

VERTROUWELIJK

**Energie**Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)T +  
F +**TNO-rapport****TNO 2016 R11210****Evaluatie mogelijke oorzaak aardbevingen  
nabij Castricum-Zee in oktober – november  
2013**

Datum 22 december 2016

Auteur(s)

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 52 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever

Projectnaam F1-Bodembeweging

Projectnummer 060.20655/01.07.02

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.

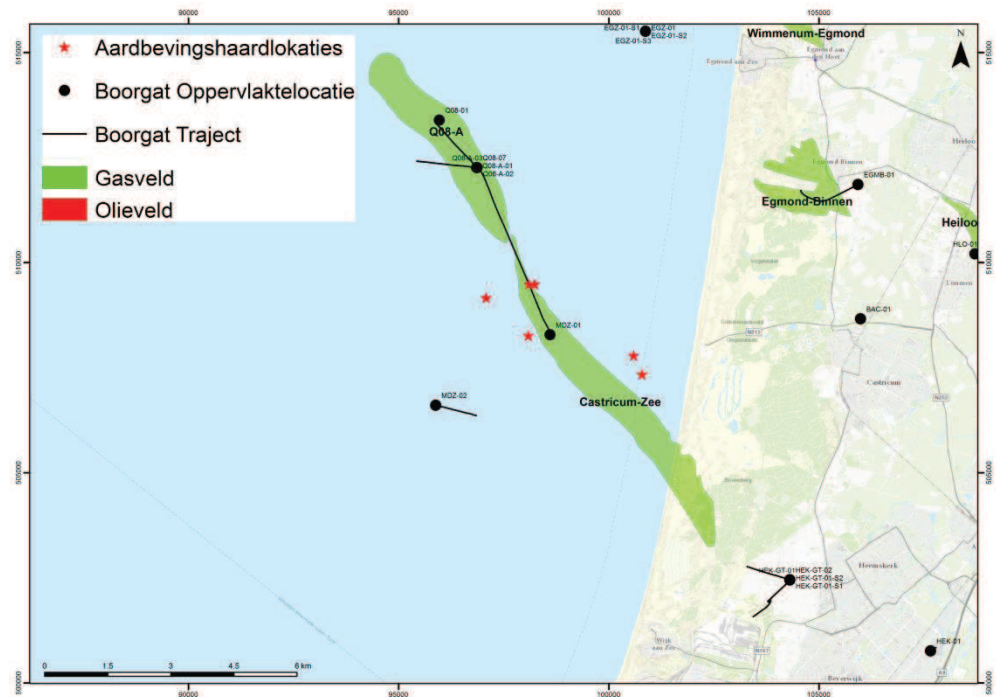
Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

VERTROUWELIJK

## Managementsamenvatting

In 2013 zijn zes aardbevingen nabij Castricum op de Noordzee geregistreerd door het KNMI (Figuur A). De eerste beving met een magnitude van 2,5 op de schaal van Richter, vond plaats op 22 oktober. De andere vijf bevingen (met lagere magnitudes) vonden plaats tussen 23 oktober en eind november 2013. Sindsdien (tot en met augustus 2016) is er in dit gebied geen seismiciteit meer waargenomen.



Figuur A: Locatiekaart van de aardbevingen, gasvelden en boringen in de ruime omgeving van de aardbevingshaarden

De oorzaak van deze bevingen in 2013 is onduidelijk. Samen met SodM heeft TNO-AGE een aantal hypothesen gedefinieerd, die de mogelijke oorzaken zouden kunnen aangeven van de bevingen. Deze zijn in dit rapport nader bestudeerd. De centrale vraag 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.

### Methode

Evaluatie van mogelijke oorzaken van de aardbevingen is uitgevoerd door de individuele hypothesen te testen. Naast natuurlijke seismiciteit worden mijnbouwactiviteiten meegenomen, die in het recente verleden hebben plaatsgevonden (Figuur A). Tevens is een evaluatie op de plaatsbepaling van de bevingslocaties uitgevoerd.

### Natuurlijke oorzaak

Evaluatie van bevingen in de ruime omgeving van het veld en timing van laatste beweging langs breuken in de ondergrond geven aan dat de mogelijkheid bestaat dat de diepe ondergrond nabij het Castricum-Zee gasveld van nature kritisch

danwel nabij kritisch gespannen is. Een, deels, natuurlijke oorzaak kan daarom niet uitgesloten worden.

### **Gasdepletie als mogelijke oorzaak**

De locaties van de bevingen bevinden zich in directe nabijheid van het Castricum-Zee gasveld, welke geproduceerd is tussen 2000 en 2004. Deze nabijheid suggereert dat de bevingen mogelijk samenhangen met de productie van dit gasveld. Het gasveld bevindt zich tussen twee breuken. Gedurende de productie is de spanning op deze breuken toegenomen. Er zijn geen bevingen geregistreerd tijdens gasproductie. De geologische en productiekenmerken van dit gasveld geven aan dat bevingen door gasproductie (drukvaling en reservoir compactie) onwaarschijnlijk zijn gedurende de productiefase. Het kan niet worden uitgesloten dat aan gasproductie gerelateerde effecten, zoals frictiereductie van de breuk en tijdsafhankelijke effecten van compactie, hebben geleid tot de bevingen. Echter, beide processen hebben in de productieperiode van het Castricum-Zee gasveld en geruime tijd daarna (negen jaar) niet geleid tot seismiciteit.

### **Boring als mogelijke oorzaak**

In de periode april tot juni 2013 zijn in de boring HEK-GT-1, nabij het Castricum-Zee gasveld, relatief grote spoelingsverliezen opgetreden. Dit is drie tot vijf maanden voor het optreden van de aardbevingen. De diepte van de spoelingsverliezen in de put komt overeen met het aanboren van top Volpriehausen reservoir en de putdoorsnijding van een breuk, die doorloopt als noordoostelijke randbreuk van het Castricum-Zee gasveld. Dit punt in de put bevindt zich op 5 tot 8 kilometer afstand van de bevingen. Indicatieve berekeningen geven aan dat het theoretisch mogelijk is dat drukgolven geïnduceerd door de spoelingsverliezen, de locatie van de aardbevingen in de periode van maanden kan bereiken.

### **Bevindingen**

Het onderzoek resulteert in de bevinding dat de individuele hypothesen geen directe verklaring geven voor het voorkomen van de bevingen nabij Castricum-Zee in 2013. Hieruit kan voorlopig worden geconcludeerd dat de meest waarschijnlijke oorzaak van de bevingen een samenloop van omstandigheden is.

De breuken in en aanpalend het Castricum-Zee gasveld, zijn als gevolg van natuurlijke processen en/of gasdepletie, met eventueel breukverzwakking, kritisch gespannen geraakt. Om een aardbeving te “triggeren” op deze kritisch gespannen breuken is een drukperturbatie nodig. De spoelingsverliezen kunnen, mogelijk, deze drukperturbatie hebben gegenereerd.

De geanalyseerde hypothesen dekken de bekende en minder bekende oorzaken van geïnduceerde en natuurlijke seismiciteit. Toekomstige alternatieve hypothesen op basis van nu onbekende oorzaken kunnen echter niet uitgesloten worden. Volledige modellering en geomechanische kwantificering van de ondergrond ten behoeve van een verklaring valt buiten het bereik van dit onderzoek. Om de oorzaak onomstotelijk (indien mogelijk) vast te stellen is meer gedetailleerd onderzoek noodzakelijk.

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Beschrijving van het Castricum-Zee gasveld, mijnbouwactiviteiten en de aardbevingen .....</b>	<b>10</b>
2.1	Algemene beschrijving van het Castricum-Zee gasveld .....	10
2.2	Mijnbouwactiviteiten in de omgeving .....	14
2.3	Castricum-Zee aardbevingen .....	14
2.4	Onzekerheid positionering aardbevingen .....	18
<b>3</b>	<b>Geologie van de diepe ondergrond van het gebied rond het Castricum-zee gasveld en de Castricum-Zee aardbevingen. ....</b>	<b>20</b>
3.1	Regionale breuken.....	20
3.2	Geologische opbouw van de regio Castricum-Zee .....	21
<b>4</b>	<b>Natuurlijke seismiciteit .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>Geomechanische evaluatie van het Castricum-Zee gasveld in relatie tot mijnbouwactiviteiten .....</b>	<b>29</b>
5.1	Regionaal spanningsveld .....	29
5.2	Reactivatiepotentieel van de breuken nabij het Castricum-Zee gasveld .....	30
5.3	Breukreactivatie door gasdepletie .....	31
5.4	Drukdiffusie aquifer.....	32
5.5	Frictiereductie door vertraagde aquifer respons.....	34
5.6	Tijdsafhankelijke effecten van compactie .....	36
5.7	Vloeistofverliezen in de boringen HEK-GT-1 en HEK-GT-2.....	37
<b>6</b>	<b>Magnitude van potentiële bevingen.....</b>	<b>44</b>
6.1	Geomechanische analyse breuken .....	44
<b>7</b>	<b>Bevindingen .....</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>51</b>
	<b>Bijlage 1: Gasveld en aardbeving correlatie .....</b>	<b>52</b>

## Figuren

Figuur 2-1 : Locatiekaart van de aardbevingen, gasvelden en boringen in de ruime omgeving van de aardbevingshaarden .....	10
Figuur 2-2: Illustratie van het Volpriehausen reservoir in de boring MDZ-1. Het volledige reservoir is gekernd. Op de kern zijn kernanalyses uitgevoerd om porositeit en permeabiliteit te bepalen te zien in de laatste twee kolommen. ...	11
Figuur 2-3. Dieptekaart van het Top-Volpriehausen (Wintershall B.V., 2003) met zadel tussen het Q8-A en Castricum-Zee gasveld.....	12
Figuur 2-4. P/Z curves voor het Q8-A en het Castricum-Zee gasveld .....	14
Figuur 2-5: Detail informatie van de beving bij Castricum-Zee met een magnitude van 2,5. Locatieberekening is gedaan met behulp van registraties uit drie waarnemingsstations. ....	16
Figuur 2-6: 3-D figuur van de opbouw van de ondergrond rond het Castricum-Zee gasveld. De rode bolletjes (in de gele cirkels) geven de locaties van de aardbevingshaarden geprojecteerd op het basis Boven-Trias laagvlak. De roze lijn geeft de positie van het Castricum-Zee gasveld aan waar de gesteenten van de "Lower Volpriehausen" laagpakket het gasreservoir vormen. De blauwe verticale lijntjes zijn de puttrajecten van de putten MDZ-1 en HEK-GT-1. ....	17
Figuur 2-7: Locatie kaart van de gasvelden bevingen en seismische stations. ....	18
Figuur 2-8: Aardbevingslocatie met variaties in het gebruikte snelheidsmodel. De donker blauwe ellips is de omhullende van de "standaard" ellipsen rond de meest uiteen liggende even waarschijnlijke haardlocaties. De bevingen zijn geannoteerd met de magnitude en datum van de beving (DDMMYYYY).....	19
Figuur 3-1. Regionale breuken op het niveau van Onder-Trias. Het paarse vierkantje geeft de locatie van het Castricum-Zee gasveld aan.....	20
Figuur 3-2: Een seismische sectie in NO-ZW richting met de geïnterpreteerde breuken langs het put-traject MDZ-1 en door een van de KNMI gepostuleerde bevingslocaties. Voor de locatie van de lijn zie Figuur 3-4.....	21
Figuur 3-3. Zuidoost-Noordwest doorsnede van het Castricum-Zee gasveld (detail Figuur 3-2), gemaakt met Petrel. De oranje breuk is de westelijke randbreuk van het gasveld. De roze horizon geannoteerd met Base RN is nabij top Volpriehausen reservoir. De doorsnede is circa 9,5 km breed.....	22
Figuur 3-4: Basis Boven Trias 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. De rode lijnen geven de positie van de breuken weer zoals geïnterpreteerd op de seismiek. Blauwe lijn geeft de doorsnede van Figuur 3-2 aan en de groene lijn geeft de doorsnede van Figuur 5-7 aan. ....	23
Figuur 3-5. Overzichtskaart van het Castricum-Zee gasveld met de randbreuken. N.B. De breuken in en direct grenzend aan het Castricum-Zee gasveld zijn niet geïnterpreteerd door TNO, maar door Wintershall. De ellipsen geven de onzekerheid weer van de locaties van de bevingen zoals bepaald door het KNMI.....	24
Figuur 3-6: Breukconfiguratie in en rond het Castricum-Zee gasveld volgens TNO-AGE evaluatie De onzekerheid van locaties van de bevingen zijn weergegeven als ellipsen, zie ook legenda.....	25

Figuur 4-1. Aardbevingen in Nederland: periode 1904-2014 .....	27
Figuur 4-2: Seismische sectie met een breuk interpretatie die doorloopt tot ver in de Noordzee Groep. De laagpakketten die verzet zijn liggen op circa 300 ms diep. Naar schatting zijn dat lagen die enkele miljoenen jaar geleden zijn afgezet. De breuk is sindsdien seismisch actief geweest. ....	28
Figuur 5-1. Mohr-Coulomb diagram wat de verandering in spanningstoestand beschrijft door de depletie van het Castricum-Zee gasveld .....	32
Figuur 5-2. Voorbeeld van de verplaatsing van een drukgolf door een aquifer. ....	33
Figuur 5-3. Locatie van de beving ten opzichte van het Castricum-Zee gasveld. De rode stippellijn is de onzekerheid in de plaatsbepaling. De roze polygoon geeft circa 11% van het totaal oppervlak van het gasveld om de productieput weer. ....	34
Figuur 5-4. Mohr-coulomb diagram wat de verandering in de spanningstoestand ten gevolge van depletie weergeeft. ....	36
Figuur 5-5. Locatie van de meetpunten in RD-coördinaten (blauwe cirkels). De rode lijn geeft de contour van het Castricum-Zee gasveld weer, de zwarte lijn is de kustlijn. ....	36
Figuur 5-6. Bodemdalingsmetingen in de tijd van peilmerken die binnen 5 km van het Castricum-Zee gasveld liggen en meerdere metingen hebben sinds 2000. De titels geven de specifieke peilmerken weer. ....	37
Figuur 5-7: Detail van NW-ZO lopende seismische sectie met daarop het boortraject van de boring HEK-GT-1. Ook de locatie van de spoelingsverliezen zijn aangegeven. ....	39
Figuur 5-8: Detail van NW-ZO lopende seismische sectie met daarop het boortraject van de sidetrack van boring HEK-GT-1 => HEK-GT-1-S1. Ook de locatie van de spoelingsverliezen in de sidetrack zijn aangegeven. ....	39
Figuur 5-9: Boortraject HEK-GT-2 gevisualiseerd op een seismische sectie. In het traject van de parse lijn (base RN) tot de gele sub-horizontale lijn (Base ZE) zijn spoelingsverliezen opgetreden. Merk op dat het boor traject net boven basis Zechstein een breuk doorkruist. ....	40

## Tabellen

Tabel 2-1	Reservoir en geomechanische eigenschappen van het Volpriehausen reservoir in het Castricum-Zee gasveld.....	12
Tabel 2-2:	Aardbevingsinformatie van KNMI.....	15
Tabel 5-1.	Waardes voor de spanningen op reservoirniveau (in bar). * Voor de initiële druk is de druk van het Q8-A gasveld aangenomen.....	30
Tabel 5-2:	Tijdspanne tussen bevingen en spoelingsverliezen in HEK-GT-1.....	41
Tabel 5-3:	Berekende aantal dagen tussen eerste spoelingsverliezen van HEK-GT-01 en aardbevingslocatie uitgaande van bovengenoemde parameters.....	42
Tabel 5-4:	Permeabiliteit van potentieel drukgolf pad.....	42
Tabel 6-1.	Parameters gebruikt in de analyse van het Castricum-Zee gasveld .....	44
Tabel 6-2.	Lokale magnitudes en seismisch moment voor de grote randbreuken van het Castricum-Zee gasveld.....	45
Tabel 6-3.	Seismisch moment voor alle geregistreerde bevingen rondom het Castricum-Zee gasveld.....	45
Tabel 6-4.	Parameters gebruikt voor de berekening van de compactie van het Castricum-Zee gasveld.....	46
Tabel 6-5.	Compactievolume ( $\Delta V$ ), oppervlak en compactie ( $\Delta h$ ) voor het Castricum-Zee gasveld. Hierbij is aangenomen dat maar ~11% van het gehele volume gedepleteerd is.....	46
Tabel 6-6.	Seismisch en bijbehorende magnitude bij verschillende waardes van de partiticoëfficiënt.....	47

# 1 Inleiding

In 2013 zijn zes aardbevingen nabij Castricum op de Noordzee geregistreerd door het KNMI. De eerste beving, met de hoogste magnitude van de reeks, vond plaats op 22 oktober om 23:02 en had een sterkte van 2,5 op de schaal van Richter. De tweede beving vond een dag later plaats om 19:45 en had een sterkte van 2,0 op de schaal van Richter. Volgens het KNMI vonden beide bevingen plaats in het relatief ondiepe geologische bereik, tussen de één en de vier à vijf kilometer diep. Door het KNMI wordt hiervoor een standaard diepte van 3 km aangehouden omdat dit de diepte is van de meeste gasvelden in Nederland. Hierna zijn er in de buurt van deze bevingen in oktober en november 2013 nog vier lichtere aardbevingen met magnitude 1,4 tot 1,8 door het KNMI geregistreerd. Sindsdien (tot en met augustus 2016) is er geen seismiciteit meer waargenomen nabij Castricum.

De locaties van de bevingen bevinden zich in directe nabijheid van het Castricum-Zee gasveld, wat een link met de depletie van dit gasveld suggereert. In het Castricum-Zee gasveld is vier jaar gas geproduceerd. Het veld is sinds 2004 uit productie. Tijdens de gasproductie en tot 9 jaar na het sluiten van het gasveld, zijn er geen bevingen waargenomen. Uit de deterministische hazard analyse (van Eijs et. al, 2006; van Thienen-Visser et. al, 2012) blijkt verder dat het Castricum-Zee gasveld een verwaarloosbare kans op beven krijgt toegeschreven. Dit komt door de lage ratio van de Young's modulus van het reservoir t.o.v. de bovenliggende laag (0.93). Een beving veroorzaakt door enkel gasdepletie van het gasveld ligt niet in de lijn der verwachting.

## Bereik

De oorzaak van deze bevingen is onduidelijk. Samen met SodM heeft TNO-AGE een vijftal hypothesen gedefinieerd die de mogelijke oorzaken zouden kunnen aangeven van de bevingen. Deze hypothesen zijn:

1. Drukdifffusie aquifer
2. Frictiereductie door vertraagde aquifer respons
3. Tijdsafhankelijke effecten van compactie
4. Vloeistofverliezen boring Heemskerk
5. Natuurlijke seismiciteit

Bovengenoemde hypothesen dekken de bekende en minder bekende oorzaken van geïnduceerde en natuurlijke seismiciteit. Toekomstige alternatieve hypothesen op basis van nu onbekende oorzaken kunnen niet uitgesloten worden.

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. Volledige modellering en geomechanische kwantificering van de ondergrond ten behoeve van een verklaring valt buiten het bereik van dit onderzoek.

## Indeling

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het Castricum-Zee gasveld, de recente mijnbouwactiviteiten in de omgeving van het gasveld en de aardbevingen.



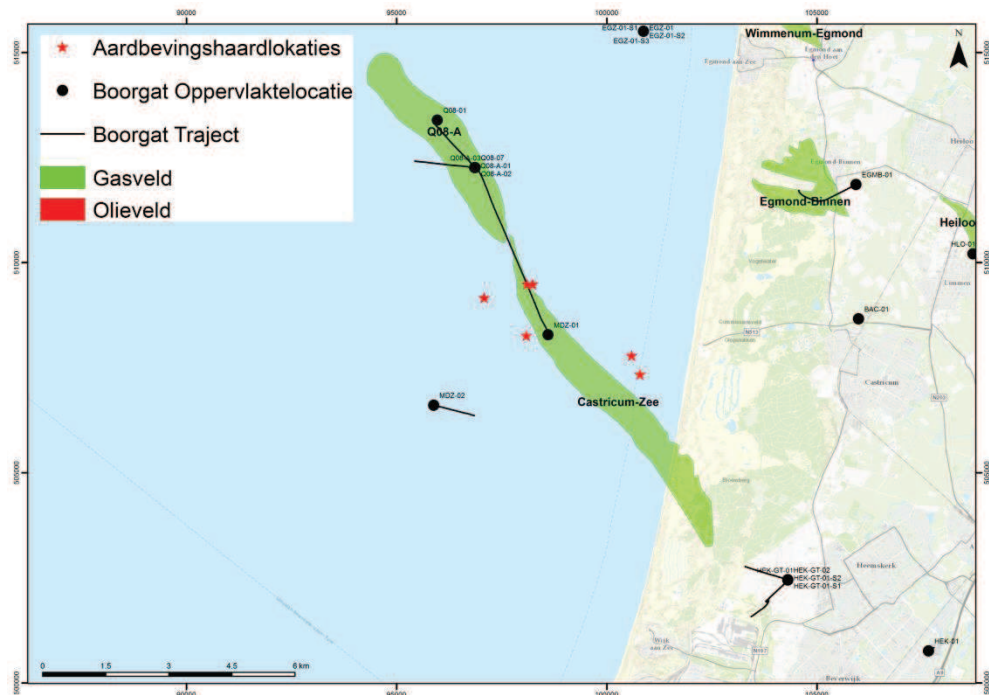
Om de hypothesen te kunnen toetsen is een goed en gedetailleerd beeld van de ondergrond een randvoorwaarde. Indien de drukverandering in de vloeistof en/of gasvulling van het reservoir als oorzaak wordt beschouwd is dit enkel mogelijk als de twee locaties: haard en bron, via een permeabele / doorlatende zone met elkaar verbonden zijn. Dit om de drukperturbatie van de ene naar de andere locatie te kunnen doorgeven. 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 Castricum-Zee gasveld geactualiseerd. Dit is beschreven in Hoofdstuk 3.

Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 en 5 ingegaan op de mogelijke oorzaken doormiddel van een geologische en geomechanische aanpak van het testen van de hypothesen. In hoofdstuk 6 wordt de methodiek die opgezet is voor het Groningen gasveld (NAM 2013; TNO, 2013) toegepast om tot uitspraken te komen van mogelijke magnitudes.

## 2 Beschrijving van het Castricum-Zee gasveld, mijnbouwactiviteiten en de aardbevingen

### 2.1 Algemene beschrijving van het Castricum-Zee gasveld

Het Castricum-Zee gasveld bevindt zich deels onder de Nederlandse kust en deels onder de Noordzee binnen de driemijlszone (zie Figuur 2-1) ten westen van Castricum. Het gasveld ligt in het verlengde van het noordwestelijk gelegen Q8-A gasveld dat op dezelfde geologische trend ligt en waar gas in hetzelfde reservoir is geaccumuleerd.

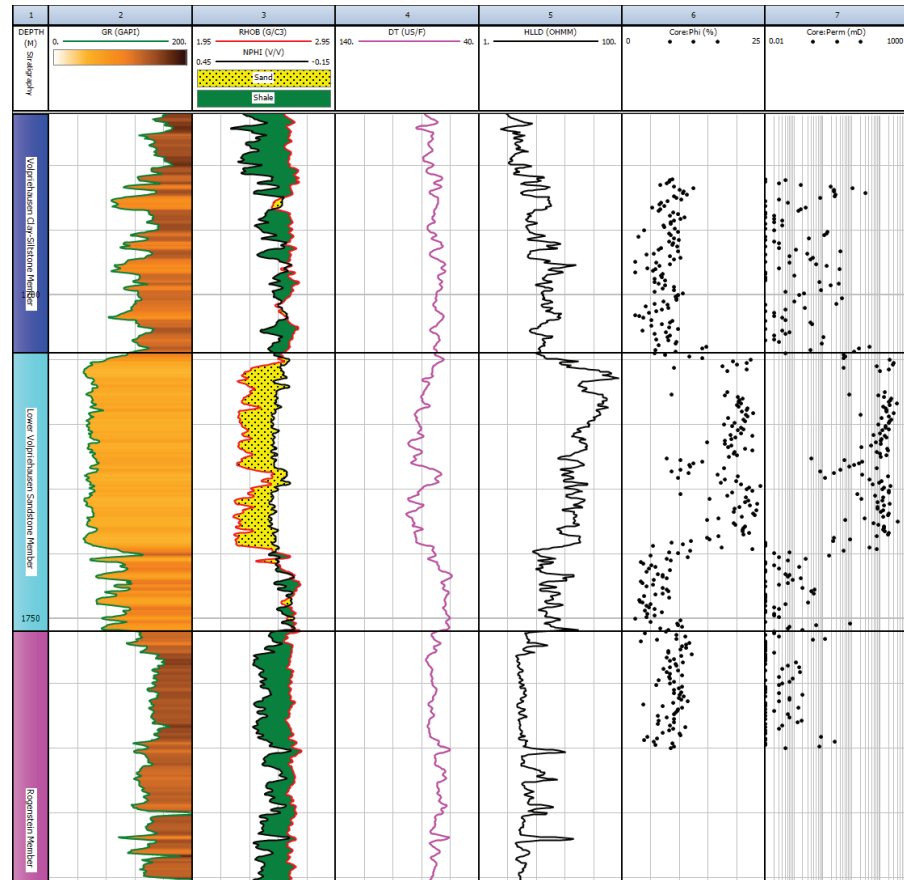


Figuur 2-1 : Locatiekaart van de aardbevingen, gasvelden en boringen in de ruime omgeving van de aardbevingshaarden

Het gasveld is in 2000 ontdekt met de exploratieput Middelie-Zee-01 (putcode MDZ-01) door Clyde Petroleum B.V. (later overgenomen door Wintershall). Het winbare gas is aangetroffen in een 43 m dik zandpakket in de Volprieausen Formatie. De netto reservoirdikte is circa 30 m (geel gestippelde interval in derde kolom van Figuur 2-2). De porositeit, gemeten aan kernpluggen, is variabel maar er zijn enkele relatief dikke pakketten waar de porositeit rond de 18% ligt. In die intervallen is de permeabiliteit rond de 120 mD. De (netto) dikte van die goede reservoirlagen is circa 33 m. De gemiddelde waarde van de plugmetingen in bovengenoemd interval is gegeven in Tabel 2-1. De bruto dikte van de Volprieausen Zandsteen is circa 40 meter; de gemiddelde porositeit en permeabiliteit van het bruto pakket is respectievelijk 15% en 90 mD. De afsluitende laag wordt gevormd door kleisteenpakket van de Soling Formatie.

Op het horstblok van gasvelden Q8-A en Castricum-Zee varieert de porositeit van de bruto Volprieausen Zandsteen tussen de 12% en 16% (Winningsplan Q8-A) en qua permeabiliteit tussen de 20 mD en 90 mD. In de ruime omgeving van het Castricum-Zee gasveld varieert de porositeit van de (bruto) Volprieausen

Zandsteen tussen de 5% en de 18%. De permeabiliteit heeft hierdoor ook een grotere variatie.

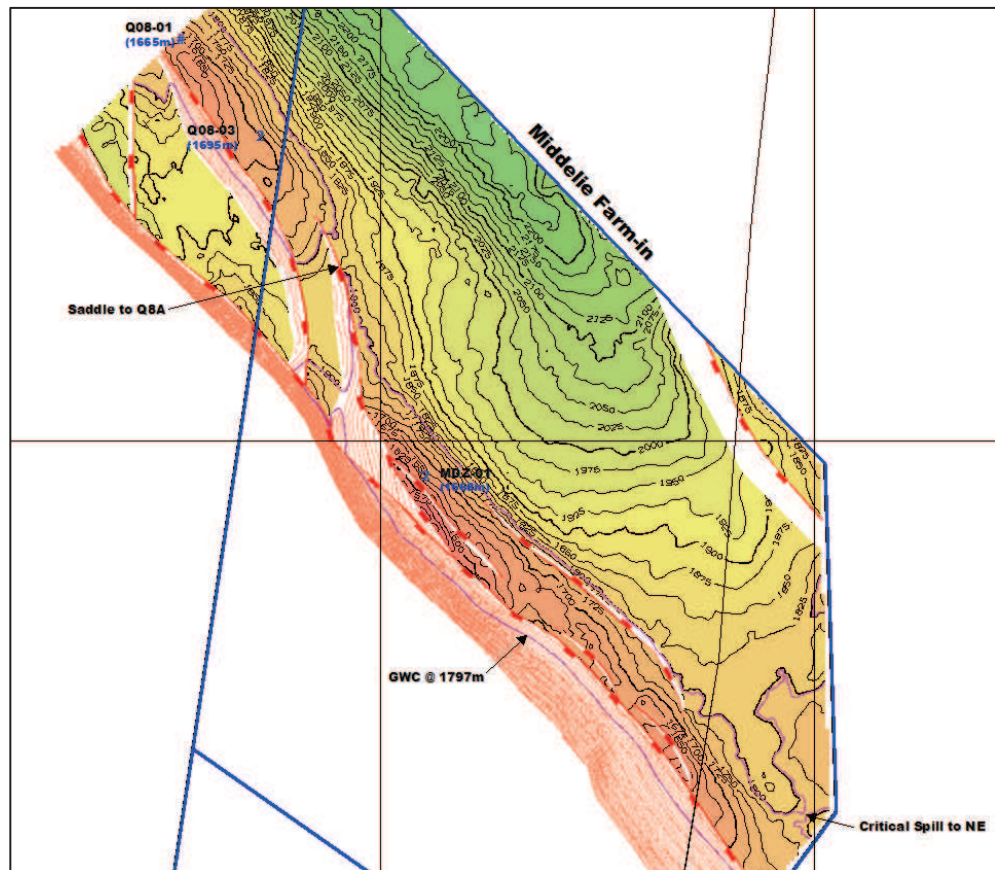


Figuur 2-2: Illustratie van het Volpriehausen reservoir in de boring MDZ-1. Het volledige reservoir is gekernd. Op de kern zijn kernanalyses uitgevoerd om porositeit en permeabiliteit te bepalen te zien in de laatste twee kolommen.

Parameter	waarde	eenheid	Bron / opmerking
GIIP	2500	mln m <sup>3</sup>	
RF	~ 11	%	
UR	280	mln m <sup>3</sup>	
Bruto dikte	40	m	WIPLA 2003
Netto dikte	33	m	Aanvullende info WIPLA
N/B	82	%	
Porositeit	~ 18	%	Gemiddelde van kernmetingen over netto interval
Permeabiliteit	~ 120	mD	Aritmetisch gemiddelde van kernmetingen over netto interval
P <sub>ini</sub>	176	bar	Aanvullende info WIPLA
P <sub>aanvang productie</sub>	142	bar	
P <sub>einde productie</sub>	25	bar	

Parameter	waarde	eenheid	Bron / opmerking
P <sub>abandonment</sub>	40	bar	
dP	151	bar	Druk depletie
$\mu$	0,0011	Pa/s	Water viscositeit
c	$5,0 \cdot 10^{-10}$	Pa <sup>-1</sup>	Water compressibiliteit
C <sub>m</sub>	$4,5 \cdot 10^{-6}$	1/bar	Compactie coëfficiënt / Oedometric compressibility
h	33	m	Netto Reservoir dikte
$\nu^*$	0,25	-	Poisson's ratio
z	1797	m	Diepte van de Formatie

Tabel 2-1 Reservoir en geomechanische eigenschappen van het Volpriehausen reservoir in het Castricum-Zee gasveld



Figuur 2-3. Dieptekaart van het Top-Volpriehausen (Wintershall B.V., 2003) met zadel tussen het Q8-A en Castricum-Zee gasveld.

De gasdruk van het Castricum-Zee gasveld was bij de ontdekking van het gasveld 142 bar. Het nabijgelegen Q8-A gasveld had een initiële gasdruk van 176 bar, en bevindt zich op ongeveer dezelfde diepte (top Q8-A structuur 1600m, top Castricum-Zee structuur 1550m) in dezelfde Volpriehausen Formatie. De initiële gasdruk van het Castricum-Zee gasveld zou, op basis van de diepte van het

gasveld en een gezamenlijk regionale aquifer, ongeveer even groot moeten zijn als die in het Q8-A gasveld. Het Castricum-Zee gasveld is gescheiden van het nabije Q8-A gasveld door een zadel waarin bovendien een breuk is gelegen. De diepte van het Gas-Water Contact (GWC) van de velden is niet eenduidig uit beschikbare rapportages te destilleren. Voor het Castricum Zee gasveld ligt de diepste sluitende contour op 1797m, in een schematische dwarsdoorsnede wordt 1760m als GWC gerapporteerd (Winningsplan Castricum-Zee 2003). In het Winningsplan Q8-A (2003) wordt gesteld dat het GWC tussen 1760 en 1975m ligt. RFT analyse van gegevens uit de putten Q8-A-01 suggereert dat het GWC op circa 1720m ligt in het Q8-A gasveld. Uit de RFT-metingen van MDZ-1 blijkt dat er een verschil zit tussen de drukmetingen in het reservoir, de Volpriehausen Zandsteen, en het bovenliggende pakket. Hieruit zou afgeleid kunnen worden dat er drukdaling van het reservoir heeft plaatsgevonden en dat mogelijk het GWC op circa 1735m ligt.

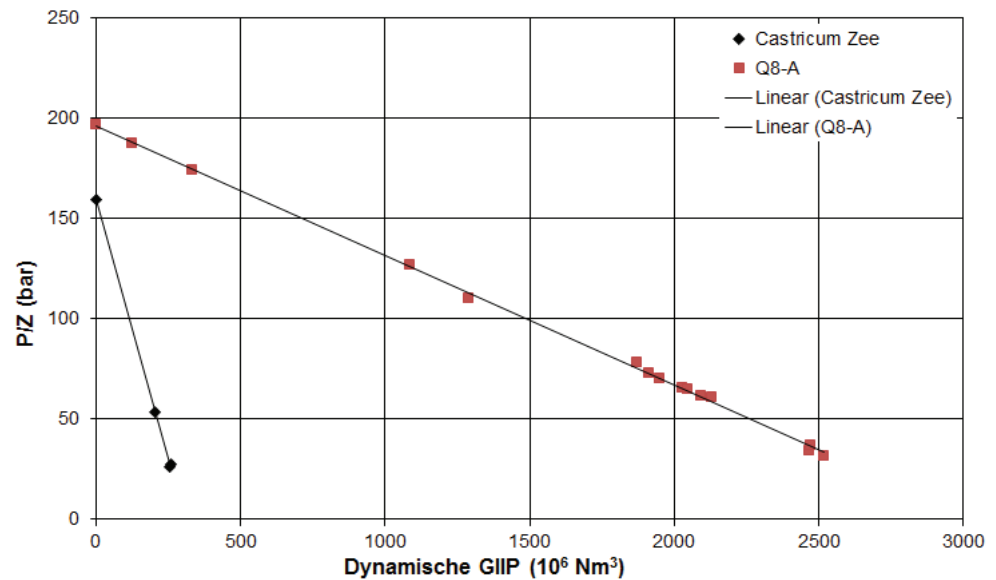
De productie in het Q8-A gasveld is eerder gestart (1986) en heeft waarschijnlijk geleid tot de drukdaling in het Castricum-Zee gasveld. Dit impliceert dat er drukcommunicatie tussen de twee velden bestaat. Drukcommunicatie is mogelijk enerzijds via een gedeelde aquifer onder de velden anderzijds via directe communicatie in de gaszone over het verbreukte zadel. (Figuur 2-3).

Om het Castricum-Zee gasveld in productie te nemen is in 2001 een lange gedeveierde put (putcode Q8-A-03) geboord vanaf het Q8-A platform (Figuur 2-1). Het Castricum-Zee gasveld is van 2001 tot 2004 geproduceerd. In april 2003 verwaterde de put, waarna Wintershall de put tot november 2004 verder heeft geproduceerd door de put regelmatig (dagelijks) in te sluiten. Door het insluiten van de put wordt de druk op de positie van put iets hoger (drukvereffening). Hierdoor zal het formatiewater wat door het produceren, in ieder geval lokaal (coning), omhoog is gekomen, door het toestromen van het gas weer weggedrukt worden. Na insluiting kan zo weer gas geproduceerd worden tot het formatiewater weer naar de put is gestroomd / "geconed" en er weer water geproduceerd wordt.

De druk bij het stoppen van de productie van het Castricum-Zee gasveld was 25 bar. Uit het gasveld is in totaal 280 miljoen m<sup>3</sup> gas geproduceerd, op een geschat initieel volume van 2500 miljoen m<sup>3</sup>. Dit is maar circa 11% van het totale volume, dat, in combinatie met de drukdaling in het veld van 151 bar, impliceert dat niet het totale volume van het gasveld werd gedraineerd. In Figuur 2-4 zijn de P/Z curves van het Q8-A gasveld en het Castricum-Zee gasveld gegeven. De P/Z waarde versus cumulatieve productie zijn rechte lijnen wat geïnterpreteerd kan worden dat het veld geen druk "support" heeft van de aquifer of anderszins. De lijn van het Castricum-Zee veld laat zien dat er een beperkt gasvolume (dynamische GIIP) door de productieput gezien wordt (zie ook paragraaf 5.4) in relatie met de statische GIIP die bepaald is op basis van de kartering en circa 2,5 mld m<sup>3</sup> is (Tabel 2-1). Dit vertaalt zich in bovengenoemde lage winbaarheidsfactor van het veld. Er zou geconcludeerd kunnen worden dat het Castricum Zee veld, op productie tijdschaal, is gecompartmentaliseerd en dat enkel het noordwestelijke puntje is gedraineerd (zie ook Figuur 5-3). De precieze locatie van de interne begrenzing (permeabiliteits-obstructie) is niet eenduidig te bepalen. De kaart van Figuur 3-4 met het "variance" signaal geeft ter hoogte van de locatie van de bevingen een verstoring in de continuïteit van de gekarteerde horizon, die die obstructie zou kunnen vormen.

Beide gasvelden zijn in 2011 definitief verlaten. Bij de verlating van het gasveld in 2011 was de druk in het veld inmiddels weer opgelopen tot 40 bar (@ 1760 m

referentie diepte)<sup>1</sup>. De bron van deze druksuppletie kan enerzijds de onderliggende aquifer anderzijds het naastliggende nog onder hogere druk staande, gas gevulde zuidoostelijke compartiment zijn.



Figuur 2-4. P/Z curves voor het Q8-A en het Castricum-Zee gasveld

## 2.2 Mijnbouwactiviteiten in de omgeving

De productie uit het Castricum-Zee veld is gestart in 2001 en in 2004 gestaakt. In het nabij gelegen Q8-A gasveld is de productie gestart in 1986 en ook hier is de productie in 2004 gestaakt.

Circa zes kilometer in zuidoostelijke richting van de bevingshaarden zijn in 2013 de putten HEK-GT-01 en HEK-GT-02, nabij Heemskerk, geboord. Hierbij zijn relatief grote spoelingsverliezen opgetreden in de periode 22 april 2013 tot 12 juni voor HEK-GT-1. Bij het boren van de put HEK-GT-2 zijn twee maal grote spoelingsverliezen opgetreden op 13 november en op 18 november 2013.

## 2.3 Castricum-Zee aardbevingen

In oktober en november 2013 zijn er in totaal zes aardbevingen geregistreerd in de nabijheid van het Castricum-Zee gasveld (Tabel 2-2). In die tijd waren de mijnbouwactiviteiten op het Castricum-Zee gasveld al een aantal jaren gestaakt. De bevingen zijn geregistreerd in de waarnemingsstations bij Bergen, Warmenhuizen en Otterleek (Figuur 2-5). In de onderstaande Tabel 2-2 is de informatie van de bevingen gegeven zoals door KNMI publiek is gemaakt. Volgens het KNMI vonden beide bevingen plaats in het relatief ondiepe geologische bereik, tussen de één en de vier à vijf kilometer diep. De bevingen in dit bereik worden door het KNMI standaard op 3 km weergegeven omdat dit de diepte is van de meeste gasvelden in

<sup>1</sup> Abandonment Programme Q8-A Wells. Wintershall.2011.

Nederland. KNMI heeft in de weken na de bevingen geen meldingen binnen gekregen dat personen in de regio de bevingen hebben gevoeld.

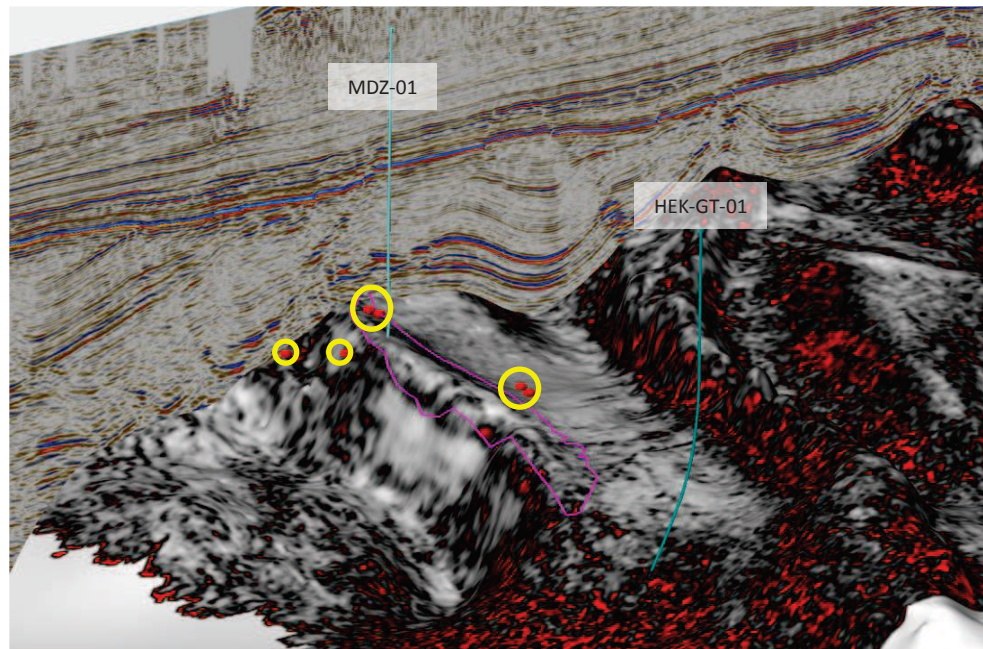
YYYY MM DD	Tijdstip	Locatie	LAT	LON	Diepte (km)	Magnitude	Evaluatie methode
20131022	6:43:12	Castricum	52.55	4.59	3	2.5	manual
20131023	2:09:36	Castricum	52.56	4.59	3	2.0	manual
20131027	23:16:48	Noordzee	52.56	4.55	3	1.8	manual
20131105	20:38:24	Noordzee	52.57	4.53	3	1.7	manual
20131128	16:33:36	Noordzee	52.57	4.55	3	1.7	manual
20131128	1:40:48	Noordzee	52.57	4.55	3	1.4	manual

Tabel 2-2: Aardbevingsinformatie van KNMI.





De ondergrond van Nederland heeft een gelaagde opbouw. Tot diep in de Nederlandse ondergrond zijn sedimentaire gesteentelagen op elkaar gestapeld. Figuur 2-6 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 Hoofdstuk 3). 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 een dergelijk laagvlak. Dit laagvlak vertegenwoordigt de basis van de Boven Trias gesteentepakketten (nabij de top van het reservoir van het Castricum-Zee gasveld) en ligt tussen 1600 tot 3000 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 rode bolletjes geven de locatie van de aardbevingshaarden geprojecteerd op het laagvlak op een diepte van circa 2 km onder maaiveld. Er is duidelijk te zien dat deze aardbevingshaardlocaties nabij het Castricum-Zee gasveld en in vier gevallen in een breukzone plotten.



Figuur 2-6: 3-D figuur van de opbouw van de ondergrond rond het Castricum-Zee gasveld. De rode bolletjes (in de gele cirkels) geven de locaties van de aardbevingshaarden geprojecteerd op het basis Boven-Trias laagvlak. De roze lijn geeft de positie van het Castricum-Zee gasveld aan waar de gesteenten van de “Lower Volprieausen” laagpakket het gasreservoir vormen. De blauwe verticale lijntjes zijn de puttrajecten van de putten MDZ-1 en HEK-GT-1.

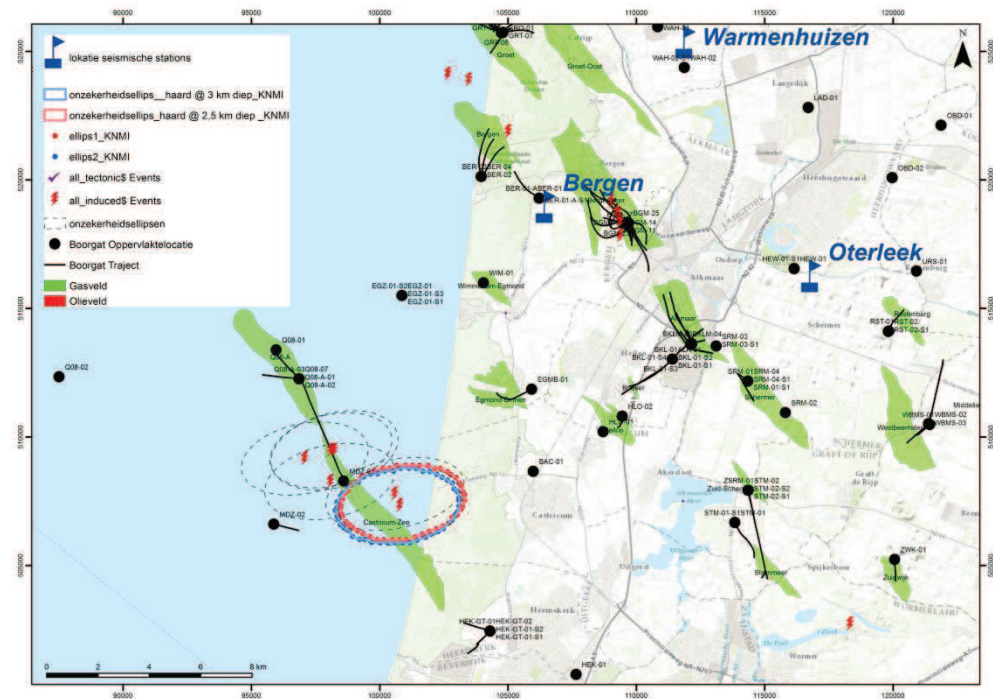
In de productieperiode van de twee gasvelden Q8-A en Castricum-Zee zijn er in de directe omgeving geen aardbevingen geregistreerd. Dit in tegenstelling tot de meer noordwestelijk gelegen gasvelden Q4-A en Q4-B. Daarnaast zijn aardbevingen geregistreerd in en nabij de Bergen en Bergermeer gasvelden. Ook zijn er drie bevingen geregistreerd in de ruime omgeving die relatief ver van gasvelden zijn gelokaliseerd. De beving bij Beverwijk in 1997 is door KNMI gelabeld als een natuurlijke/tektonische beving terwijl de bevingen bij Purmerend en Polder-Wormer gelabeld zijn als geïnduceerde bevingen (zie ook Bijlage 1: Gasveld en aardbeving correlatie).

## 2.4 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. Omdat de aardbevingen op grote afstand en excentrisch liggen ten opzichte van de seismische stations is de plaatsbepaling vrij onzeker.

Bij de bepaling van de aardbevingshaarden moet rekening gehouden worden met een aantal onzekerheden. Zo zijn er onzekerheden bij: het bepalen / interpreteren van de aankomsttijd van het signaal bij een seismisch station en in het gebruikte seismische snelheidsmodel van de ondergrond. Het KNMI heeft per aardbeving een onzekerheidsellips bepaald (Figuur 2-7). Deze ellips geeft het gebied aan waarin met circa negentig procent zekerheid de aardbevingshaard is gelokaliseerd. Op verzoek van TNO-AGE heeft KNMI ook de onzekerheidsellips gegeven van een van de bevingen als de haarddiepte op 3 km wordt gesteld en een als de haard diepte op 2,5 km wordt gesteld.

Indien verondersteld wordt dat de aardbevingshaard op 2,5 km i.p.v. 3 km diep ligt dan verschuiven de haardlocaties circa 250 m naar het noordwesten (Figuur 2-7). De onzekerheidsellipsen schuiven dan mee wat resulteert in een verschuiving van de onzekerheidsellips (van de blauwe naar de rode ellipspositie in Figuur 2-7).



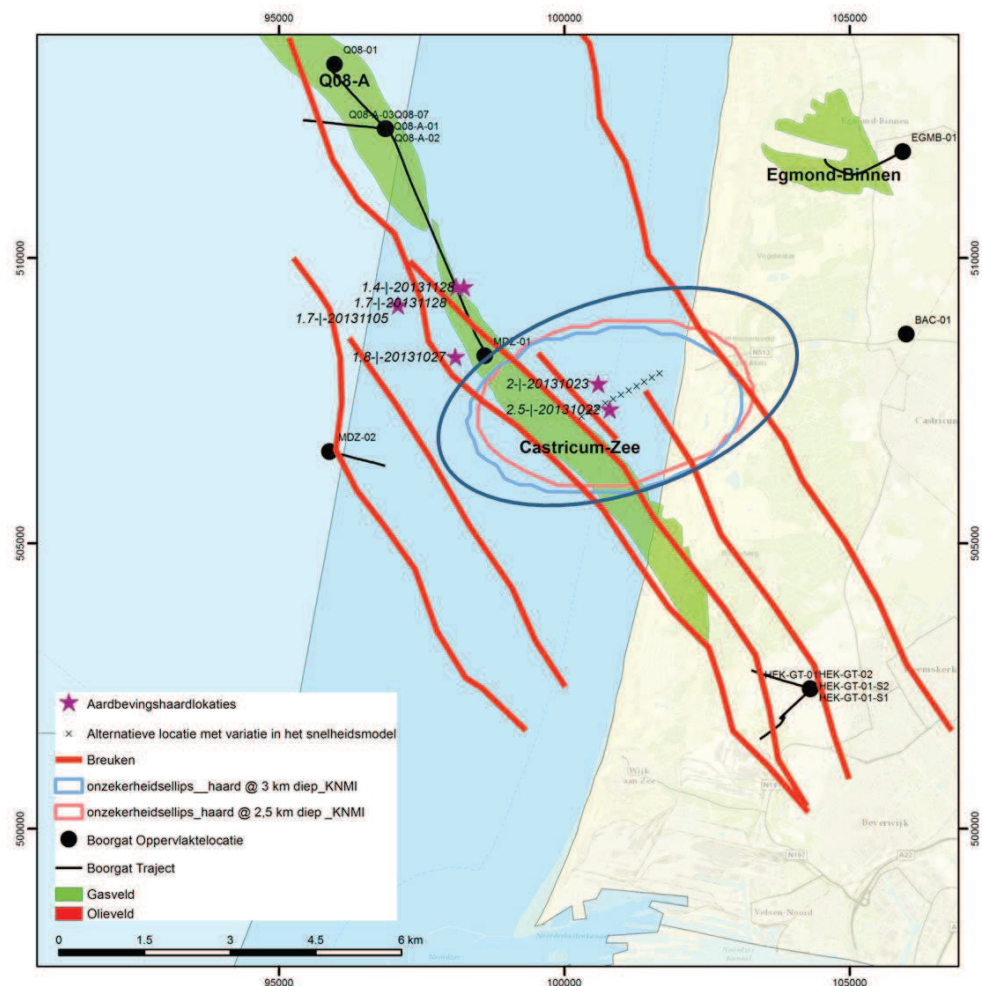
Figuur 2-7: Locatie kaart van de gasvelden bevingen en seismische stations.

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 wel een verschuiving in de locatie van de aardbevingshaard veroorzaken maar niet in de mismatch 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 relatief ondiepe bevingen, bij voorbaat door het KNMI gefixeerd, in dit geval op 3km.

In het gebruikte ondergrondmodel zitten ook intervalsnelheidswaarden van de zeer diepe (>5 km) lagen 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 onzekerheidsellipsen meegenomen. Als bijvoorbeeld als de snelheid van de diepste lagen met 5% onzekerheid wordt omgeven dan verschuift de aardbevingshaard circa 1 km naar het noordoosten of zuidwesten. Vijf procent reductie in seismische snelheid valt ruim binnen de onzekerheidsbandbreedte van deze schattingen (Van Dalen et al., 2006).

In deze situatie lijken de aardbevingshaarden ongeacht welke onzekerheidsellipsen genomen wordt, te kunnen worden gelokaliseerd op een van de randbreuken van het Castricum-Zee gasveld. Voor de drie bevingen van november 2013 valt ook het gasveld Q8-a binnen de onzekerheidsellipsen.

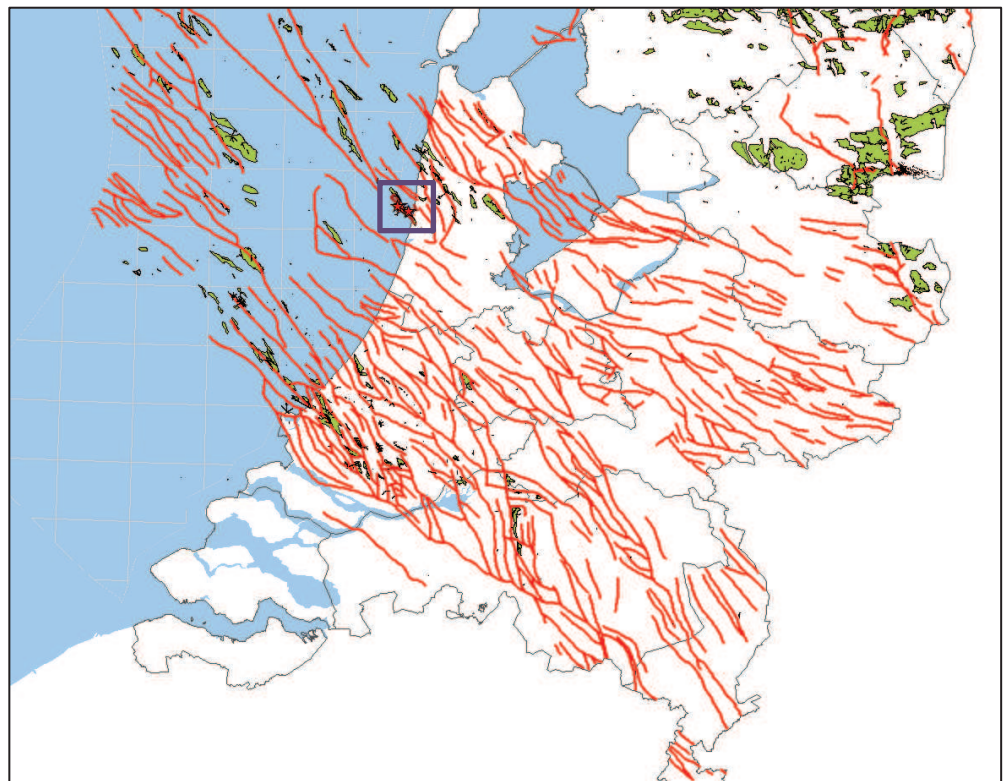


Figuur 2-8: Aardbevingslocatie met variaties in het gebruikte snelheidsmodel. De donker blauwe ellips is de omhullende van de "standaard" ellipsen rond de meest uiteen liggende even waarschijnlijke haardlocaties. De bevingen zijn geannoteerd met de magnitude en datum van de beving (DDMMYYYY)

### 3 Geologie van de diepe ondergrond van het gebied rond het Castricum-zee gasveld en de Castricum-Zee aardbevingen.

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

#### 3.1 Regionale breuken

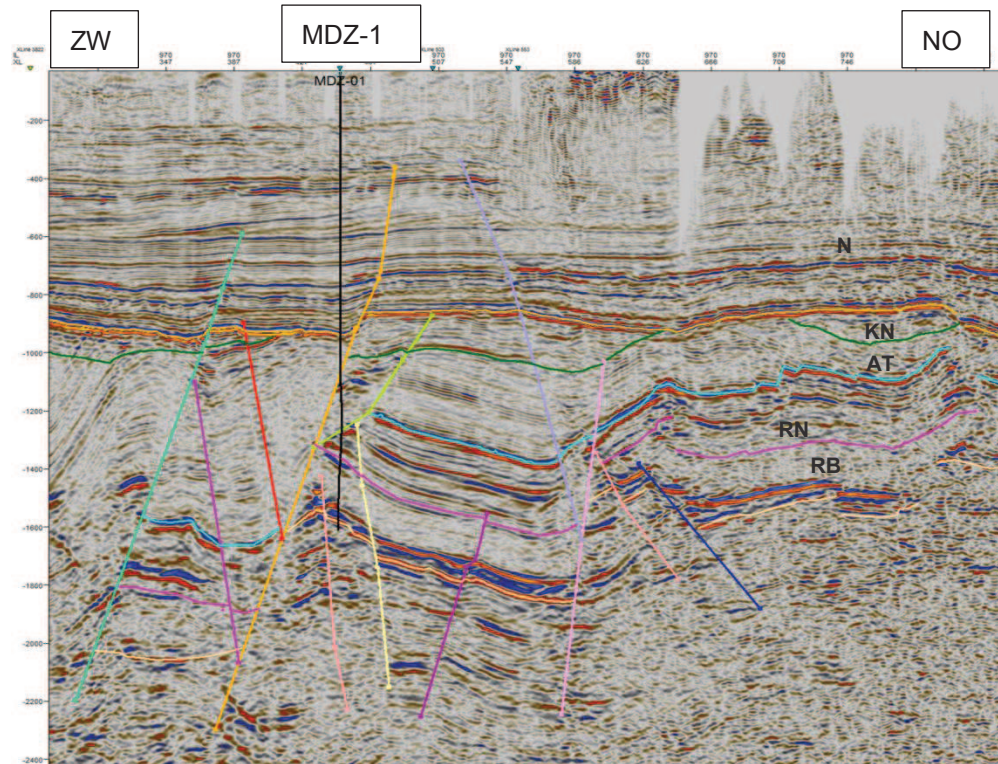


Figuur 3-1. Regionale breuken op het niveau van Onder-Trias. Het paarse vierkantje geeft de locatie van het Castricum-Zee gasveld aan.

Figuur 3-1 laat de regionale breuken in Nederland op het niveau van het Onder-Trias zien (gekarteerd door TNO). De breuken hebben een zuidoost-noordwest patroon. Het Castricum-Zee gasveld bevindt zich in het Volpriehausen Zandsteen Laagpakket, wat onderdeel is van het Onder-Trias.

### 3.2 Geologische opbouw van de regio Castricum-Zee

De geologische opbouw van de ondergrond kenmerkt zich door een duidelijke gelaagdheid (Figuur 3-2).

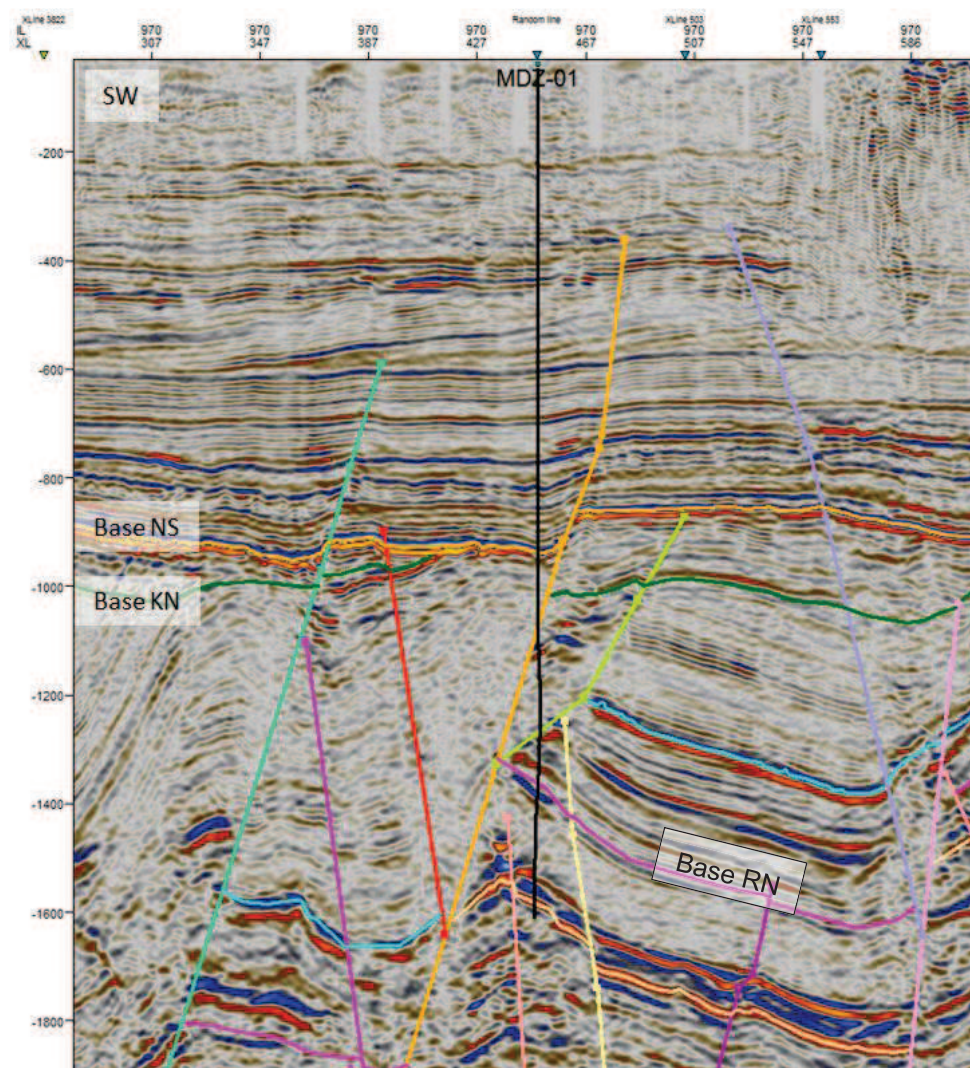


Figuur 3-2: Een seismische sectie in NO-ZW richting met de geïnterpreteerde breuken langs het put-traject MDZ-1 en door een van de KNMI gepostuleerde bevestigingslocaties. Voor de locatie van de lijn zie Figuur 3-4.

De ondiepe laagpakketten (tot ca 1000 m) behoren tot de lithostratigrafische Noordzee Groep (N). In dit gebied bestaan deze laagpakketten uit niet gelithificeerde klei en zand sedimenten. Onder de Noordzee Groep liggen de sedimenten van de Rijnland Groep. Dit zijn klei- en zandstenen. De Krijtkalk sedimenten zijn in dit gebied niet meer aanwezig omdat deze volledig ge-erodeerd zijn. De sedimenten van de Rijnland Groep liggen met een duidelijke hoekdiscordantie op oudere sediment pakketten. Deze laatste behoren (van jong naar oud) tot laagpakketten van de Altena Groep (AT) van Vroeg Daaronder komen de gesteentepakketten van de Boven Trias (RN). Het reservoir is onderdeel van de Volpriehausen Formatie dat hier vlak onder de basis van de Boven Trias (RN) Laagpakketten ligt (paarse lijn).

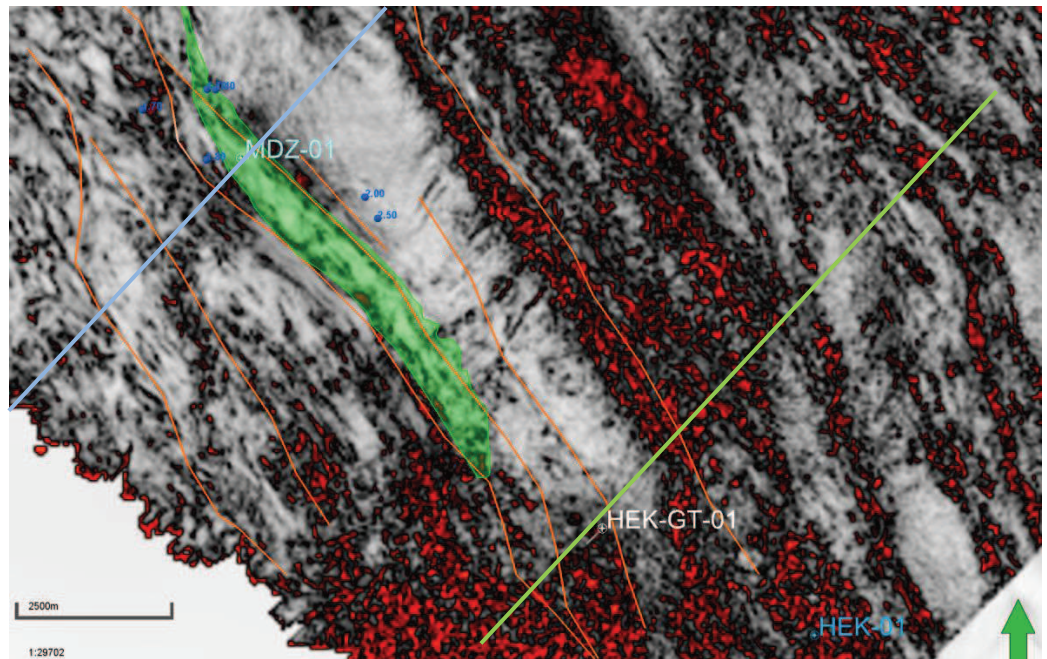
Naast de gelaagdheid van de diepe ondergrond is ook duidelijk te zien dat deze gelaagdheid verstoord is (Figuur 3-2). Niet alle laagpakketten liggen horizontaal zoals origineel bij en direct na afzetting van de sedimenten het geval is geweest. Vanaf de Noordzee Laagpakketten zijn de lagen geplooid en zoals eerder genoemd hebben sommige laagpakketten een (hoek)discordante relatie met het onderliggende pakket.

Ook worden de laagpakketten door een complex systeem van breuken doorsneden. Langs de meeste van de breuken worden de laagpakketten verzet. In de dwarsdoorsnede wordt de complexe breukarchitectuur geïllustreerd in Figuur 3-3.



Figuur 3-3. Zuidoost-Noordwest doorsnede van het Castricum-Zee gasveld (detail Figuur 3-2), gemaakt met Petrel. De oranje breuk is de westelijke randbreuk van het gasveld. De roze horizon geannoteerd met Base RN is nabij top Volpriehausen reservoir. De doorsnede is circa 9,5 km breed.

Figuur 3-4 geeft de complexe breukconfiguratie in kaartbeeld weer door middel van een variantiekaart. Het verzet van de zuidwestelijke randbreuken van het Castricum-Zee gasveld is bijzonder groot: vele malen de reservoirdikte van het Volpriehausen reservoir.

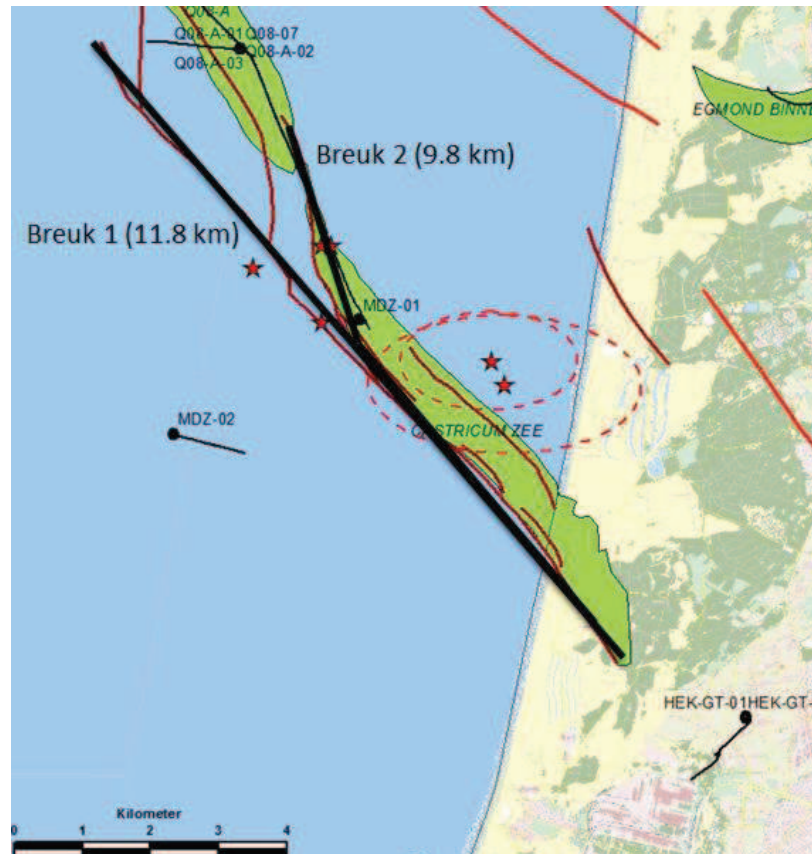


Figuur 3-4: Basis Boven Trias horizon met daarop het "variance" signaal geplot. Grijs betekent ongestoorde continue horizon; rood en zwarte kleuren betekend dat de continuïteit van de horizon is verstoord door bijvoorbeeld breuken. De rode lijnen geven de positie van de breuken weer zoals geïnterpreteerd op de seismiek. Blauwe lijn geeft de doorsnede van Figuur 3-2 aan en de groene lijn geeft de doorsnede van Figuur 5-7 aan.

### 3.2.1 *Breuken rondom het Castricum-Zee gasveld*

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 is bijzonder lastig de aard van de breuken te bepalen. Het feit dat de Q8-A en het Castricum-Zee gasvelden met elkaar in drukcommunicatie staan, op productie tijdschaal, bevestigt enerzijds dat de aquifers van beide gasvelden met elkaar in contact staan en anderzijds dat eventuele breuken op deze locatie open staan (zie ook Figuur 3-5 & Figuur 3-6).

Figuur 3-5 zoomt in op het gebied rondom het Castricum-Zee gasveld. Uit deze breuk interpretatie blijkt dat aan de zuidwestkant het Castricum-Zee gasveld begrensd wordt door twee grote breuken, die elkaar overlappen. Een circa 11,8 kilometer lange breuk die noordwest-zuidoost georiënteerd is, en een circa 9,8 kilometer lange breuk die begint op de grens met het Q8-A gasveld en aantakt op de randbreuk langs het Castricum-Zee gasveld. Dit zijn de breuken zoals door Wintershall op de kaart getekend. Kartering van TNO-AGE (Figuur 3-6) laat zien dat de breuken in zuidoostelijke richting doorlopen.



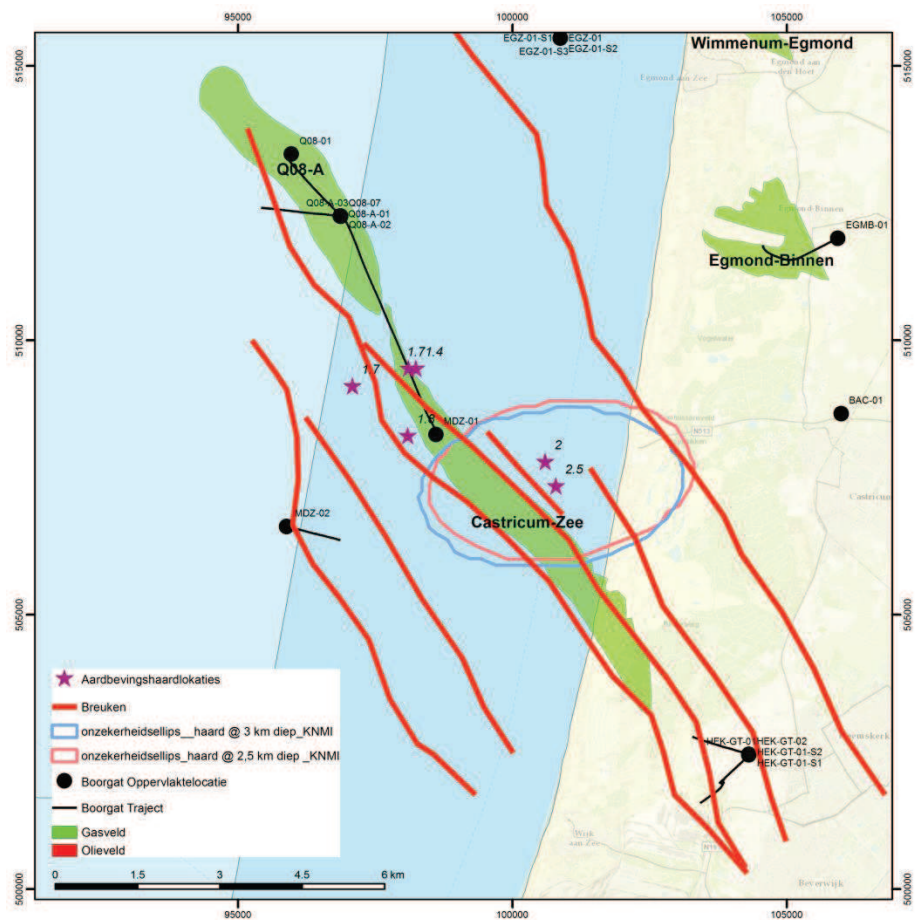
Figuur 3-5. Overzichtskartaal van het Castricum-Zee gasveld met de randbreuken. N.B. De breuken in en direct grenzend aan het Castricum-Zee gasveld zijn niet geïnterpreteerd door TNO, maar door Wintershall. De ellipsen geven de onzekerheid weer van de locaties van de bevingen zoals bepaald door het KNMI.

Figuur 3-6 geeft hetzelfde gebied maar dan met een indicatie van het breukpatroon uit de TNO-AGE evaluatie. Doordat de ondergrond bijzonder complex vervormd is, zijn interpretatieverschillen mogelijk. In grote lijnen komt het breukpatroon overeen. Uit Figuur 3-6 blijkt dat de noordelijke randbreuk van het gasveld de boortrajecten van de HEK-GT-1 en HEK-GT-2 in het zuidoosten snijden.

De dip van de zuidwestelijke randbreuk is bepaald met behulp van Petrel. Hieruit volgt een dip van circa 50°.

De noordoostzijde van het gasveld wordt niet direct begrensd door een breuk (zie Figuur 3-3). Er is wel een breuk aanwezig net ten noordoosten van het Gas-Water contact (GWC). Het is onduidelijk tot hoever deze breuk doorloopt. Het gasveld is aan de noordoostzijde in contact met een aquifer. De afstand van deze aquifer vanaf de noordoostzijde van het gasveld tot aan de breuk is minimaal 3,3 km. Het is onduidelijk of deze breuk wel of niet doorlatend is en of de aquifer door deze breuk wordt begrensd.





Figuur 3-6: Breukconfiguratie in en rond het Castricum-Zee gasveld volgens TNO-AGE evaluatie. De onzekerheid van locaties van de bevingen zijn weergegeven als ellipsen, zie ook legenda.

## 4 Natuurlijke seismiciteit

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 dat langs die breuken dus geen aardbevingen kunnen ontstaan door een natuurlijk mechanisme. De argumentatie hiervoor is dat er lange tijd (in de historisch bekende tijd) geen bevingen zijn geobserveerd. Verder geeft de ervaring met gasproductie aan dat significante depletie moet plaatsvinden voordat bevingen kunnen worden geïnduceerd (Van Eijs et al., 2006, Van Thienen-Visser et al., 2012).

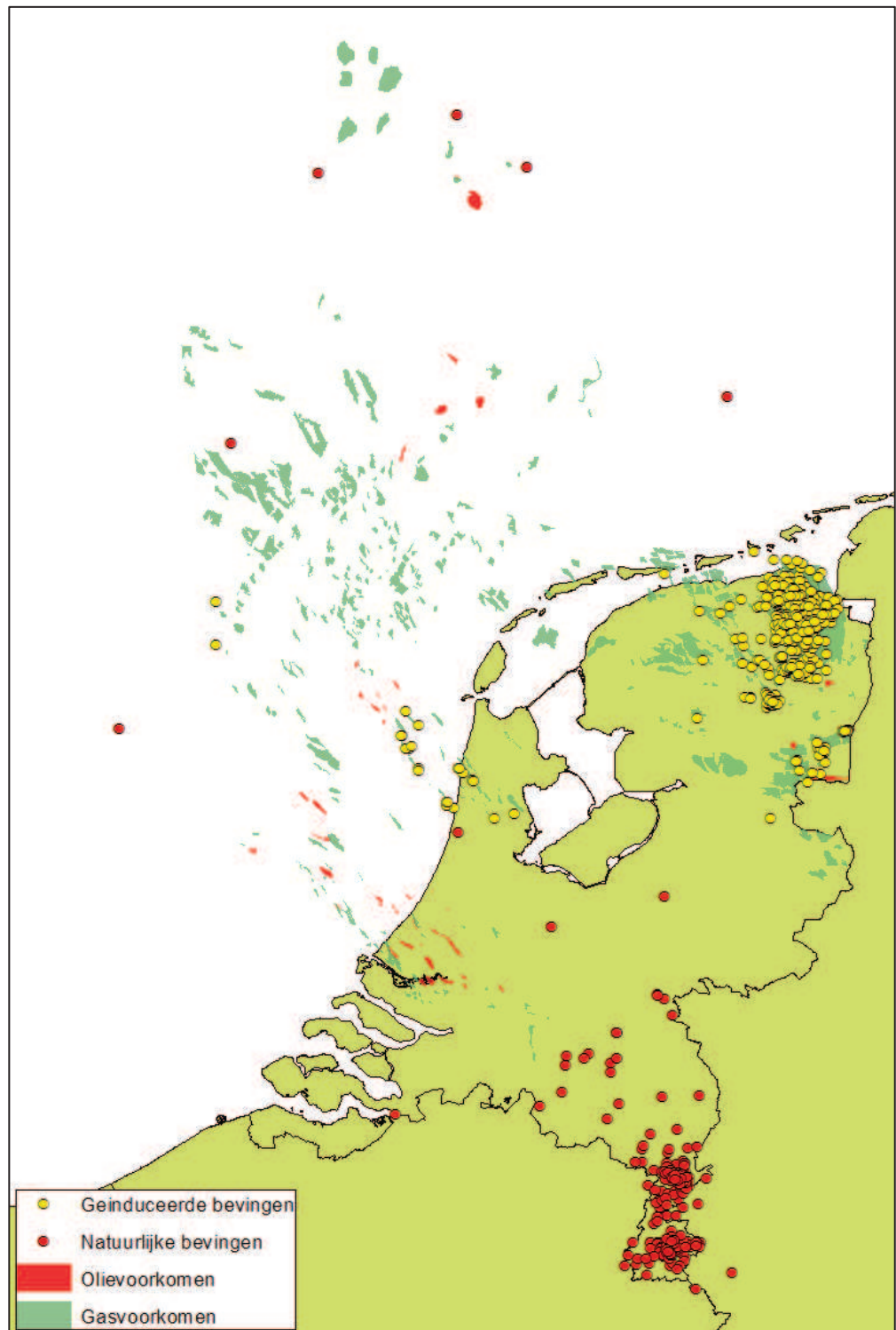
Bij de regionale kartering van de diepe ondergrond van Nederland zijn veel grote breuken gekarteerd (Figuur 3-1). Een aantal van deze breuken is nog van nature actief, zoals de Peel randbreuk<sup>2</sup>. In Figuur 4-1 is een aantal natuurlijke bevingen in kaart gebracht. De meest noordelijke beving die door KNMI als natuurlijke beving is aangemerkt in de omgeving van Castricum-Zee is die van 1997 bij Beverwijk. Het betreft een beving uit de tijd dat het seismische meetnet in Nederland minder uitgebreid was tegenwoordig. Voor de beving Beverwijk is geen onzekerheidsellips beschikbaar. Aangezien de locatie van de beving van Beverwijk meer dan 20 km weg ligt van mijnbouwactiviteiten is het niet waarschijnlijk dat deze beving geïnduceerd is door mijnbouwactiviteiten. Een mogelijke andere oorzaak van deze Beverwijk bevingen is eventuele ontpoldering dan wel grote lokale veranderingen in grondwaterstanden in deze regio. Het is bekend dat veranderingen in grondwaterstanden, plaatsen van grote hoeveelheden water achter een dam of het draineren van grote meren bevingen kunnen veroorzaken (zie bijvoorbeeld González et al., 2012). De relatie van de bevingen met ontpoldering of grote grondwaterstand verandering valt buiten het bereik van deze studie (zie Inleiding).

De locatie van de beving nabij Beverwijk uit 1997 is op of nabij een grote NW-ZO lopende breuk parallel lopend aan de randbreuken van het Castricum-Zee gasveld.

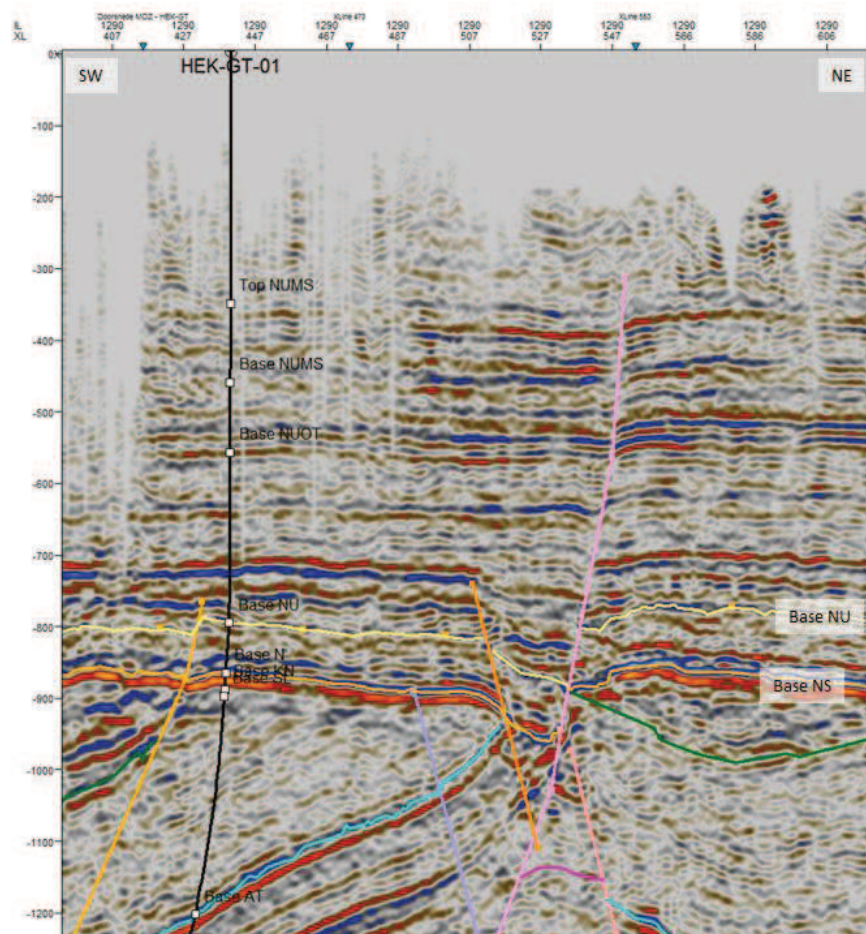
Seismisch karteerbare breuken zijn waarneembaar tot een tijd-diepte van 300 ms (Figuur 4-2). Dit komt overeen met de lagen van de Maassluis Formatie uit het Vroeg Pleistoceen. Deze lagen hebben een ouderdom van tussen de 2 en 3 miljoen jaar. Dit geeft aan dat deze breuken tot 2-3 miljoen jaar geleden actief waren. Het is hierdoor niet uit te sluiten dat de grote breuken in de regio Castricum-Zee 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.

---

<sup>2</sup> ([http://nlog.nl/resources/NCP-1/depth%20maps/pdf/Zechstein\\_depth\\_version1-12-06.pdf](http://nlog.nl/resources/NCP-1/depth%20maps/pdf/Zechstein_depth_version1-12-06.pdf)).



Figuur 4-1. Aardbevingen in Nederland: periode 1904-2014



Figuur 4-2: Seismische sectie met een breuk interpretatie die doorloopt tot ver in de Noordzee Groep. De laagpakketten die verzet zijn liggen op circa 300 ms diep. Naar schatting zijn dat lagen die enkele miljoenen jaar geleden zijn afgezet. De breuk is sindsdien seismisch actief geweest.

## 5 Geomechanische evaluatie van het Castricum-Zee gasveld in relatie tot mijnbouwactiviteiten

Aardbevingen ontstaan als de spanning in de ondergrond op een bepaald plek een drempelwaarde overschrijdt en er een “trigger” is om de opgebouwde spanning te ontladen. Onderstaande paragrafen gaan in op de kritische spanningsopbouw langs breuken en de mogelijke hypothesen voor de bevingen nabij Castricum-Zee.

### 5.1 Regionaal spanningsveld

Het spanningsveld wordt bepaald door de drie hoofdspanningen. Het gebied is in extensie, wat betekent dat de grootste spanning de verticale spanning ( $\sigma_v$ ) is, en de minimale en maximale horizontale spanning (normaal regime) lager zijn dan de verticale spanning ( $\sigma_v \geq \sigma_{Hmax} \geq \sigma_{Hmin}$ ). De extensie vindt plaats in noordoost-zuidwestelijke richting ( et. al., 2008). De strekking van de regionale breuken is loodrecht op de richting van de extensie. De minimale horizontale spanning ( $\sigma_{Hmin}$ ) is loodrecht op de strekking van de regionale breuken, de maximale horizontale spanning ( $\sigma_{Hmax}$ ) is parallel aan de strekking van de breuken.

Omdat het Castricum-Zee gasveld relatief dicht bij het Bergermeer veld ligt, wordt uitgegaan van eenzelfde (initiële) spanningstoestand. Uitgaande van dichtheidslogs van het Bergermeer veld is de verticale spanningsgradiënt 22,6 MPa/km. Een spanningsratio  $K_0$  van 0,65 wordt gehanteerd ( et. al., 2008), waarbij:

$$K_0 = \frac{\sigma_{Hmin}}{\sigma_v}$$

De minimale horizontale spanningsgradiënt die hieruit volgt is 14,7 MPa/km. De maximale horizontale spanningsgradiënt is onbekend, maar ligt tussen 22,6 en 14,7 MPa/km gegeven het normale regime in Nederland.

Wanneer een gasveld wordt gedepleteerd verandert de spanningstoestand. De verticale spanning blijft constant, maar de horizontale spanning ( $\Delta\sigma_h$ ) verandert ten gevolge van de gasdepletie ( $\Delta P$ )

$$\Delta\sigma_h = \alpha \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) \Delta P$$

Waarbij  $\alpha$  de Biot constante is, wat de ratio beschrijft van de volumeverandering van het poriënvolume en de volumeverandering van het gesteente, ten gevolge van het wegstromen van de vloeistof in de poriëruimte.  $\nu$  is de Poisson's ratio, en:

$$\gamma_h = \alpha \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) = \frac{\Delta\sigma_h}{\Delta P}$$

de ratio tussen de verandering in horizontale spanning en de verandering in poriëndruk.

Bovengenoemde spanningen zijn de totale spanning. Gebaseerd op Terzaghi's principe van effectieve spanning kan de totale spanning onderverdeeld worden in de effectieve spanning die werkt op het reservoir gesteente en de poriëndruk (die een deel van de totale spanning draagt). De verandering in effectieve spanning die optreedt door depletie veroorzaakt deformatie van (reservoir)gesteente.

$$\sigma'_v = \sigma_v - P_f$$

$$\sigma'_{hmin} = \sigma_{hmin} - P_f$$

Waarbij  $\sigma'_v$  de effectieve verticale spanning is,  $\sigma'_{hmin}$  de effectieve minimale horizontale spanning en  $P_f$  de poriëndruk (in dit geval de gasdruk).

	Initiële spanning (bar)	Na depletie (bar)
<b>Verticale spanning (<math>\sigma_v</math>)</b>	377	377
<b>Effectieve verticale spanning (<math>\sigma'_v</math>)</b>	201	352
<b>Minimale horizontale spanning (<math>\sigma_{hmin}</math>)</b>	245	129
<b>Effectieve horizontale spanning (<math>\sigma'_{hmin}</math>)</b>	69	104
<b>Gasdruk* (<math>P_f</math>)</b>	176	25

Tabel 5-1. Waardes voor de spanningen op reservoirniveau (in bar). \* Voor de initiële druk is de druk van het Q8-A gasveld aangenomen.

Voor het Bergermeer veld is een  $\gamma_h$  van 0,77 gehanteerd (Muntenbos et al., 2008). Uitgaande van eenzelfde waarde voor  $\gamma_h$  voor het Castricum-Zee gasveld, zijn de spanningen berekend voor de spanningstoestand na depletie. De spanningen op reservoirniveau (1670 m), uitgaande van de genoemde gradiënten, zijn in Tabel 5-1 voor de initiële toestand en de toestand na depletie weergegeven.

## 5.2 Reactivatiepoteentieel van de breuken nabij het Castricum-Zee gasveld

Voor de breuken in het Castricum-Zee gasveld is het initiële reactivatiepotentieel geanalyseerd. Dit is eerder gedaan voor het Groningen gasveld (TNO, 2013). Het initiële reactivatiepotentieel ('slipneiging', Engels: 'slip tendency') van een breuk geeft de initiële verhouding van de schuifspanning en de effectieve normaalspanning op het breukvlak voor depletie van het reservoir:

$$ST = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

Waarbij  $\sigma_n$  de effectieve normaalspanning (Pa) op de breuk is en  $\tau$  de schuifspanning (Pa) op de breuk.

De sterkte van een breuk kan worden beschreven door het 'Mohr Coulomb sterkte' criterium:

$$\tau_{\max} = C + \sigma_n \tan \varphi$$

Waarbij C de cohesie (Pa),  $\varphi$  de frictiehoek (°) en  $\tau_{\max}$  de schuifspanning (Pa) is, waarop de sterkte van de breuk wordt overschreden en 'failure' of slip op de breuk optreedt. Voor een cohesieloze breuk ( $C=0$  Pa) met een frictiehoek van 30° (Byerlee, 1978) treedt slip op bij een reactivatiepotentieel van  $ST=0,58$ .

De randbreuk die noordwest-zuidoost loopt (breuk 1, Figuur 3-5), heeft een dip van ongeveer 50°. De strekking van de breuk is parallel aan de maximale horizontale spanning. Hierdoor heeft de breuk het maximale reactivatiepotentieel. Het reactivatiepotentieel van de randbreuk (breuk 1) is 0,51.

De grootte van de maximale horizontale spanning is niet bekend, maar moet omdat het gebied in extensie is ( $\sigma_v \geq \sigma_{Hmax} \geq \sigma_{Hmin}$ ) tussen de verticale spanning en de minimale horizontale spanning liggen. Dit is tussen 0,65 en 1 keer de verticale spanning. Hiermee kan een range voor het reactivatiepotentieel uitgerekend worden voor breuken die niet parallel aan de maximale horizontale spanning lopen.

De randbreuk die iets naar het noorden (~18°) afbuigt (breuk 2) heeft een reactivatiepotentieel tussen 0,49 en 0,51, wanneer voor  $\sigma_{Hmax}$  respectievelijk 1 en 0,65 keer de verticale spanning wordt aangenomen.

Uit de analyse blijkt dat het reactivatiepotentieel van de breuken in het Castricum-Zee gasveld dicht bij het kritieke reactivatiepotentieel van 0,58 ligt voor een cohesieloze breuk met een frictiehoek van 30°. Daarbij moet worden opgemerkt dat de spanningscondities op de breuken lokaal kunnen verschillen. Bijvoorbeeld vanwege geometrische effecten omdat de dip of de oriëntatie van de breuk niet continu is, of door stijfheidsverschillen tussen de verschillende lagen. Tevens is bij een lagere frictiehoek het kritieke reactivatiepotentieel lager. Dit betekent dat de breuken in het initiële spanningsveld (dus voor depletie) kritisch gestrest of bijna kritisch gestrest zouden kunnen zijn.

In vergelijking met het maximale reactivatiepotentieel van de breuken in het Groningenveld van 0,40 (TNO, 2013), is het reactivatiepotentieel van de breuken in het Castricum-Zee gasveld hoger.

### 5.3 Breukreactivatie door gasdepletie

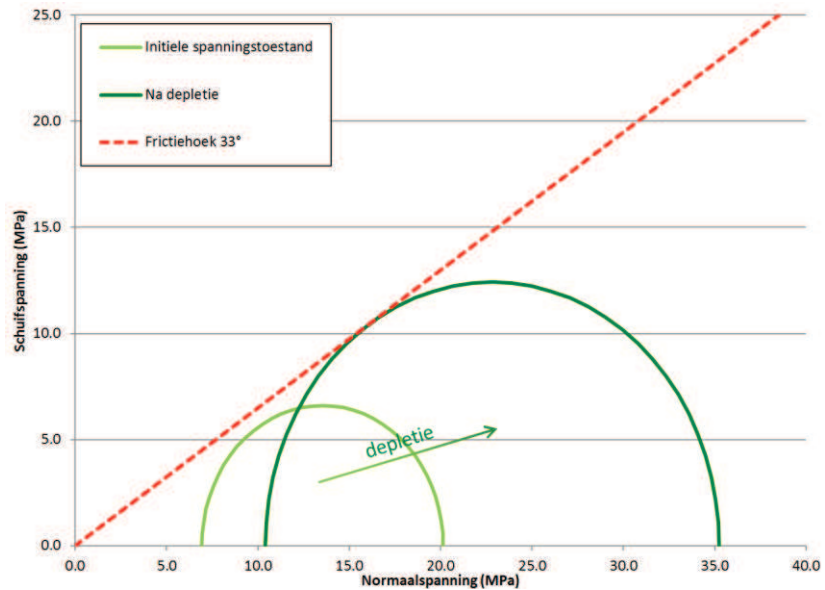
In 2006 is een deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland gepubliceerd ( et. al, 2006). Uit de update van deze studie in 2012 ( et. al, 2012), waarbij onder andere wordt gekeken naar de breuklengte en depletie van het gasveld, volgt dat het Castricum-Zee gasveld valt in de klasse 'verwaarloosbare' kans voor seismiciteit. Dit vanwege de relatief lage ratio van Young's modulus van het reservoir met de bovenliggende laag ( $E_{burden}/E_{res}=0.93$ ). De Young's modulus is per gesteentepakket gemiddeld genomen over heel Nederland en kan lokaal variatie vertonen.

In Tabel 5-1 staan de spanningen van voor en na depletie weergegeven, waarbij dezelfde spanningstoestand is aangenomen als voor het Bergermeer gasveld. Figuur 5-1 geeft de spanningstoestand en de verandering van het spanningsveld ten gevolge van de depletie van het Castricum-Zee gasveld grafisch weer in een Mohr-Coulomb diagram.

Voor aanvang van gasproductie bevindt het gasveld zich in de initiële spanningstoestand, weergegeven in lichtgroen. De frictiehoek (33°) is weergegeven

met de rode gestippelde lijn (Mohr-Coulomb faallijn). Wanneer het gasveld geproduceerd wordt, groeit de cirkel tot het de spanningstoestand bereikt waarin het zich na depletie bevindt, weergegeven in donkergroen.

De Mohr-Coulomb cirkel groeit zodanig dat de faallijn net wordt geraakt. Breuken met een kritische oriëntatie zouden dan kunnen falen. De initiële spanningstoestand ligt verder van de faallijn dan de toestand na depletie, wat betekent dat de spanningstoestand minder stabiel is geworden door de depletie van het gasveld.

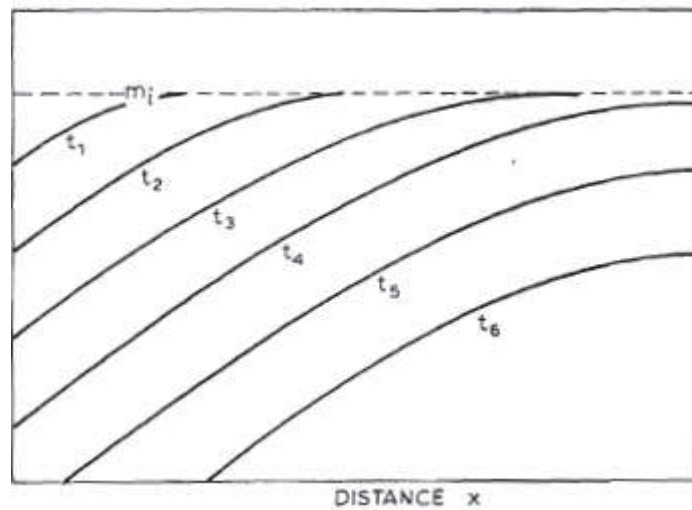


Figuur 5-1. Mohr-Coulomb diagram wat de verandering in spanningstoestand beschrijft door de depletie van het Castricum-Zee gasveld

#### 5.4 Drukdiffusie aquifer

De noordoost kant van het Castricum-Zee gasveld staat in verbinding met een aquifer. Een mogelijke verklaring voor de oorzaak van de aardbevingen nabij het Castricum-Zee gasveld is de vertraagde reactie van de aquifer op de drukdepletie in het gasvoerende deel van het reservoir. Door het vertraagd reageren van de aquifer zal de druk in de aquifer niet instantaan maar pas na een bepaalde tijd reageren op de drukdepletie. De tijdsvertraging op een bepaald punt is afhankelijk van de afstand tot de plaats waar onttrokken wordt. In Figuur 5-2 is dit grafisch weergegeven: aan de linkerkant vindt een drukverlaging plaats en de drukgolf die dit veroorzaakt verplaatst zich vervolgens door de aquifer.





Figuur 5-2. Voorbeeld van de verplaatsing van een drukgolf door een aquifer.

Wanneer de drukgolf op een bepaald punt is aangekomen, ontstaat er een zogenaamde 'semi steady state' waarin de druk in de aquifer uniform daalt volgens een e-macht. De tijdschaal  $t_{SSS}$  van de transitie naar deze semi steady state wordt gegeven door (Hagoort, 1988):

$$t_{SSS} = 0,2 L^2 \varphi \mu c / k$$

met:

$k$  = permeabiliteit [ $m^2$ ]

$\varphi$  = porositeit [-]

$\mu$  = viscositeit van het water [ $Pa \cdot s$ ]

$c$  = compressibiliteit van het water [ $Pa^{-1}$ ]

$L$  = afstand [ $m$ ]

Deze  $t_{SSS}$  geeft ook aan wanneer op een bepaalde afstand  $L$  de drukgolf voor het eerst wordt gevoeld.

#### Parameters

- De permeabiliteit van het reservoirgesteente is 120 mD, gebaseerd op circa 100 permeabiliteitsmetingen op het reservoirgesteente uit boring MDZ-01.
- De porositeit van het reservoirgesteente 18%, op basis van circa 100 kernmetingen op het reservoirgesteente uit boring MDZ-01.
- Met behulp van DoubletCalc is de viscositeit van het water met een zoutgehalte van 200.000 ppm op 1700 m diepte bepaald. De gevonden viscositeit bedraagt 0,0011 Pa·s.
- Voor de compressibiliteit van het water is  $5,0 \cdot 10^{-10} Pa^{-1}$  aangenomen.



Figuur 5-3. Locatie van de beving ten opzichte van het Castricum-Zee gasveld. De rode stippellijn is de onzekerheid in de plaatsbepaling. De roze polygoon geeft circa 11% van het totaal oppervlak van het gasveld om de productieput weer.

De afstand van het epicentrum van de bevingen tot de rand van het Castricum-Zee gasveld is circa 430 meter. Op deze afstand is  $t_{\text{SSS}}$  11 uur. Wanneer de onzekerheid van de plaatsbepaling wordt meegenomen is de afstand van de rand van het gasveld tot de bevingen maximaal 1970 meter. Op deze afstand is  $t_{\text{SSS}}$  9 dagen.

Aangezien maar 11% van het totale gasvolume in het Castricum-Zee gasveld werd geproduceerd kan geconcludeerd worden dat een klein gedeelte van het gasveld bereikt is met de productieput (de roze polygoon in Figuur 5-3 is 11% van het totale oppervlak van het gasveld wat, bij gelijke dikte van het reservoir, overeenkomt met 11% van het totale gasvolume). De maximale afstand van de onzekerheidsellips van de beving tot het gasveld wordt dan groter (maximaal circa 4 km, zie Figuur 5-3). Hierin zit een onzekerheid, omdat de gekozen vorm van het oppervlak wat de put kan bereiken hypothetisch is: het is onduidelijk hoe het depletievolumen rond de put verdeeld is. De polygoon is zo gekozen dat de afstand tot bevingen maximaal is; de afstand kan dus niet groter zijn dan 4 km. Op 4 kilometer afstand is de tijd waarop de aquifer een vertraagde response geeft  $t_{\text{SSS}}$  39 dagen. Dit is een te korte periode om de bevingen in 2013 te verklaren aangezien gasproductie in 2004 is gestopt.

De hypothese dat enkel de druk in het de onderliggende aquifer nog steeds aan het veranderen kan waarschijnlijk uitgesloten worden als mogelijke verklaring voor de bevingen die in 2013 zijn waargenomen. Ten opzichte van de response tijd van vertraagde reactie van de aquifer op de gasdepletie (39 dagen) zit er teveel tijd tussen het einde van de gasproductie in 2004 en de bevingen in 2013. .

## 5.5 Frictiereductie door vertraagde aquifer respons

Het Castricum-Zee gasveld wordt aan de zuidwestelijke kant van het gasveld begrensd door een breuk (zie Hoofdstuk 2). Deze randbreuk wordt verondersteld

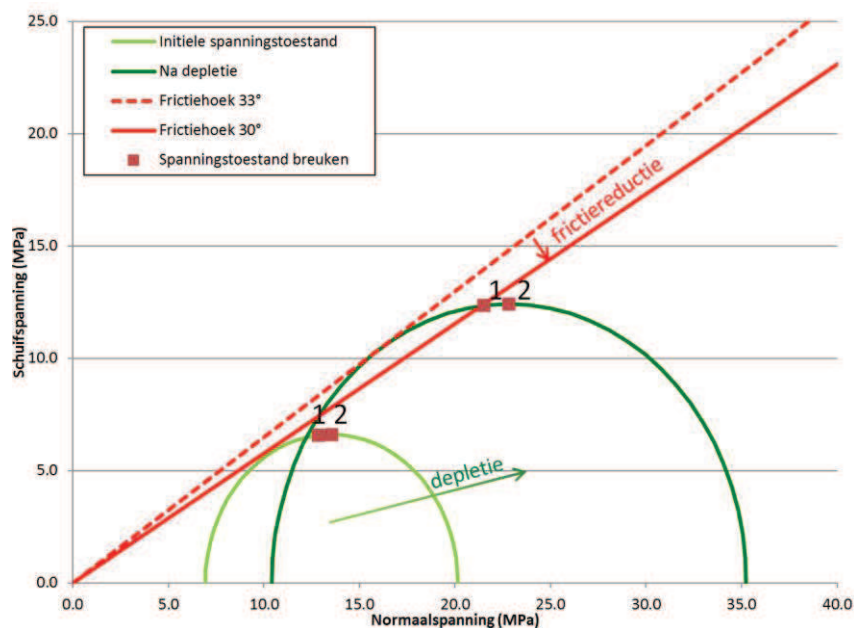
droog te zijn daar waar het gasvoerende deel zich bevindt; het gedeelte boven het gaswatercontact. Door gasproductie uit het Castricum-Zee gasveld en het nabijgelegen Q8-A gasveld, verandert de druk in het gasveld en in de onderliggende aquifer.

Door de drukverandering in het gasveld en de onderliggende aquifer komt de aquifer omhoog en kan er water stromen in het gasvoerende deel van het gasveld en in de voorheen droge delen van de breuk. Hierdoor wordt de frictie in dit deel van de breuk verlaagd waardoor deze instabiel kan worden. Het is mogelijk dat het instabiel worden van dit deel van de breuk die verticaal omhoog en omlaag veel verder doorloopt, de trigger is geweest voor het falen van de breuk met de bevingen als gevolg.

Het effect van de frictiereductie wordt geïllustreerd in Figuur 5-4. Voor aanvang van produceren bevindt het gasveld zich in de initiële spanningstoestand, weergegeven in lichtgroen. De frictiehoek van 33° is weergegeven met de rode gestippelde lijn. Vervolgens wordt het gasveld geproduceerd en bereikt het gasveld de spanningstoestand waarin het zich na depletie bevindt, weergegeven in donkergroen. In deze spanningstoestand wordt de faallijn net geraakt.

Wanneer er na verloop van tijd water in het droge deel van de breuk stroomt wordt door het water de frictie verlaagd. Deze verlaging van de frictie heeft tot gevolg dat breuken met een kritieke oriëntatie onstabiel kunnen worden. De spanningstoestand op de twee randbreuken van het gasveld zijn in Figuur 5-4 weergegeven (breuk 1 en 2 staan aangegeven in Figuur 3-5). In de figuur is te zien dat de spanningstoestand van breuk 1 door een reductie van 3° van de frictiehoek op de faallijn komt te liggen. Hierdoor kan slip op de breuk worden veroorzaakt, met een beving als gevolg. De breukrichtingen die volgens deze methodiek kritisch gespannen zijn liggen tussen WNW-OZO en NW-ZO.

De randbreuken van het Castricum-Zee gasveld lopen NW-ZO en kunnen verondersteld worden kritische gespannen te zijn ten gevolge van de depletie en frictie reductie van de breuk.



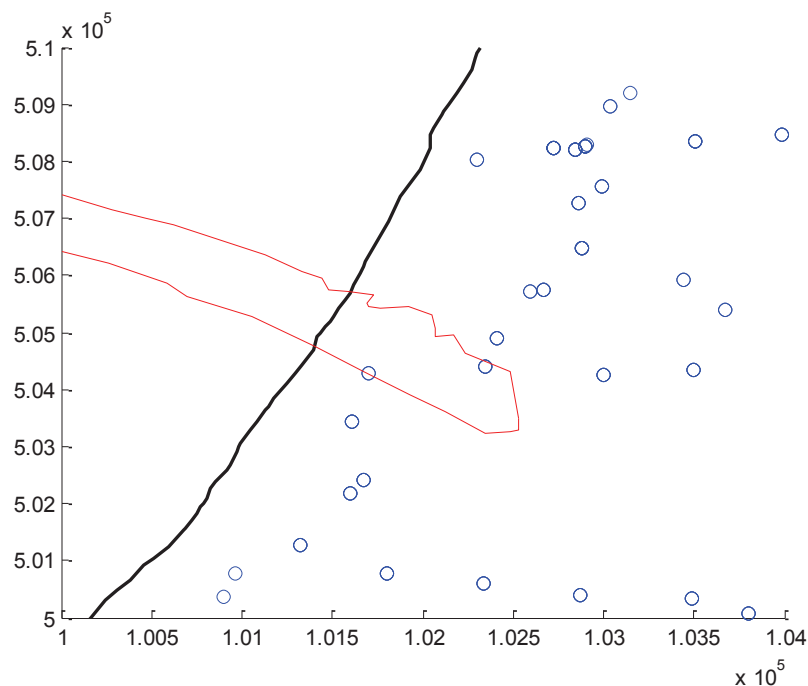
Figuur 5-4. Mohr-coulomb diagram wat de verandering in de spanningstoestand ten gevolge van depletie weergeeft.

## 5.6 Tijdsafhankelijke effecten van compactie

Door het produceren van het Castricum-Zee gasveld treedt samendrukking (compactie) in het reservoirgesteente op. Deze compactie vertaalt zich aan het oppervlak in bodemdaling. Bij de zuidwestelijke randbreuk van het gasveld treedt aan de ene kant van de breuk compactie op en aan de andere kant niet. Deze differentiële compactie is een bekende oorzaak van seismiteit ( et al., 2008; Muntendam-Bos et al., 2009).

Een mogelijke verklaring voor het vertraagd optreden van de bevingen zou kunnen liggen in tijdsafhankelijke effecten van compactie. Als er tijdsvertraging in de compactie van het reservoirgesteente heeft plaatsgevonden, zou dit aan het oppervlakte waarneembaar moeten zijn in metingen van de bodemdaling. Om dit te bepalen is een dataset van bodemdalingmetingen geanalyseerd.

Het Castricum-Zee gasveld bevindt zich grotendeels onder zee, slechts een klein gedeelte van het gasveld bevindt zich onder land (Figuur 5-5). Uit de dataset van Rijkswaterstaat (<http://www.rijkswaterstaat.nl/>), die heel Nederland beslaat, zijn de peilmerken gefilterd die binnen 5 km van het Castricum-Zee gasveld liggen. Vervolgens is gekeken welke peilmerken gemeten zijn in het jaar 2000 en later. Daarnaast zijn alleen peilmerken meegenomen die, vanaf het jaar 2000 twee keer of meer gemeten zijn.

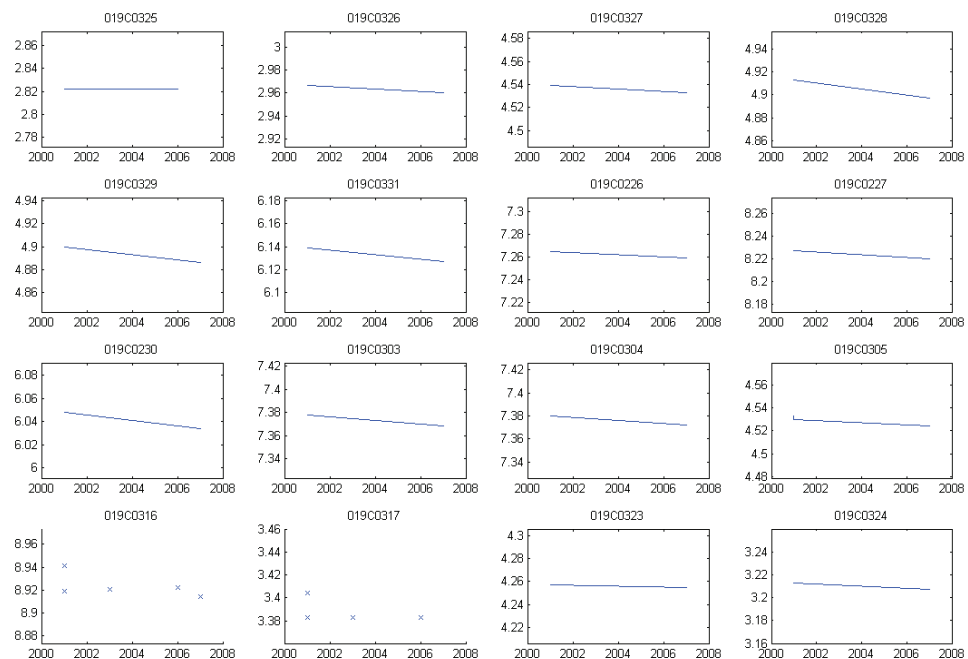


Figuur 5-5. Locatie van de meetpunten in RD-coördinaten (blauwe cirkels). De rode lijn geeft de contour van het Castricum-Zee gasveld weer, de zwarte lijn is de kustlijn.

De selectie leverde 16 peilmerken op waarvan de metingen in Figuur 5-6 getoond worden. Er zijn geen metingen uitgevoerd op de meetpunten na 2007. Zoals in

Figuur 5-6 te zien is, zijn de meeste peilmerken maar twee keer aangemeten. De bodemdaling over de periode 2001 tot 2007 is maximaal 3 mm, en valt binnen de onzekerheid van de metingen. De onzekerheden van de metingen zijn 3,4 mm wat verkregen wordt door  $\sigma = \sqrt{\sigma_{ins}^2 + ((t - t_0)\sigma_{ref})^2}$  toe te passen, waarbij  $\sigma_{ins} = 3 \text{ mm}$  de instrument onzekerheid is en  $\sigma_{ref} = 0,25 \text{ mm/jaar}$  de drift van het peilmerk sinds de eerste meting ( $t_0 = 2001$ ).

Daarnaast zijn twee metingen per peilmerk niet voldoende om tijdsvertragingen te kunnen waarnemen. Hierdoor is een eventuele tijdsvertraging in de compactie niet waarneembaar als bodemdaling aan het oppervlak. Deze hypothese kan niet worden weerlegd of bevestigd vanwege het gebrek aan data. Vanwege de verwachte lage compactie door het beperkte volume van de gasproductie (11% zie paragraaf 5.4), worden tijdsafhankelijke effecten van compactie niet waarschijnlijk geacht.



Figuur 5-6. Bodemdalingsmetingen in de tijd van peilmerken die binnen 5 km van het Castricum-Zee gasveld liggen en meerdere metingen hebben sinds 2000. De titels geven de specifieke peilmerken weer.

## 5.7 Vloeistofverliezen in de boringen HEK-GT-1 en HEK-GT-2

In de put HEK-GT-1 zijn in de periode april tot juni 2013 relatief grote spoelingsverliezen opgetreden. De spoelingsverliezen zijn opgetreden ongeveer zes maanden voor de eerste bevingen (zie paragraaf 2.3). Er is gerapporteerd dat in de put HEK-GT-1 in totaal circa 1800 m<sup>3</sup> boorspoeling verloren is gegaan; in de boorrapporten worden meerdere keren 'total losses' genoemd. Uit de rapportages van de boring HEK-GT-1 valt op te maken dat het volume verloren boorspoeling

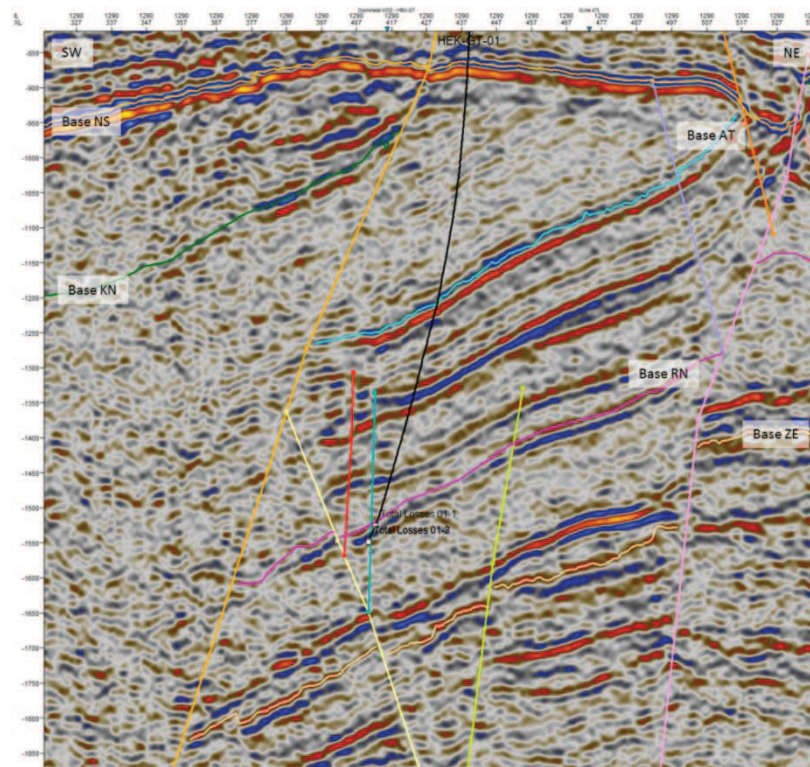
gerelateerd aan de verschillende voorkomens van “total losses” variabel is maar veelal tussen de 100 en 250m<sup>3</sup> op een dag (24 uur) is.

De spoelingsverliezen waren nabij het doorprikpunt van de boring met de top van de Volpriehausen Zandsteen Laagpakket (op circa 2033m TVD), dezelfde formatie waar het reservoir van Castricum-Zee zich ook in bevindt. Zoals op Figuur 2-8 te zien is, lopen de trajecten van de beide HEK-GT boringen in het kaartbeeld door de noordelijke randbreuk van het Castricum-Zee gasveld heen. Op een noordoost – zuidwest lopende seismische sectie (Figuur 5-7) is te zien dat de boring HEK-GT-1 deze breuk (nu blauwgroen gekleurd) doorboort op nagenoeg dezelfde plek als waar de boring top Volpriehausen Zandsteen reservoir (paarse horizon) doorboort.<sup>3</sup> Voor de sidetrack op de boring HEK-GT-1-S1 (zie Figuur 5-8) geldt ook dat de spoelingsverliezen nabij de breuk en doorprikpunt van de Volpriehausen Zandsteen zijn opgetreden. Dit is de breuk die in noordwestelijke richting loopt en nabij de noordoostbegrenzing van het Castricum-Zee veld ligt.

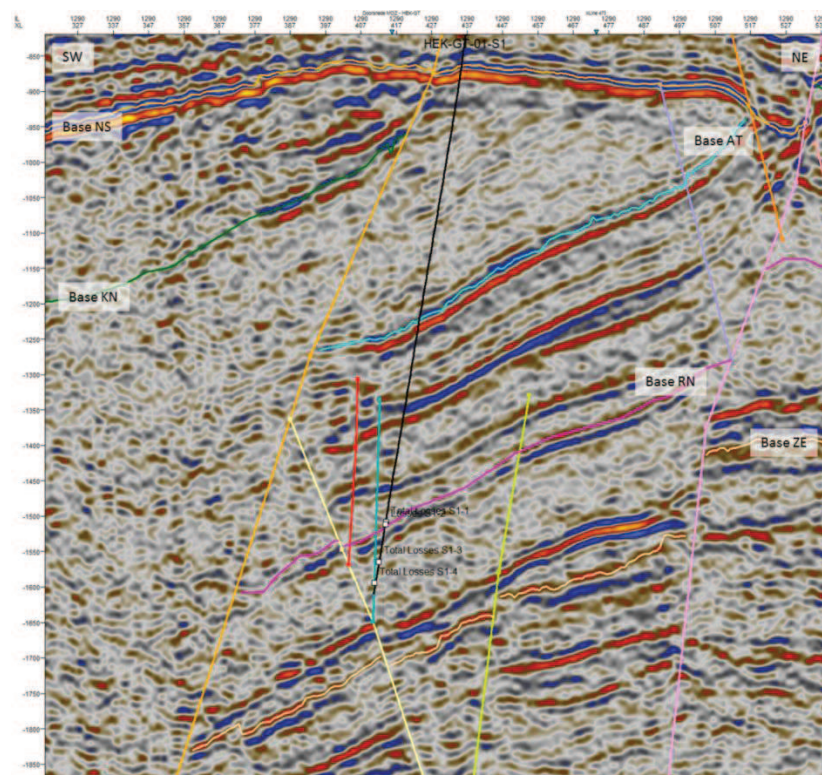
De mate van drukdepletie van de Volpriehausen Zandsteen aquifer op de locatie van het doorprikpunt van HEK-GT-1 is niet bekend/gemeten. De gewone hydrostatische druk ligt in de orde van 215 bar. Drukdepletie van de aquifer ten gevolge van de winning van gas uit het Castricum Zee veld is niet eenduidig te bepalen. Het soortelijk gewicht van de boorspoeling ten tijde van de spoelingsverliezen is 1,25 tot 1,3. Dit resulteert in een “mud-druk” op de spoelingsverliezen locatie op circa 2033 m (TVD) van 254 bar. Het drukverschil tussen de aquifer en de boorvloeistof op het doorprikpunt van de boring in de Volpriehausen Zandsteen laagpakket is dus minimaal in de orde van 40 bar.

---

<sup>3</sup>Op deze lijn en op deze locatie is het verzet langs de breuk op de seismiek klein waardoor de breuk hier nauwelijks seismisch waarneembaar is. Detail interpretatie van de seismiek in de ruime omgeving leidt tot de conclusie dat de noordoostelijke randbreuk van het Castricum-Zee gasveld wel doorloopt en dat het verzet net zichtbaar is.

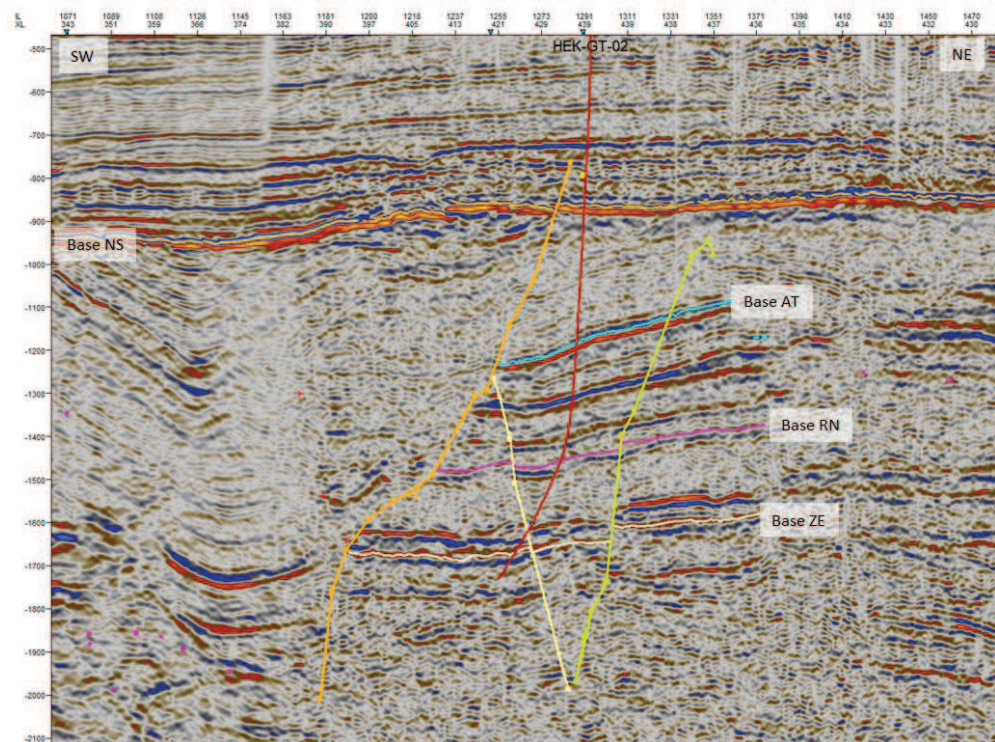


Figuur 5-7: Detail van NW-ZO lopende seismische sectie met daarop het boortraject van de boring HEK-GT-1. Ook de locatie van de spoelingsverliezen zijn aangegeven.



Figuur 5-8: Detail van NW-ZO lopende seismische sectie met daarop het boortraject van de sidetrack van boring HEK-GT-1 => HEK-GT-1-S1. Ook de locatie van de spoelingsverliezen in de sidetrack zijn aangegeven.

In de periode van 4 tot 19 november 2013 zijn er tijdens het boren van HEK-GT-02 ook relatief grote spoelingsverliezen (soms gerapporteerd als total losses) opgetreden in het interval vanaf 1944 m (MD) (net boven top Volpriehausen) tot circa 2660m (MD) (basis Zechstein). De belangrijkste spoelingsverliezen hebben plaatsgevonden toen de boorbeitel op diepte 1944, 2392 en 2663m (AH) was. Deze dieptes corresponderen ongeveer met de doorprikpunten van Volpriehausen Zandsteen, top Zechstein en basis Zechstein. In Figuur 5-9 is te zien dat in het traject “Zechstein” ook een breuk gelegen is. De exacte locatie waar de losses plaatsvinden als de boorbeitel de diepte van 1944m is gepasseerd is niet eenduidig te achterhalen. Aannemelijk is dat de spoelingsverliezen die plaats vonden rond 1944m (AH) in het Volpriehausen Laagpakket en die van 2392 tot 2663m in de Zechstein en de breuk aldaar zijn gestroomd. Deze spoelingsverliezen vonden plaats na de eerste bevingen van eind oktober 2013 en voor de laatste twee bevingen nabij de noordpunt van het Castricum-Zee gasveld.



Figuur 5-9: Boortraject HEK-GT-2 gevisualiseerd op een seismische sectie. In het traject van de paarse lijn (base RN) tot de gele sub-horizontale lijn (Base ZE) zijn spoelingsverliezen opgetreden. Merk op dat het boor traject net boven basis Zechstein een breuk doorkruist.

De breuk(zone) nabij de spoelingsverlies-locaties in beide putten is, vermoedelijk in HEK-GT-1 in combinatie met de Volpriehausen aquifer, in ieder geval lokaal, een hoog permeabele zone. Deze breuk en ook de Volpriehausen Zandsteen aquifer is over een afstand van circa 6 km in contact met het in druk gedepleteerde compartiment van het Castricum-Zee gasveld. Het aanboren van een locatie in de ondergrond waar een eventueel open breuk voorkomt in de combinatie met een poreuze en permeabele aquifer die mogelijk licht in druk is gedepleteerd, kan een verklaring zijn voor de spoelingsverliezen.



*Spoelingsverliezen in de breuk en/of Volpriehausen aquifer*

De vloeistofverliezen in april tot juni 2013, die zijn opgetreden bij het boren van HEK-GT-01, zouden mogelijk de spanningstoestand op de breuk, lokaal maar ook op afstand, kunnen hebben veranderd. Tussen de tijd van optreden van de verschillende spoelingsverliezen en de aardbevingen zit een variabele tijdspanne alsook verschillende afstanden. Tabel 5-2 geeft een benadering van het aantal dagen tussen de bevingen en het eerste en laatste spoelingsverlies in de put HEK-GT-1 weer.

Beving / magnitude / datum	Dagen tussen 1e voorkomen spoelingsverliezen HEK-GT-1 en beving	Dagen tussen laatste voorkomen spoelingsverliezen HEK-GT-1 en beving	Afstand tussen HEK-GT-1 locatie en beving (m)
Beving 1 (2,5 / 22 okt 2013)	184	114	6200
Beving 2 (2,0 / 23 okt 2013)	185	115	6800
Beving 3 (1,8 / 27 okt 2013)	189	116	8600
Beving 4 (1,7 / 5 nov 2013)	197	127	9500
Beving 5 (1,7 / 28 nov 2013)	220	150	9500
Beving 6 (1,4 / 28 nov 2013)	220	150	10000

Tabel 5-2: Tijdspanne tussen bevingen en spoelingsverliezen in HEK-GT-1.

Met behulp van eenvoudige berekeningen aan drukgolfpropagatie door een permeabel medium kan een indicatieve schatting gemaakt worden hoeveel tijd een drukgolf doet over een bepaalde afstand of vice versa, gegeven een bepaalde tijdspanne wat de gemiddelde permeabiliteit moet zijn van het gesteente tussen de positie van de beving en de vloeistofverliezen. De afstand die de drukgolf aflegt is niet lineair met de tijd (maar tot de macht 2). Daarnaast is de vorm van het reservoir belangrijk, omdat als het reservoir relatief lang en smal is er drukgolf interferentie optreedt die tot vertraging leidt (Hagoort 1988).

Rekening houdend met een aantal parameters waaronder de porositeit (18% conform opgave in Tabel 2-1) en permeabiliteit (120 mD conform opgave in Tabel 2-1), kan berekend worden in hoeveel dagen een eventuele drukgolf, veroorzaakt door de spoelingsverliezen, de aardbevingshaard locatie bereikt. In de onderstaande Tabel 5-3 wordt voor verschillende scenario's het aantal (berekende) dagen gegeven tussen de spoelingsverliezen en aardbeving geven de bovengenoemde parameters.

Beving / magnitude / datum	Tijd (in dagen) met minimale afstand mogelijk (op breuk) tot beving	Tijd (in dagen) met afstand tot lokalisatie KNMI (op breuk)	Tijd (in dagen) met maximale afstand mogelijk (op breuk) tot beving
Beving 1 (2,5 / 22 okt 2013)	60	92	162
Beving 2 (2,0 / 23 okt 2013)	75	112	175
Beving 3 (1,8 / 27 okt 2013)	87	178	252
Beving 4 (1,7 / 5 nov 2013)	162	218	314
Beving 5 (1,7 / 28 nov 2013)	162	218	314
Beving 6 (1,4 / 28 nov 2013)	162	241	314

Tabel 5-3: Berekende aantal dagen tussen eerste spoelingsverliezen van HEK-GT-01 en aardbevingslocatie uitgaande van bovengenoemde parameters.

Indien eenzelfde soort berekening wordt gevolgd maar dan het aantal dagen als parameter wordt gebruikt in plaats van de permeabiliteit kan de permeabiliteit van het medium worden bepaald waardoor de drukgolf zich verplaatst. Tabel 5-4 geeft deze resultaten weer.

Beving / magnitude / datum	Permeabiliteit tov 1 <sup>ste</sup> spoelingsverliezen (mD)	Permeabiliteit laatste spoelingsverliezen (mD)
Beving 1 (2,5 / 22 oktober 2013)	60.5	98
Beving 2 (2,0 / 23 oktober 2013)	73	116
Beving 3 (1,8 / 27 okt 2013)	114.5	180
Beving 4 (1,7 / 5 november 2013)	136	204
Beving 5 (1,7 / 28 nov 2013)	133	175
Beving 6 (1,4 / 28 nov 2013)	132	181

Tabel 5-4: Permeabiliteit van potentieel drukgolf pad.

Geconcludeerd kan worden dat, gegeven de onzekerheden in de reservoir parameters en de vorm van het aquifer, de berekeningen resulteren in aantal dagen danwel permeabiliteiten in dezelfde orde van grootte als het geobserveerde aantal dagen tussen spoelingsverliezen en aardbeving dan wel de gemiddelde reservoir permeabiliteit bepaald op grond van de kernmetingen in de referentieput MDZ-1 en nabij gelegen putten (zie ook paragraaf 2.1).

Eenzelfde berekening voor de spoelingsverliezen in HEK-GT-2 en de aardbevingen eind november (beving 4,5 en 6 in bovenstaande tabellen) komen qua berekeningsresultaten niet bij de geobserveerde waarden (dagen tot aan de bevingen, permeabiliteiten).

De hoeveelheid water dat verloren is gegaan bij relatief grote spoelingsverliezen is, in vergelijking met een waterinjectieput vrij klein. Ter vergelijking: bij Schoonebeek wordt 8200 m<sup>3</sup> per dag geïnjecteerd (NAM, 2006). Dat neemt niet weg dat de drukgolf, die door de spoelingsverliezen ten gevolge van een indicatief drukverschil wordt gegenereerd, kan verplaatsen via de poreuze gesteentelaag en eventueel de (permeabele) breuk en als zodanig op afstand de lokale fragiele evenwichtssituatie kan verstoren en wellicht een aardbeving “triggert” bij breuken, die kritisch gespannen zijn.

Het is overigens mogelijk dat niet alle bevingen veroorzaakt zijn door deze trigger. Naschokken kunnen voorkomen door toename van de Coulomb spanning op de breuk na de eerste beving.

## 6 Magnitude van potentiële bevingen

Naast de uiteenzetting van de hypothesen is het seismisch moment en bijbehorende magnitude van de randbreuken geanalyseerd. Het moment van de randbreuken is onderzocht om te toetsen of de magnitude die daarbij hoort overeen komt met de waargenomen magnitude van de bevingen. Daarnaast is het cumulatief moment van de waargenomen bevingen bepaald om te toetsen of dit in dezelfde orde van grootte is als het seismisch moment van de randbreuken.

Tot slot is het reservoirmoment bepaald om te kijken hoe dit zich verhoudt tot de waargenomen bevingen en de partiticoëfficiënt (zie ook TNO 2013 voor de partiticoëfficiënt in het Groningen gasveld).

### 6.1 Geomechanische analyse breuken

#### 6.1.1 Berekening seismisch moment van de grote randbreuken

Aan de rand van het Castricum-Zee gasveld bevinden zich twee grootschalige breuken (Figuur 3-5). Beide beginnen aan de zuidwestelijke rand van het gasveld; één volgt daarna de veldcontour (noordoostelijke breuk; 9,8 km langs het gasveld) de ander volgt de oorspronkelijke richting (zuidwestelijke breuk; 11,8 km). Voor deze breuken is het seismisch moment ( $M_0$ ) berekend, gebruik makende van:

$$M_0 = G * \delta * A \quad (1)$$

Waarbij  $G$  de schuifmodulus is,  $\delta$  de gemiddelde slip over de breuk en  $A$  het breukoppervlakte.

Dit seismische moment kan worden omgerekend in een lokale magnitude (Hanks en Kanamori, 1979).

$$M_L = \frac{\log(M_0) - 9,1}{1,5} \quad (2)$$

Voor de bepaling van het maximale seismische moment is aangenomen dat de gehele breuk over de dikte van het reservoir zal bewegen. Het seismisch moment en de daarbij horende maximale magnitude zijn weergegeven in Tabel 6-2.

Castricum-Zee		
Breuk 1	11,8	km
Breuk 2	9,8	km
Dikte formatie (h)	33	m
Elasticiteitsmodulus (E)	25,7	Gpa
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0,24	

Tabel 6-1. Parameters gebruikt in de analyse van het Castricum-Zee gasveld

	$M_L$	$M_0$ (Nm)
Breuk 1	2,7	$1,33 \cdot 10^{13}$
Breuk 2	2,6	$1,11 \cdot 10^{13}$

Tabel 6-2. Lokale magnitudes en seismisch moment voor de grote randbreuken van het Castricum-Zee gasveld.

De grootste geobserveerde magnitude is 2,5. Dit is lager dan de maximaal mogelijke magnitudes op de breukvlakken direct grenzend aan het Castricum-Zee gasveld. Deze analyse steunt de mogelijkheid dat seismiciteit heeft plaatsgevonden op de randbreuken.

#### *Hoogte breuken*

De randbreuken zijn echter niet beperkt tot het reservoir maar lopen verder door naar boven en onderen (zie Figuur 3-3). Het is mogelijk dat er grotere gedeeltes van de breuk gaan bewegen als deze kritisch gespannen zijn. De totale hoogte van de breuken is 1400-1600 m.

#### *Lengte breukbeweging*

In de berekening is aangenomen dat de gehele breuk langs het Castricum-Zee gasveld is gaan bewegen. De aspect ratio tussen lengte en dikte van het bewegende vlak van de breuk is hoger dan vaak geobserveerd. Een cirkelvormig vlak van beweging op de breuk is realistischer.

### 6.1.2 *Cumulatief seismisch moment van de geregistreeerde bevingen*

Van alle bevingen nabij Castricum-Zee in 2013 is het seismisch moment bepaald (Tabel 6-3). Het cumulatieve seismisch moment van de geobserveerde bevingen ligt in de orde van grootte van het seismisch moment bepaald voor de twee randbreuken (Tabel 6-2).

Datum	$M_L$	$M_0$ (Nm)
22-10-2013	2,5	$7,08 \cdot 10^{12}$
23-10-2013	2,0	$1,26 \cdot 10^{12}$
27-10-2013	1,8	$6,31 \cdot 10^{11}$
5-11-2013	1,7	$4,47 \cdot 10^{11}$
28-11-2013	1,4	$1,58 \cdot 10^{11}$
28-11-2013	1,7	$4,47 \cdot 10^{11}$
Totaal		$1,00 \cdot 10^{13}$

Tabel 6-3. Seismisch moment voor alle geregistreeerde bevingen rondom het Castricum-Zee gasveld.

### 6.1.3 *Reservoirmoment*

Naast het oppervlak van de breuken is ook gekeken naar het reservoirmoment wat is opgebouwd in het Castricum-Zee gasveld. Het reservoirmoment geeft voor een

volumeverandering weer hoeveel energie is opgeslagen in het gasveld. Deze energie zou potentieel vrij kunnen komen in de vorm van een beving.

$$RM = 2 * G * \Delta V_{res} \quad (3)$$

G hierin is de schuifmodulus en  $\Delta V_{res}$  is de volumeverandering. De volumeverandering is gegeven door de opgetreden compactie in het gasveld, veroorzaakt door de gasdepletie. De compactie kan worden berekend door:

$$\Delta h = h * c_m * \Delta P \quad (4)$$

Waarbij  $c_m$  de compactiecoëfficiënt is en  $\Delta P$  is de drukdepletie van het gasveld. Tabel 6-4 geeft de parameters gebruikt voor de berekening van de compactie van het Castricum-Zee gasveld. Tabel 6-5 geeft de (gemiddelde) compactie weer in het gasveld. Voor de volumeverandering wordt aangenomen dat deze compactie gelijk is over het gehele gasveld.

Omdat er slechts 280 miljoen  $m^3$  van de totale aanwezige 2500  $m^3$  is geproduceerd (~11%), en de rest van het gas nog in het gasveld zit opgesloten, is voor het totale gesteentevolume, wat gedepleteerd is, ook deze fractie aangenomen. De compactie die heeft plaatsgevonden in het reservoir is slechts 2,2 cm. Dit heeft waarschijnlijk geleid tot zeer lage waarden van bodemdaling van minder dan 2 cm.

Parameter	waarde	eenheid
h	33	m
$C_m$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	bar <sup>-1</sup>
Depletie	151	bar
Schuifmodulus	10	GPa

Tabel 6-4. Parameters gebruikt voor de berekening van de compactie van het Castricum-Zee gasveld

Parameter	waarde	eenheid
$\Delta h$	0,0224	m
Oppervlakte	610885	$m^2$
$\Delta V$	13698	$m^3$

Tabel 6-5. Compactievolume ( $\Delta V$ ), oppervlak en compactie ( $\Delta h$ ) voor het Castricum-Zee gasveld. Hierbij is aangenomen dat maar ~11% van het gehele volume gedepleteerd is.

Het reservoirmoment van het Castricum-Zee gasveld, berekend met formules 3 en 4, is  $2,84 \cdot 10^{14}$  Nm. Als aangenomen wordt dat dit reservoirmoment in één keer wordt omgezet in één beving dan is dit een beving van 3,6 op de Richterschaal. Dit is een theoretische waarde omdat dit moment en bijbehorende magnitude alleen

mogelijk is als alle energie uit het reservoir in één keer vrijkomt, wat fysisch onwaarschijnlijk is.

Als aangenomen wordt dat een bepaald deel van het reservoirmoment als seismisch moment kan vrijkomen in de vorm van bevingen dan is de maximale magnitude afhankelijk van de waarde van deze fractie. In NAM (2013) wordt deze fractie de partiticoëfficiënt genoemd. De partiticoëfficiënt is in deze studie een empirisch bepaalde fractie van de in ondergrond door compactie opgeslagen energie die als seismische energie vrijkomt. Een waarde van 1 betekent dat alle in de ondergrond opgebouwde energie (uiteindelijk) vrijkomt middels één of meerdere bevingen, een waarde van 0,01 betekent dat 1% van alle energie vrijkomt als seismische energie. Tabel 6-3 geeft het seismisch moment en magnitude bij verschillende waarden van de partiticoëfficiënt. In NAM (2013) is voor het Groningen gasveld een exponentiële relatie geobserveerd van de partiticoëfficiënt met de compactie. De maximale waarde van de partiticoëfficiënt is 1% bij 38 cm compactie.

Als wordt aangenomen dat de exponentiële relatie tussen partiticoëfficiënt en compactie (NAM 2013) geldig is, dan zou de partiticoëfficiënt bij ~2,5 cm compactie rond de  $3 \cdot 10^{-6}$  liggen. Dit komt overeen met een magnitude van 0,5. Dit is veel kleiner dan de waargenomen magnitudes nabij dit gasveld in 2013.

Partiticoëfficiënt	Seismisch Moment (Nm)	Magnitude
1	$2,84 \cdot 10^{14}$	3,6
0,1	$2,84 \cdot 10^{13}$	2,9
0,01	$2,84 \cdot 10^{12}$	2,2
0,001	$2,84 \cdot 10^{11}$	1,6

Tabel 6-6. Seismisch en bijbehorende magnitude bij verschillende waarden van de partiticoëfficiënt

Het totale geobserveerde seismische moment van alle zes bevingen is  $1,00 \cdot 10^{13}$  (Tabel 6-3). Dit komt overeen met een partiticoëfficiënt tussen de 0,01 en 0,10. Hoewel het seismisch moment, dat bepaald wordt uit het reservoirmoment, aangeeft dat compactie de drijvende kracht zou kunnen zijn voor de opgetreden bevingen, geeft deze analyse ook aan dat de relatie tussen de partiticoëfficiënt en compactie heel anders is dan die geobserveerd in het Groningen gasveld i.e. hogere partiticoëfficiënten (1% - 10%) bij lagere compactie (2,2 cm). Geomechanisch gezien is dit niet onlogisch. In TNO (2013, 2014) wordt gesuggereerd dat het waarschijnlijk is dat differentiële compactie over breuken een rol speelt. Als dit het geval is, wordt de partiticoëfficiënt bepaald door het deel van de volumeverandering in het reservoir dat spanningsveranderingen op de aanwezige breuken veroorzaakt. Deze zal een stuk kleiner zijn dan de totale volumeverandering in het gehele gasveld. In een relatief langgerekt gasveld, zoals Castricum-Zee, waar je nooit veel meer dan 1 km van de grote randbreuk verwijderd bent, is het waarschijnlijk dat een groter deel van de volumeverandering leidt tot spanningsveranderingen op de breuk. Dit pleit voor een andere relatie tussen compactie en de partiticoëfficiënt waarbij vooral het deel van de compactie meegenomen moet worden dat werkelijk seismiteit kan veroorzaken door nabijheid van breuken.

## 7 Bevindingen

In 2013 zijn zes aardbevingen nabij Castricum op de Noordzee geregistreerd door het KNMI. De locaties van de bevingen bevinden zich in directe nabijheid van het Castricum-Zee gasveld dat een directe relatie met de depletie van dit gasveld suggereert. Het Castricum-Zee gasveld is sinds 2004 uit productie en is vier jaar geproduceerd. Het gasveld bevindt zich in een breukbegrensd horstblok. De dimensies van deze breuken zijn zodanig dat bevingen tot magnitude 2,7 mogelijk zijn op deze breuken.

In dit rapport zijn meerdere hypothesen geanalyseerd om de mogelijke oorzaak van de bevingen nabij Castricum-Zee te kunnen achterhalen.

De hypothese van natuurlijke oorzaak voor de seismiciteit wordt mogelijk geacht, omdat bevingen zijn geregistreerd in de buurt die niet aan mijnbouwactiviteiten kunnen worden gekoppeld. Natuurlijke oorzaken kunnen niet uitgesloten worden vooral ook omdat, in het recente geologische verleden (2 tot 3 miljoen jaar geleden), de breuken nabij Castricum-Zee en Heemskerk seismisch actief zijn geweest. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de ondergrond in dit studie gebied kritisch tot nabij kritisch is gespannen.

Door de gasdepletie zijn de breuken in het Castricum-Zee gasveld kritisch gespannen geraakt. Enerzijds door de drukdepletie van het gasveld en anderzijds door de vermoedelijke frictiereductie van de breuken door het omhoog komen van water in de breuk door de drukdepletie. Aan het einde van de productie van het Castricum-Zee gasveld waren de breuken meer kritisch gespannen dan voorheen. Dit betekent dat gasdepletie de oorzaak zou kunnen zijn van de bevingen. Dit verklaart echter niet het optreden van de bevingen in 2013, 9 jaar na de stop van de gasproductie.

De hypothese van tijdsafhankelijke effecten van compactie kunnen niet worden uitgesloten. Deze zijn echter niet waarschijnlijk vanwege de verwachte lage compactie van 2,2 cm als gevolg van de beperkte gasproductie uit het Castricum-Zee gasveld. Gezien de bijna kritische toestand van de breuken, kan niet worden uitgesloten dat deze relatief kleine compactie met een tijdsvertraging zou kunnen leiden tot bevingen. Bodemdalingsmetingen zijn voor dit gebied zeer beperkt beschikbaar waardoor de hoeveelheid compactie en de mogelijke tijdsafhankelijkheid van compactie niet met zekerheid kan worden vastgesteld.

Echter, gasproductie heeft in de productieperiode van het Castricum-Zee gasveld en geruime tijd daarna niet geleid tot seismiciteit en de geologische kenmerken van het veld geven een verwaarloosbare kans op beven volgens de deterministische hazard analyse ( et al., 2012). Daarom heeft waarschijnlijk een ander mechanisme het laatste zetje (een trigger) geleverd om de breukbeweging (bevingen) mogelijk te maken.

In de boring HEK-GT-1, die in 2013 in de buurt van het Castricum-Zee gasveld geboord is, zijn spoelingsverliezen opgetreden. Berekeningen aan drukperturbatie op afstand in het reservoir ten gevolge van de spoelingsverliezen geven aan, dat het theoretisch mogelijk is dat de spoelingsverliezen de trigger geweest zijn voor de aardbevingen. De diepte van de spoelingsverliezen tijdens de boring komt overeen met de locatie van de breuk en de mogelijk licht in druk gedepleteerde aquifer. Deze breuk is dezelfde als de noordoostelijke randbreuk van het Castricum-Zee gasveld. De put is op 5 tot 8 kilometer afstand van de locatie van de bevingen



geboord. Desalniettemin zou een drukgolf gerelateerd aan de vloeistofverliezen door het permeabele reservoir en de aanpalende breuk kunnen propageren naar (een gedeelte van) de breuk die kritisch gespannen is en daarmee een beving veroorzaken.

De analyse in dit rapport resulteert in de bevinding dat de **individuele** hypothesen geen directe verklaring geven voor het voorkomen van de bevingen nabij Castricum-Zee in 2013. Hieruit kan voorlopig worden geconcludeerd dat de meest waarschijnlijke oorzaak van de bevingen een samenloop van omstandigheden is.

De breuken in en aanpalend het Castricum-Zee gasveld zijn als gevolg van natuurlijke processen en/of gasdepletie, met eventueel breukverzwakking, kritisch gespannen geraakt. Om een aardbeving te “triggeren” op deze kritisch gespannen breuken is een drukpertubatie nodig. De spoelingsverliezen kunnen mogelijk deze drukpertubatie hebben gegenereerd.

De geanalyseerde hypothesen dekken de bekende en minder bekende oorzaken van geïnduceerde en natuurlijke seismiteit. Toekomstige alternatieve hypothesen op basis van nu onbekende oorzaken kunnen echter niet uitgesloten worden. Volledige modellering en geomechanische kwantificering van de ondergrond ten behoeve van een verklaring valt buiten het bereik van dit onderzoek.

Om de oorzaak onomstotelijk (indien mogelijk) vast te stellen is meer gedetailleerd onderzoek noodzakelijk.

## 8 Referenties

- , 1978, Friction of rocks, Pure and Applied Geophysics, Vol. 116, p. 615-626
- , The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal loading, Nature geoscience 5, 821-825, 2012.
- , 1988, Fundamentals of Reservoir Engineering. Elsevier
- , 1979. A moment magnitude scale, Res., V. 84, 2348-2350.
- , 2008. Bergermeer Seismicity study. TNO report 2008-U-R1071/B.
- , 2009. Effects of differential pressures across the central Bergermeer fault. TNO report TNO-034-UI-2009-00171/B.
- NAM, 2006. Milieueffectenrapportage herontwikkeling olieveld Schoonebeek
- NAM, 2013. Wijziging winningsplan Groningen 2013, inclusief technische bijlage Groningen winningsplan 2013. Versie 29 november 2013.
- TNO, 2013. Toetsing van de bodemdalingsprognoses en seismische hazard ten gevolge van gaswinning van het Groningen veld. TNO rapport 2013 R11953, 23 december 2013.
- , 2006. Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands, *Eng.Geol.*, 84, 99-111.
- , A comprehensive seismic velocity model for the Netherlands based on lithostratigraphic layers. *Netherlands Journal of Geosciences*, 85-4, 277-292, 2006.
- , 2004. Seismic hazard due to small shallow induced earthquakes, KNMI-Scientific report; WR-2004-01, 52pp.
- , 2012. Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland, TNO rapport R10198.
- Wintershall B.V., 2003, Winningsplan Castricum-Zee veld.

## 9 Ondertekening

Utrecht, 22 december 2016

TNO



Dr.

Afdelingshoofd

Paalvast

Auteur

## Bijlage 1: Gasveld en aardbeving correlatie

Onderstaande tabel geeft de aardbevingen weer in de ruime omgeving van het Castricum-Zee veld en het meest nabij gelegen gasveld. Volgorde van de tabel is de volgorde in tijd van de bevingen. Daarnaast zijn in de eerste kolom ander activiteiten genoemd.

timing losses	YYMMDD	TIME	dag	maand	jaar	LOCATION	LAT	LON	DEPTH	MAG	EVALMODE	NEAR_FID	NEAR_DIST	FIELD_DBK	FIELD_CD	FIELD_NM	PRODUCT_CD	start prod	eindprod	
	19891201	200916.80	01	12	1989	Purmerend	52.529	4.971	1.20	2.70	manual	induced	118124894	0.024	118124894	MID	Middelie	G	2007	2016
	19940806	180219.20	06	08	1994	Alkmaar	52.654	4.711	2.50	3.00	manual	induced	118123387	0.000	118123387	BGM	Bergermeer	G	1972	2007
	19940921	11258.13	21	09	1994	Alkmaar	52.658	4.708	2.50	3.20	manual	induced	118123387	0.000	118123387	BGM	Bergermeer	G	1972	2007
	19970130	100525.35	30	01	1997	Beverwijk	52.459	4.623	3.5	2.00	manual	tectonic	118123449	0.00700000000	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
	20010909	65812.52	09	09	2001	Alkmaar	52.651	4.713	2.00	3.50	manual	induced	118123387	0.000	118123387	BGM	Bergermeer	G	1972	2007
	20010910	43015.43	10	09	2001	Alkmaar	52.653	4.712	2.00	3.20	manual	induced	118123387	0.000	118123387	BGM	Bergermeer	G	1972	2007
	20011010	64109.36	10	10	2001	Bergen-aan-Zee	52.682	4.648	2.90	2.70	manual	induced	118123381	0.001	118123381	BER	Bergen	G	1978	2016
einde productie Q8-A en CAZ					2004.00															
	20080615	62927.02	15	06	2008	Noordzee	52.864	4.362	3.50	2.10	manual	induced	118123736	0.006	118123736	HALFWEG	Halfweg	G	1995	2012
	20081011	81939.90	11	10	2008	Noordzee	52.700	4.372	3.00	2.60	manual	induced	118122907	0.012	118122907	Q04-B	Q04-B	G	2002	2016
	20090714	161114.14	14	07	2009	Noordzee	52.773	4.308	3.00	2.70	manual	induced	118122901	0.017	118122901	Q04-A	Q04-A	G	2000	2016
	20111004	195239.36	04	10	2011	Noordzee	52.822	4.265	3.00	2.60	manual	induced	118122895	0.002	118122895	Q01-B	Q01-B	G	2003	2016
	20111220	231713.20	20	12	2011	Noordzee	52.773	4.288	3.00	2.20	manual	induced	118122901	0.002	118122901	Q04-A	Q04-A	G	2000	2016
	20120212	13330.10	12	02	2012	Noordzee	52.689	4.370	3.00	1.30	manual	induced	118122907	0.010	118122907	Q04-B	Q04-B	G	2002	2016
	20120212	70605.70	12	02	2012	Noordzee	52.782	4.327	3.00	1.70	manual	induced	118122901	0.033	118122901	Q04-A	Q04-A	G	2000	2016
	20120316	82846.45	16	03	2012	Noordzee	52.702	4.613	3.00	1.00	manual	induced	118123381	0.010	118123381	BER	Bergen	G	1978	2016
	20120418	222449.48	18	04	2012	Groet (Noordzee)	52.700	4.625	3.00	1.80	manual	induced	118123381	0.007	118123381	BER	Bergen	G	1978	2016
	20130105	231458.98	05	01	2013	Noordzee	52.824	4.258	3.00	2.60	manual	induced	118122895	0.006	118122895	Q01-B	Q01-B	G	2003	2016
	20130306	112527.83	06	03	2013	Bergen	52.646	4.713	2.00	0.70	manual	induced	118123387	0.002	118123387	BGM	Bergermeer	G	1972	2007
HEK-GT-1 => 1st total losses 22-04-2013 @ 2193m tot 24-04   2nd total losses 27-04-2013   3rd total losses 28-04-2013   S1 At 21 mei 2013   22-23 mei total losses   till 27 mei losses recorded   11 juni total losses   last loss 1 july 2013																				
	20131022	210145.28	22	10	2013	Castricum	52.551	4.588	3.00	2.50	manual	induced	118123449	0.004	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
	20131023	174503.09	23	10	2013	Castricum	52.555	4.585	3.00	2.00	manual	induced	118123449	0.006	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
	20131027	85405.97	27	10	2013	Noordzee	52.559	4.548	3.00	1.80	manual	induced	118123449	0.004	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
HEK-GT-2 => 11-2013   minor losses 4 tot 13 nov 2013   total losses 13 & 18 nov 2013																				
	20131105	165114.86	05	11	2013	Noordzee	52.567	4.533	3.00	1.70	manual	induced	118123449	0.012	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
	20131128	190200.69	28	11	2013	Noordzee	52.570	4.548	3.00	1.70	manual	induced	118123449	0.000	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
	20131128	202428.07	28	11	2013	Noordzee	52.570	4.550	3.00	1.40	manual	induced	118123449	0.000	118123449	CMZ	Castricum-Zee	G	2001	2004
	20150623	4816.39	23	06	2015	Anna Paulowna	52.858	4.821	3.00	1.50	manual	induced	118123045	0.067	118123045	SLD	Slootdorp	G	1977	2016
	20150623	4918.60	23	06	2015	Anna Paulowna	52.853	4.807	3.00	2.30	manual	induced	118123045	0.080	118123045	SLD	Slootdorp	G	1977	2016
	19951224	132634.16	24	12	1995	PolderWormer	52.511	4.847	3.00	2.30	manual	induced	1091477255	0.027	109147725	ZWK	Zuidwijk	G	0	0
												118122925		118122925	Q08-A			1986	2004	