olievelen in chalk reservoirs. Allochtone chalk vormt daarbij de beste reservoirs (van der Molen et al., 2005). Autochtone chalk is in meer onderhevig geweest aan bioturbatie en cementatie waardoor de reservoir eigenschappen zoals porositeit wordt verminderd. Bij autochtone chalk wordt door herwerking deze bioturbatie en cementatie uiteen gebroken dat de porositeit vergroot (Anderskov & Surlyk, 2012). Door snelle accumulatie van de chalk krijgt bioturbatie geen kans en door relatief snelle begraving worden ook geen hardgrounds (cementatie product) gevormd (Hardman, 1982; Anderskov & Surlyk, 2012). Door deze processen behoudt de chalk voor een deel zijn pore fluid, waarbij deze overpressure tijdens begraving de porositeit bescherming biedt tegen mechanische en chemische compactie (Anderskov & Surlyk, 2012). Dit in tegenstelling tot autochtone chalk, die bij begraving relatief veel porositeit verliest (Scholle, 1977). Allochtone chalk dat op een diepte van ongeveer 1,5 kilometer begraven is heeft, afhankelijk van de mate van overpressure, een porositeit tussen de 35 en 50%.

Spoelingsverliezen in de Zechstein

De aardbevingen hebben 33 dagen na de eerste en 3 dagen na de laatste spoelingsverliezen in de Zechstein plaatsgevonden. Rekening houdend met een aantal (onbekende) parameters waaronder de porositeit (13% conform opgave in Tabel 1), permeabiliteit (10 mD conform opgave in Tabel 1), een viscositeit van Zechstein/Rotliegend formatiewater (0.0005 Pa*s berekend uitgaande van een saliniteit van 150000 ppm op een diepte van ca 1900m) en de compressibiliteit van zeewater ($4,35 \cdot \exp(-10)$) komt looptijd van de drukgolf over 8 km uit op 530 dagen. Met dezelfde parameters is voor 3 dagen de overbruggingsafstand in de orde van 600m. Voor 33 dagen ca. 2 km.

Derhalve kan geconcludeerd worden dat enkel spoelingsverliezen in de Zechstein als

- trigger voor aardbeving in Slootdorp gasveld mogelijk is
- en als

- trigger voor aardbeving op KNMI locatie zeer onwaarschijnlijk is.

7 Conclusie

In de huidige KNMI locatiebepaling van de aardbevingshaarden zijn niet alle onzekerheden in de modelparameters meegenomen. Indien die wel meegenomen worden is een verschuiving van de locatie van de aardbevingshaarden naar de positie van het Slootdorp gasveld mogelijk. Het resultaat van het incorporeren van deze extra onzekerheid in het rekenmodel resulteert in een veel grotere onzekerheidsellips waar het Slootdorp gasveld binnenvalt.

Doordat het Slootdorp gasveld binnen de aardbevingslocatie-onzekerheidsellips valt is het niet uit te sluiten dat de bevingen zijn te wijten aan mijnbouwactiviteit.

Vanwege de onzekerheid in de locatie van de bevingen, worden de evaluatie resultaten gegeven voor de KNMI locatie en voor een locatie in het Slootdorp gasveld. Evaluatieresultaten voor een mechanisme dat exclusief als “trigger” aangewezen kan worden voor een aardbeving op de KNMI locatie of op de locatie van het Slootdorp gasveld zijn als volgt:

- 1) Ondiepe oorzaak (§6.1):
 - Slootdorp gasveld: mogelijk tot onwaarschijnlijk.
 - KNMI locatie: zeer onwaarschijnlijk
- 2) Reservoir depletie ten gevolge van de gaswinning (§6.1):
 - Slootdorp gasveld: onwaarschijnlijk.
 - KNMI locatie: zeer onwaarschijnlijk
- 3) Breuksterkte verlaging door opkomend Gas-Water contact (§6.2):
 - Slootdorp gasveld: onwaarschijnlijk.
 - KNMI locatie: zeer onwaarschijnlijk
- 4) Aquifer depletie (§6.2):
 - Slootdorp gasveld: zeer onwaarschijnlijk.
 - KNMI locatie: zeer onwaarschijnlijk
- 5) Injectie productie water (§6.3):
 - Slootdorp gasveld: onwaarschijnlijk.
 - KNMI locatie: zeer onwaarschijnlijk
- 6) Spoelingsverliezen bij het boren (§6.4):
 - Slootdorp gasveld: mogelijk.
 - KNMI locatie: zeer onwaarschijnlijk
- 7) Natuurlijke seismiteit (H 5):
 - Slootdorp gasveld: mogelijk tot onwaarschijnlijk.
 - KNMI locatie: mogelijk tot onwaarschijnlijk

Afhankelijk van vooropgestelde aannames zijn twee conclusies mogelijk. Indien uitgegaan wordt van de KNMI positionering van de aardbevingslocaties, de grootte van de onzekerheidsellipsen, gegeven door het KNMI, en de evaluatieresultaten in hoofdstukken 4 tot en met 6 dat is het onwaarschijnlijk dat de waargenomen bevingen voortvloeien uit activiteiten in het Slootdorp gasveld. Het resultaat wijst dan in de richting van een natuurlijke oorzaak.

Indien uitgegaan wordt van de nieuwe onzekerheidsellips, waar het Slootdorp veld binnenvalt, en de evaluatieresultaten gegeven in hoofdstukken 4 tot en met 6 dan is het mogelijk dat de waargenomen bevingen voortvloeien uit de combinatie van een aantal mijnbouwactiviteiten in het Slootdorp gasveld. De meest waarschijnlijke oorzaken zijn dan (in willekeurige volgorde):

- a. breukverzwakking ten gevolge van het omhoogkomen van het GWC,
- b. mogelijk meer kritisch gespannen zijn van de breuk ten gevolge van depletie en
- c. spoelingsverliezen in de put SLD-7.

TNO-AGE verwacht, gezien de tijdsopvolging, dat spoelingsverliezen de trigger zijn geweest voor de bevingen in een breuk die eerder door de gasdepletie en eventueel breukverzwakking kritisch gespannen is geworden.

8 Referenties

- , A comprehensive seismic velocity model for the Netherlands based on lithostratigraphic layers. Netherlands Journal of Geosciences, 85-4, 277-292, 2006.
- 2014, Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands. Geothermics 52, (2014), 206–219.
- TNO (2004). Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit. TNO rapport NITG 04-171-C.
- TNO, 25 juni 2012, Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland. TNO-rapport 2012 R10198
- TNO, 21 juni 2016, Seismiciteit onshore gasvelden Nederland. TNO 2016 R10164
- Vermilion 2012, Aanvulling WIPLA_Slootdorp.tiff.
- Vermilion Oil and Gas Netherlands B.V. 20-06-2015, Final wellsite Geological report. Exploration well Slootdorp -7 / Slootdorp-7 ST1
- Water injectie Slootdorp-1, Jaarrapportage 2010. Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V.
- Water injectie Slootdorp-1, Jaarrapportage 2011. Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V.
- Water injectie Slootdorp-1, Jaarrapportage 2012. Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V.
- Water injectie Slootdorp-1, Jaarrapportage 2013. Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V.
- Water injectie Slootdorp-1, Jaarrapportage 2014. Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V.

9 Ondertekening

Utrecht, 22 december 2016

TNO



Dr.
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken

Bijlage 1: Spoelingsverliezen.

Put	Datum	Losses	Strat	Diepte (mAH)	
SLD-06	19-4-2015	partial	Brussels Sands	tot 1139	
	22-4-2015	No losses, but LCM pill used	Chalk	tot 1321	
Put	Datum	Losses	Strat	Diepte (mAH)	
SLD-07	16-5-2015	30m3/hr, cum losses 78m3. LCM pills used	Texel Chalk	tot 2144	
	17-5-2015	4.5m3/hr, cum losses 22.5m3, Cement squeeze uitgevoerd	Texel Chalk	tot 2145	Loss zone @ 2080m?
	18-5-2015	No downhole losses after LCM treatment			
	19-5-2015	No losses			
	20-5-2015	No losses	ZE22 Carbonate	tot 2818	
	21-5-2015	1.5m3/hr losses (tijdens casing zetten)	ZE22 Carbonate	tot 2818	
	22-5-2015	2 - 3m3/hr static losses, 6 - 17m3/hr dynamic losses.	ZE22 Carbonate	tot 2818	
	23-5-2015	6m3/hr dynamic losses. Total losses for day: 140m3	ZE22 Carbonate	tot 2818	
	24-5-2015	4 - 8m3/hr dynamic losses. Total losses for day: 50m3 (casing kan niet verder, POOH)	ZE22 Carbonate	tot 2818	
	25-5-2015	0 - 3.5m3/hr dynamic losses. Total losses for day: 65.5m3			
		5m3 LCM pill bij loss zone @ 2070m. loss rate reduced from 15.2m3/hr to zero.			
	26-5-2015	0 - 1m3/hr losses. Total losses for day: 15m3			
	27-5-2015	Total losses for day: 108m3			
		Spotted & squeezed a 5m3 LCM pill, losses reduced from 8-10m3/hr to 0m3/hr.			
		experiencing total losses at 2763m.			
	28-5-2015	Total losses for day: 46.7m3	ZE22 Carbonate	tot 2818	
		Observed 6.7m3/hr static losses after pumping. (LCM pills)			
	29-5-2015	Total losses for day: 56.5m3			
		Zetten van cementpluggen			
	30-5-2015	Total losses for day: 0m3			
	31-5-2015	Start sidetrack, KO @ 2096,5			
	1-6-2015	Total losses for day: 0m3	Texel Chalk	tot 2202	
	2-6-2015	Total losses for day: 0m3	Holland Marl	tot 2453	
	3-6-2015	Total losses for day: 65m3	Vlieland fm (Claystone)	tot 2748	
		dynamic losses of 6m3/hr, observed 4m3/hr static losses.			
	4-6-2015	Total losses for day: 103m3	ZE22 Carbonate	tot 2748	Of toch ZE23 Carbonate? (zie 9 juni 2015)
	5-6-2015	Total losses for day: 60m3			
	6-6-2015	Total losses for day: 85m3, 7" casing wordt gecementeerd			
	7-6-2015	Total losses for day: 0m3			
	8-6-2015	Total losses for day: 0m3			
	9-6-2015	Total losses for day: 0m3		tot 2761	
	10-6-2015	Total losses over past 24hrs - 195m3 (LCM pills)	ZE22 Carbonate	tot 2837	
	11-6-2015	Total losses over past 24hrs - 95m3	ZE21 Anhydrite	tot 2864	
	12-6-2015	Total losses over past 24hrs - 65m3			
	13-6-2015	Total losses over past 24hrs - 23m3			
	14-6-2015	Loss rate = 0.5 m ³ /hr.			
	15-6-2015	Loss rate while RIH = 0.9 m ³ /hr. Dynamic losses = 1.2 m ³ /hr.			
	16-6-2015	Dynamic losses reduced to = 0.6 m ³ /hr. 4-1/2" production liner gezet			

Put	Datum	Losses	Strat	Diepte (mAH)	
	19-6-2015	No downhole losses seen after firing guns on first two runs; initially experienced 600 l/min after third run, which reduced to 450 l/min within 15 mins.			
	20-6-2015	guns 100% fired - Losses reduced from 450 l/min to zero.			

KRL-1:

Week 20/4/1981 – 27/4/1981: Spoelingsverliezen tussen 1590 en 1698m AH – lithostratigrafie: CK.

Week 4/5/1981 – 11/5/1981: Spoelingsverliezen tussen 1911 en 2022m AH – lithostratigrafie: KN(GL).

ODS-1

Losses in de Chalk

Bijlage 2: Anna Paulowna bevingen in de media.

ANNA PAULOWNA Bij Anna Paulowna zijn vannacht twee aardbevingen geweest. Iets voor 1.00 uur werd het dorp getroffen door een aardbeving met een kracht van 1,5 op de schaal van Richter. Een minuut later volgde een tweede beving die iets sterker was: 2,3. Dat meldt het KNMI vandaag.

De eerste beving hebben de bewoners waarschijnlijk niet opgemerkt. De tweede mogelijk wel. Volgens het KNMI kunnen mensen pas aardbevingen voelen vanaf 2,0 op schaal van Richter.

Het KNMI laat weten dat de bevingen zijn veroorzaakt door gaswinning. "Het waren geen natuurlijke bevingen", aldus een woordvoester. In Noord-Holland wordt, net als in Groningen, geboord naar gas.

(Bron: <http://www.rtvnh.nl/nieuws/166433/anna-paulowna-getroffen-door-twee-aardbevingen->)

Aardbevingen in Anna Paulowna

Dit item is verlopen op 08-07-2015.

In de nacht van 22 op 23 juni hebben er twee aardbevingen plaatsgevonden in de gemeente Hollands Kroon.

Het KNMI, Staatstoezicht op de Mijnen en TNO doen op dit moment onderzoek naar de oorzaak van deze bevingen. Zij betrekken hierbij het bedrijf Vermilion die op dit moment naar gas boren in Slootdorp. Tot nu toe zijn er bij de gemeente en de bovenstaande instanties geen meldingen van overlast of schade binnengekomen. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft inmiddels de volgende verklaring afgegeven:

Verklaring van SodM

"Op 23 juni 2015 heeft het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) een melding gekregen van het KNMI dat er in de nacht twee bevingen zijn geweest in de buurt van Anna Paulowna. Hoe de bevingen zijn ontstaan en of er een mogelijke relatie is met gaswinning is nog onduidelijk. De locatie van de bevingen ligt hemelsbreed ruim 5 kilometer van het dichtstbijzijnde gasveld 'Slootdorp', in de buurt van de plaats Slootdorp. Aardbevingen veroorzaakt door gaswinning vinden meestal plaats in of aan de rand van een gasveld. Vooralsnog ligt een oorzakelijke relatie niet direct voor de hand.

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft TNO opdracht gegeven om nader onderzoek te doen naar een mogelijke relatie tussen de bevingen en de mijnbouwactiviteiten in het gebied. Het is nog niet bekend wanneer de onderzoeksresultaten bekend worden. SodM is zich bewust van de bezorgdheid die

is ontstaan onder de bewoners in het gebied en streeft er naar om zo snel mogelijk uitsluitel te kunnen geven.”

Bron: http://www.hollandskroon.nl/leven/nieuws_3429/item/aardbevingen-in-anna-paulowna_25408.html.

Aardbevingen bij Anna Paulowna

· 23-06-2015, 17:20

Binnenland

ANP

Het KNMI heeft afgelopen nacht twee aardbevingen geregistreerd onder het Noord-Hollandse Anna Paulowna. De bevingen, met een kracht van 2.3 en 1.5 op de schaal van Richter, volgden kort na elkaar rond 01.00 uur.

Volgens seismoloog van het KNMI zijn de bevingen waarschijnlijk veroorzaakt door gaswinning: in de gemeente Hollands Kroon, waar Anna Paulowna deel van uitmaakt, wordt in een kleine put naar gas geboord.

Evers noemt de locatie opmerkelijk: "Er zijn weleens bevingen in Noord-Holland, maar op deze specifieke locatie hebben dat nog nooit gezien."

Gevoeld

Hoewel de beving qua kracht vergelijkbaar is met zwaardere bevingen in Groningen, zijn er bij de gemeente geen meldingen binnengekomen.

"Dat kan te maken hebben met de diepte van de beving, maar ook met het uitstralingspatroon, hoe de beving zich door de ondergrond heeft verplaatst", zegt Evers.

Bron: <http://nos.nl/artikel/2043040-aardbevingen-bij-anna-paulowna.html>