

Retouradres: Postbus 80015, 3508 TA Utrecht

Ministerie van Economische Zaken  
Energie & Omgeving  
T.a.v. de heer F. Denys  
Postbus 20401  
2500 EK DEN HAAG

**Onderwerp**

Begeleidende brief bij de notitie "Waterinjectie in Twentse gasvelden"

Geachte heer Denys,

Bijgaand vindt u de notitie 'Waterinjectie in Twentse gasvelden'. Deze notitie geeft een samenvatting van de mogelijke gevolgen van waterinjectie in de Twentse gasvelden Tubbergen, Tubbergen-Mander, en Rossum-Weerselo met betrekking tot de volgende mogelijke effecten: (1) cavernevorming en bodemdaling; (2) breukstabiliteit; en (3) hydrofractie.

Door de Stichting Stop Afvalwater Twente – Technische Commissie (SAT-TC) is op 30 augustus 2016 een brief verstrekt aan het Ministerie van Economische Zaken betreffende: "Overzicht met foutieve, onjuiste en misleidende beweringen". In de bijgaande notitie wordt informatie verschaft over een aantal van deze beweringen. Daarnaast wordt in Appendix A per bewering aangegeven welke sectie van de notitie informatie verschaft over de bewering en wordt een korte reactie gegeven op iedere bewering.

Hoogachtend,

Dr. I. C. Kroon  
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken Hoofd Adviesgroep Economische Zaken

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Contactpersoon**

Dr. K. van Thienen-Visser

**E-mail**

[karin.vanthienen@tno.nl](mailto:karin.vanthienen@tno.nl)

**Doorkiesnummer**

+31 88 866 42 65

**Projectnummer**

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponeed bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op [www.tno.nl](http://www.tno.nl).  
Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

## Appendix A

### *Bewering 1A:* Hoofdstuk 2: Geologie

Door bewegingen in de aardkorst zijn de oorspronkelijk continue anhydrietlagen verbroken geraakt waardoor lokaal contact kan zijn ontstaan tussen het reservoirgesteente en het zout (haliet).

### *Bewering 1B:* Hoofdstuk 3.1: Zoutoplossing door waterinjectie

Anhydriet is zeer beperkt oplosbaar in water. Er is ~1500 m<sup>3</sup> water nodig om 1 m<sup>3</sup> anhydriet op te lossen. Bovendien verloopt deze oplossing zeer traag. In de gedane studies naar zoutoplossing is aangenomen dat het anhydriet overal afwezig is (NAM, 2014b; NAM, 2014c, bijgaande notitie). Zelfs bij afwezigheid van anhydriet verloopt zoutoplossing zeer traag en zal uiteindelijke (na duizenden jaren) leiden tot bodemdaling in de orde van 10 cm.

### *Bewering 1C:* Hoofdstuk 3.1: Zoutoplossing door waterinjectie

De vergelijking met een zoutcaverne van AKZO gaat niet op. Een zoutcaverne zoals aangelegd door AKZO is geoptimaliseerd voor het oplossen van zout. Hier staat een groot oppervlak (de gehele caverne wand) van zout direct bloot aan circulerend onverzadigd water. Bij de injectie van productiewater in een carbonaatgesteente wordt er eenmalig geïnjecteerd en blijft het water vervolgens in het reservoir achter. Volgens de modelleerstudie van NAM (NAM 2014b) kan zout, ook als dit in direct contact staat met het injectiewater, slechts in geringe mate oplossen door de lage permeabiliteit van het reservoir. Hierdoor kan het relatief zoete injectiewater niet snel genoeg worden aangevoerd om zeer snelle oplossing te krijgen. Als stroming plaatsvindt in het reservoir (tijdschaal van ongeveer 8000 jaar, zie NAM (2014a)) zal het resterende gas in het reservoir naar boven bewegen en het verzadigde water naar beneden. Het gas kan echter niet ontploffen omdat er geen zuurstof aanwezig is op deze diepte. Ervaringen met gasvelden op de gehele wereld hebben niet tot ontploffingen op diepte van het reservoir geresulteerd.

### *Bewering 1D:* Hoofdstuk 2: Geologie

De doorlatendheid van steenzout is extreem laag. Dit wordt onderstreept door het feit dat het gas miljoenen jaren lang onder het zout opgesloten is gebleven.

### *Bewering 2A:* Hoofdstuk 2: Geologie en Hoofdstuk 4.1: Staat van de gasvelden voor injectie

De reservoirs van het Schoonebeekveld en de Twentse velden bestaan uit gesteenten van verschillende geologische formaties. De overeenkomst tussen de formaties is gebaseerd op het feit dat beiden formaties een afgesloten structuur vormen waarin zich koolwaterstoffen

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75

bevinden/hebben bevonden. Daarnaast bevindt zich in beide formaties zout water (formatiewater).

*Bewering 2B:* Hoofdstuk 3: Vorming van zoutcavernes en bodemdaling  
Het water dat in Twente geïnjecteerd wordt zal in de loop der jaren een minder hoog zoutgehalte hebben doordat het productiewater van Schoonebeek een groeiende hoeveelheid gecondenseerde stoom zal bevatten. In 2014 was het gemiddelde zoutgehalte 44 g/L (NAM, 2015), in 2015 was dit 35 g/L (NAM, 2016). Ter vergelijking, zeewater heeft een zoutgehalte van ~35 g/L. De verwachting is dat het zoutgehalte zal afnemen tot ongeveer 10g/L (Royal HaskoningDHV, 2016).

*Bewering 2C:* De notitie gaat over de waterinjectie in de Twentevelden. Dit punt wordt daarom niet behandeld in de notitie. Hierbij een korte reactie:

Er wordt op verschillende locaties in Nederland in verschillende geologische formaties zonder problemen water geïnjecteerd. Bij de meeste velden gaat het om productiewater dat bijvangst is van olie- en/of gaswinning. Dit injectiewater komt uit hetzelfde of een vergelijkbaar veld en wordt hierin teruggeïnjecteerd. In de gasvelden van Twente wordt water geïnjecteerd dat geproduceerd wordt bij de winning van Schoonebeek olie met behulp van stoominjectie. De hoeveelheid water die geïnjecteerd wordt in de Twente gasvelden is groter dan de hoeveelheid bijvangst bij de gaswinning uit deze velden. In Borgsweer worden vergelijkbare hoeveelheden water worden geïnjecteerd (max 1,8 miljoen m<sup>3</sup>/jaar). In Nederland zit boven de meeste gasvelden steenzout of een kleilaag die ervoor hebben gezorgd dat het gas niet naar het oppervlak kon migreren. De situatie van zout boven een reservoir waarin water wordt geïnjecteerd is eerder gemeengoed dan een uitzondering.

*Bewering 3:* Hoofdstuk 3: Vorming van zoutcavernes en bodemdaling  
Het is fysisch onrealistisch dat zich een caveerne kan vormen van de door SAT-TC geschetste afmetingen. De ruimte die geleidelijk zou ontstaan verdwijnt door kruip van het naastliggende zout. Dit is zichtbaar als bodemdaling aan het maaiveld. Dit scenario is gemodelleerd door NAM (NAM 2014b) en gereviewd door internationale experts (Mines ParisTech, 2015; TU Clausthal, 2016). NAM concludeert dat een bodemdalingssom zou kunnen ontstaan met een maximale bodemdaling van 14 cm over een periode van ongeveer 8000 jaar (NAM 2014b). Prof. Dr.-Ing. Hou (TU Clausthal, 2016) concludeert dat er maximaal 26 cm bodemdaling zou kunnen ontstaan na duizenden jaren. In de bijgaande notitie concludeert TNO op basis van onafhankelijke berekeningen dat er ongeveer 10 tot 12 cm bodemdaling kan plaatsvinden bij maximale zoutoplossing.

De redenering over het ontsnappen van een gaswolk is niet fysisch onderbouwd.

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75

*Bewering 4:* Zie Bewering 2B.

*Bewering 5:* Hoofdstuk 3: Vorming van zoutcavernes en bodemdaling  
Het te injecteren water wordt conform het waterinjectiemanagement plan periodiek op samenstelling geanalyseerd. Deze samenstelling voldoet aan de gestelde normen. Staatstoezicht op de Mijnen ziet hier op toe. De waarschijnlijkheid en gevolgen van zoutoplossing wordt behandeld in verschillende rapporten (bijv. NAM, 2014b; NAM, 2014c; Mines ParisTech, 2015; TU Clausthal, 2016) en bijgaande notitie. De gedeelde conclusie is dat grootschalige oplossing onwaarschijnlijk is en de gevolgen van eventuele oplossing beperkt zijn.

*Bewering 6:* Dit punt wordt niet behandeld in de notitie. Hierbij een korte reactie:

Het injectiewater is technisch terugneembaar mocht dit noodzakelijk zijn. Vanwege de lage permeabiliteit (doorlatendheid) van de carbonaatreservoirs zal dit wel moeite (en tijd) kosten. Een klein deel zal technisch niet terugneembaar zijn omdat dit zich aan het reservoirgesteente hecht.

*Bewering 7:* Dit punt wordt niet behandeld in de notitie.

*Bewering 8:* Hoofdstuk 5: Hydrofractie

In het reservoir is de effectieve horizontale spanning door de gasdepletie veranderd. Tijdens injectie kan hierdoor in het reservoir de injectiedruk in de directe nabijheid van de sommige putten boven 'hydrofracking' condities uitkomen. Een eventuele ontstane hydrofrack zal in het reservoir blijven (NAM, 2015a, bijgaande notitie).

*Bewering 9:* Hoofdstuk 4.1: Staat van de gasvelden voor injectie

Het KNMI kan sinds 1995 alle bevingen in Twente detecteren vanaf een magnitude van 1,5 en lokaliseren vanaf een magnitude 1,5 tot 2,0 (Dost et al., 2010). Er kan niet uitgesloten worden dat bevingen met magnitudes onder de 1,5 zijn voorgekomen. Deze bevingen zijn echter niet voelbaar aan het aardoppervlak.

*Bewering 10:* Dit punt wordt niet behandeld in de notitie. Hierbij een korte reactie:

Royal HaskoningDHV heeft verschillende alternatieven voor waterinjectie onderzocht (Royal HaskoningDHV, 2016b). Royal HaskoningDHV concludeert dat op dit moment geen nuttige toepassingen bestaan voor het zoutproduct dat na waterzuivering ontstaat. Royal HaskoningDHV heeft daarom gekeken of een bruikbaar zoutproduct kan worden gemaakt met een andere type zuivering. In dit scenario heeft Royal HaskoningDHV berekend dat een groot deel (ongeveer 85%) van het zout na zuivering eventueel geschikt is voor verkoop als stroozout en voor hergebruik in de bouw. Royal HaskoningDHV beschouwt dit echter

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75

niet als een haalbaar alternatief voor waterinjectie: “*De optimalisatie heeft nog te veel technische en commerciële risico’s om als haalbaar alternatief te worden beschouwd*”.

*Bewering 11: Appendix II: Extra veld-specifieke informatie*

De gemiddelde reservoirdruk in de reservoirs door waterinjectie blijft onder de initiële druk van het reservoir en de maximale einddruk in het reservoir zal onder de initiële druk blijven. (NAM, 2015a en NAM, 2015b). De redenering van SAT-TC m.b.t. de oorspronkelijke druk is geldig voor een simpel hydrologisch systeem met water. Deze redenering is niet geldig voor de gasvelden in Twente.

*Bewering 12: Appendix II: Extra veld-specifieke informatie*

Huidige waterinjectie vindt plaats in de Zechstein 2 en 3 carbonaatlagen. Deze lagen zitten op een diepte van ongeveer 1150 tot 1500 m.

*Bewering 13: Dit punt wordt niet behandeld in de notitie. Hierbij een korte reactie:*

NAM heeft de mogelijke zoutoplossing en de eventuele gevolgen gemodelleerd nabij de put en in het reservoir (NAM 2014b; NAM, 2014c). Deze studies zijn gereviewd door Mines ParisTech (2015) en TU Clausthal (2016). TNO heeft bijgaande notitie en een notitie met kenmerk 16-10.077 geschreven over de continuïteit van de anhydrietlaag en de mogelijkheid van het oplossen van steenzout.

TNO-rapport

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75

## Notitie: waterinjectie in Twentse gasvelden

Datum 25 november 2016

Auteur(s) TNO AGE

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 56 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever

Projectnaam

Projectnummer

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

## Samenvatting

In drie gedepleteerde gasvelden in Twente (Tubbergen, Rossum-Weerselo en Tubbergen-Mander) wordt sinds 2011 water geïnjecteerd. Dit injectiewater is afkomstig van oliewinning in het Schoonebeekveld (Drenthe).

In deze notitie is gekeken naar de effecten van deze waterinjectie met betrekking tot:

1. cavernevorming en bodemdaling
2. breukstabiliteit
3. hydrofractie

Met betrekking tot de hierboven genoemde punten leidt dit tot de volgende bevindingen, gebaseerd op indicatieve berekeningen van TNO-AGE:

Cavernevorming en bodemdaling:

- Het is zeer onwaarschijnlijk, dat een caverne van significant grootte zal worden gevormd door het oplossen van zout ten gevolge van waterinjectie in de Twentevelden;
- In het onwaarschijnlijke geval, dat een grote hoeveelheid zout wordt opgelost, blijven de effecten aan het maaiveld beperkt tot geleidelijke bodemdaling in de orde van 10 cm (gebaseerd op het Rossum-Weerselo veld). Bij de andere velden zal dit kleiner zijn, vanwege de lagere volumes van geïnjecteerd water.

Breukstabiliteit:

- Injectie van water en de daarmee gepaard gaande veranderingen in de poriëndruk en afkoeling van het reservoir leidt tot spanningsveranderingen op de breuken in de drie reservoirs;
- De initiële spanningscondities in het reservoir zijn gunstig. Er zijn relatief grote spanningsveranderingen nodig voor breukreactivatie;
- Afkoeling rondom de injectieputten door injectie van koud water heeft een negatief effect op de breukstabiliteit. In combinatie met poriëndrukverandering kan dit mogelijk lokaal leiden tot een spanningsverandering, die groot genoeg is voor lokale breukreactivatie.

Hydrofractie:

- De totale spanningsverandering (combinatie van druk en temperatuur) kan – onder de door de NAM gekozen condities - in vier putten leiden tot hydrofractie;
- Lokaal kunnen dichtbij de put reeds bestaande, ongunstig georiënteerde scheuren verschuiven of langer worden. Hydrofractie kan tijdens de scheurvorming leiden tot (micro-) seismiciteit met typische magnitudes van -1,0 en kleiner;
- Zowel de spanningstoestand als het materiaalgedrag van zout zorgt ervoor, dat eventuele “fracs” zich tot de carbonaatlagen zullen beperken. Er zijn geen verwachte gevolgen aan of nabij het maaiveld.

Dit is in lijn met bevindingen van eerdere studies m.b.t. de waterinjectie in Twente (NAM, 2014b; NAM, 2014c; NAM, 2015a) en eerdere reviews (Ellsworth, 2015; Mines ParisTech 2015; TU Clausthal, 2016).

Monitoring:

Het eventueel optreden van geïnduceerde aardbevingen ten gevolge van waterinjectie in de drie gedepleteerde gasvelden in Twente is niet uit te sluiten op basis van de huidige analyse, maar TNO-AGE acht dit niet waarschijnlijk. Seismische monitoring van de waterinjectie,

gericht op het waarnemen van kleine aardbevingen (magnitudes tussen de 0,5 en 1,0), waarbij geen schade optreedt, is zodoende van belang om de analyse te staven. Als tegen de verwachting in toch dergelijke bevingen zouden worden geregistreerd, moeten aanvullende maatregelen (waaronder additioneel onderzoek) worden genomen.

De NAM heeft deze aanbeveling inmiddels opgevolgd door een netwerk van 7 extra geofoons te installeren in Twente. Dit maakt het, volgens de NAM, mogelijk om alle aardbevingen met magnitudes van 0,5 en groter in de regio te waar te nemen (NAM, 2016b).

In de context van het voorliggende project (waterinjectie afkomstig uit het Schoonebeekveld in de drie gedepleteerde gasvelden in Twente) geeft de huidige verificatie - in combinatie met uitvoering van het voorliggende monitoringsplan door de vergunninghouder - op dit moment geen aanleiding tot nadere studie.



# Inhoudsopgave

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
9/56

<b>Samenvatting</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Inleiding</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Geologie</b> .....	<b>11</b>
2.1 De carbonaat reservoirs .....	11
2.2 Continuïteit anhydrietlagen.....	12
2.3 Doorlatenheid anhydrietlagen en steenzoutlagen .....	12
2.4 De zandsteen reservoirs.....	14
<b>3 Vorming van zoutcavernes en bodemdaling</b> .....	<b>16</b>
3.1 Zoutoplossing door waterinjectie .....	16
3.2 Mogelijke bodemdaling door grootschalige zoutoplossing .....	17
3.3 Cavernevorming .....	20
<b>4 Breukstabiliteit</b> .....	<b>21</b>
4.1 Staat van de gasvelden voor injectie.....	21
4.2 Effecten van veranderingen in de poriëndruk in de carbonaatreservoirs.....	22
4.3 Effecten van veranderingen in de poriëndruk in het zandsteen-reservoir.....	24
4.4 Effecten van veranderingen in de temperatuur .....	26
<b>5 Hydrofractie</b> .....	<b>27</b>
5.1 Aannames.....	27
5.2 Resultaten.....	27
<b>6 Bevindingen</b> .....	<b>31</b>
<b>Referenties</b> .....	<b>33</b>
<b>Begrippenlijst</b> .....	<b>35</b>
<b>Ondertekening</b> .....	<b>37</b>
<b>Appendix I: Rapporten en notities</b> .....	<b>38</b>
<b>Appendix II: Veld-specifieke informatie</b> .....	<b>41</b>
<b>Appendix III: Berekening van afkoeling rond putten</b> .....	<b>45</b>
<b>Appendix IV: Breukstabiliteit</b> .....	<b>47</b>
<b>Appendix V: Hydrofractie</b> .....	<b>52</b>

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
10/56

## 1 Inleiding

### Achtergrond

Sinds 2011 wordt in drie leeg geproduceerde gasvelden in Twente (Tubbergen, Tubbergen-Mander en Rossum-Weerselo) water geïnjecteerd. Het water is een bijproduct van de aardolieproductie in het Schoonebeek veld in Drenthe.

### Bereik

Sinds 2011 zijn tientallen rapporten en stukken verschenen over de waterinjectie in de Twente velden<sup>1</sup>. Naar aanleiding van de verschenen rapporten en de sessie in de Tweede Kamer van 15 september 2016 heeft het ministerie van Economische Zaken aan TNO gevraagd om een samenvattende notitie te schrijven over de mogelijke gevolgen van waterinjectie met betrekking tot de volgende mogelijke effecten:

- cavernevorming en bodemdaling
- breukstabiliteit
- hydrofractie

In dit rapport worden deze onderwerpen nader bestudeerd. Bovendien zijn er ter verificatie van het eerder uitgevoerde werk enkele analyses uitgevoerd door TNO. Deze analyses zijn gedaan met behulp van indicatieve berekeningen, gebaseerd op een eenvoudige fysische voorstelling van de injectie. De achtergrondinformatie is gegeven in de rapporten en notities met betrekking tot de waterinjectie in Twente (Appendix I) en wetenschappelijke literatuur. De geraadpleegde wetenschappelijke literatuur staan vermeld in de referentielijst.

### Indeling

Dit rapport bevat de volgende hoofdstukken: 1) Inleiding, 2) Geologie, 3) Vorming van zoutcavernes en bodemdaling, 4) Breukstabiliteit, 5) Hydrofractie. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de bevindingen uiteengezet met betrekking tot bovengenoemde onderwerpen.

---

<sup>1</sup> Voor een overzicht van de rapporten en notities zie Appendix I

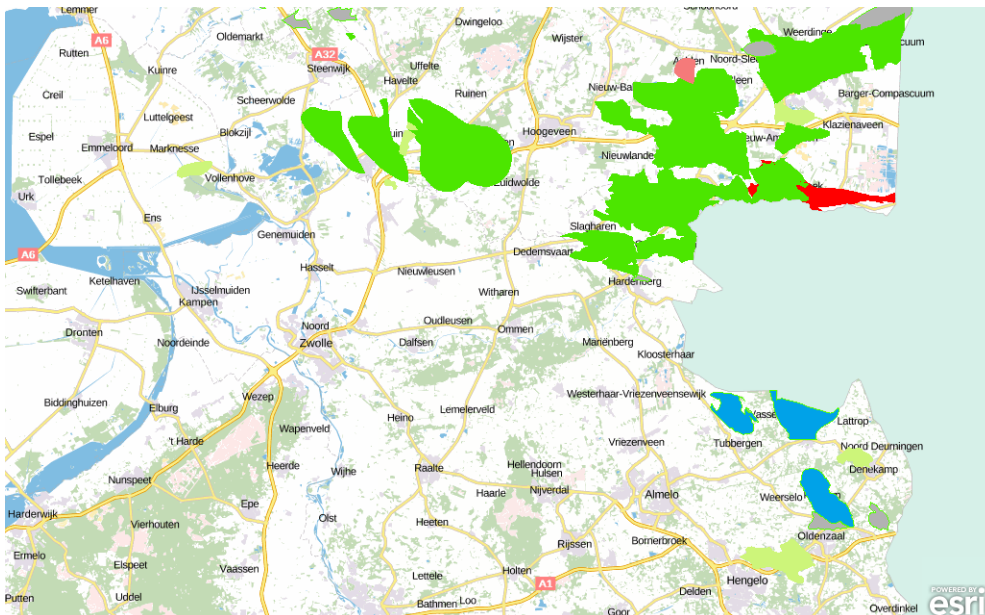
## 2 Geologie

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
11/56

In Twente bevinden zich drie leeg-geproduceerde gasvelden: Tubbergen, Rossum-Weerselo en Tubbergen-Mander (Figuur 1). Carbonaatlagen (zie begrippenlijst) uit het geologisch tijdperk *Perm* (Zechstein-2C en Zechstein-3C carbonaat) vormen hier gasreservoirs op een diepte rond de 1200 tot 1600 meter (NAM, 2014a). In het Tubbergen veld en het Rossum-Weerselo veld is ook gas gewonnen uit het dieper gelegen Boven Carboon zandsteen-reservoir (~1800 m diepte) (NAM, 2015a). Voor het Rossum-Weerselo veld is ook waterinjectie gepland voor dit zandsteenreservoir (NAM, 2015a).



Figuur 1: De locatie van de drie Twentse leeg-geproduceerde gasvelden (blauw) en het Schoonebeek aardolieveld (rood). Kaart gebaseerd op nlog.nl

### 2.1 De carbonaat reservoirs

De sedimenten van de Zechstein Groep in Twente bestaan uit anhydriet-, carbonaat- en zoutlagen (zie begrippenlijst) die circa 255 miljoen jaar geleden zijn afgezet (zie Figuur 2). In deze periode heerste in Europa een tropisch klimaat en was Nederland bedekt door een grote, ondiepe binnenzee die af en toe droog viel. In Nederland hebben gedurende deze periode 4 tot 5 indampingscycli plaatsgevonden, tijdens welke de verschillende sedimenten uit de Zechstein Groep zijn afgezet. Tijdens zulke indampingsperiodes verdampte er veel water uit de binnenzee, waardoor de zoutconcentratie toenam totdat het water verzadigd was en zout kristalliseerde. Het gekristalliseerde zout bleef vervolgens achter. Door de herhaaldelijke nieuwe instroom van zeewater vormde zich in de loop der tijd dikke zoutpakketten.

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

12/56

In de regio Twente (Figuur 1) zijn de sedimenten uit de eerste cyclus gegroepeerd in de Zechstein-1 Formatie. Deze sedimenten zijn voornamelijk afgezet in laaggelegen gebieden. Hierdoor bestaat grote laterale variatie in de dikte van deze sedimentpakketten. De opvolgende Zechstein-2, -3 en -4 formaties zijn vervolgens in nette opeenvolging, met weinig diktevariatie, afgezet (ook wel "spekkoek" genoemd, zie Figuur 3a). Alleen de carbonaatlagen (kalksteen- en dolomiet-sedimenten) zijn voldoende poreus en doorlatend om als reservoir te fungeren. De anhydriet- en steenzoutlagen werken door hun lage porositeit en doorlatendheid (zie begrippenlijst) juist als afsluitende lagen.

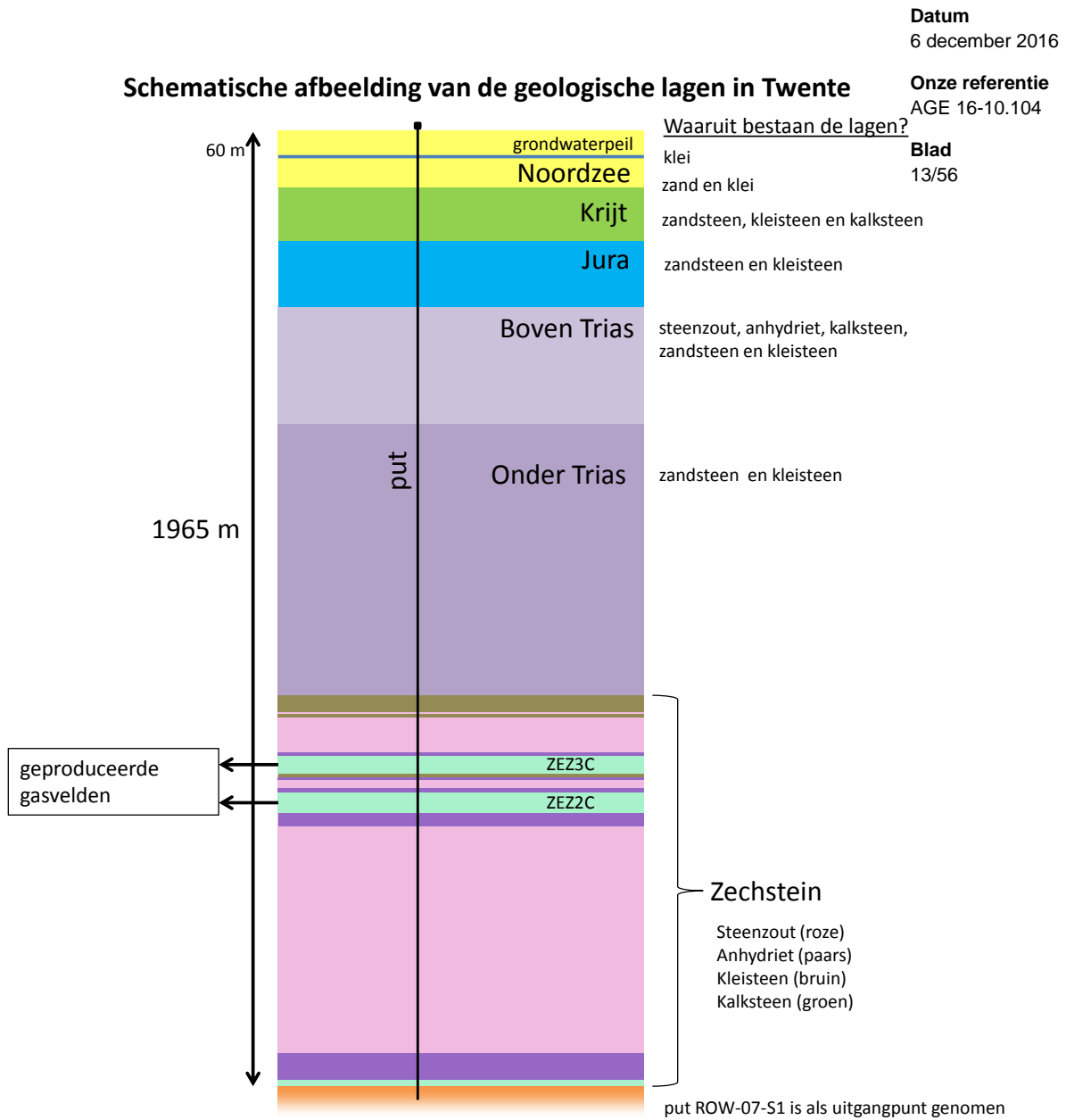
Sinds afzetting 255 miljoen jaar geleden, is een dik pakket sedimenten afgezet bovenop de Zechstein laagpakketten. Daarnaast is de nette opeenvolging van lagen verstoord geraakt door bewegingen in de aardkorst (zie ook volgende sectie). Figuur 3b geeft versimpeld weer hoe de gesteentelagen van de Zechstein Groep er op dit moment uitzien in het gebied van Twente (TNO-AGE, 2016). De diepteligging varieert nu tussen de 1200 en 2000 meter.

## 2.2 Continuïteit anhydrietlagen

Zoutlagen zijn onder hoge druk en temperatuur niet bros en hard, maar gedragen zich plastisch (zie begrippenlijst *kruip*). Door natuurlijke spanningen (zie begrippenlijst *spanning*) in de aardkorst is het zout in de ondergrond bij Twente, en dan vooral de Zechstein-1 steenzoutlagen, gaan bewegen en zijn lokaal verdikkingen in de zoutlaag ontstaan. De bovenliggende gesteentepakketten zijn daardoor opgetild en om de zoutverdikkingen heen geplooid (zie Figuur 3b). Omdat de carbonaatlagen, en in mindere mate de anhydrietlagen, zich bros gedragen, kunnen deze lagen breken als ze worden vervormd. Hierdoor kan het zijn dat deze lagen nu niet meer continu zijn in horizontale richting. Het pakket is hier en daar gebroken en verschoven, waardoor mogelijk lokaal contact kan zijn ontstaan tussen reservoirgesteenten en de zoutlaag (hallet). Een andere manier waarop dit contact kan zijn ontstaan is wanneer zout zich in breuken perst waar een anhydrietlaag gebroken is, maar niet of nauwelijks is verschoven (TNO-AGE, 2016).

## 2.3 Doorlatendheid anhydrietlagen en steenzoutlagen

De Zechstein reservoirs kunnen aardgas produceren doordat ze relatief goed doorlatend (zie begrippenlijst *doorlatendheid*) zijn. Deze doorlatendheid is het gevolg van de kleine scheurtjes (zogenaamde 'fractures') die deze carbonaten bevatten. Ervaringen tijdens de productie van het aardgas geven aan dat deze netwerken van scheurtjes zich ver uitstrekken in de horizontale richting. Deze scheurtjes zijn niet terug te vinden in de anhydrietlagen en steenzoutlagen die reservoirs aan de bovenkant afdekken. Mede hierdoor zijn de anhydriet- en steenzoutlagen niet doorlatend (NAM 2014a). Daarom kon aardgas ook lange tijd opgeslagen blijven in de Zechstein reservoirs.

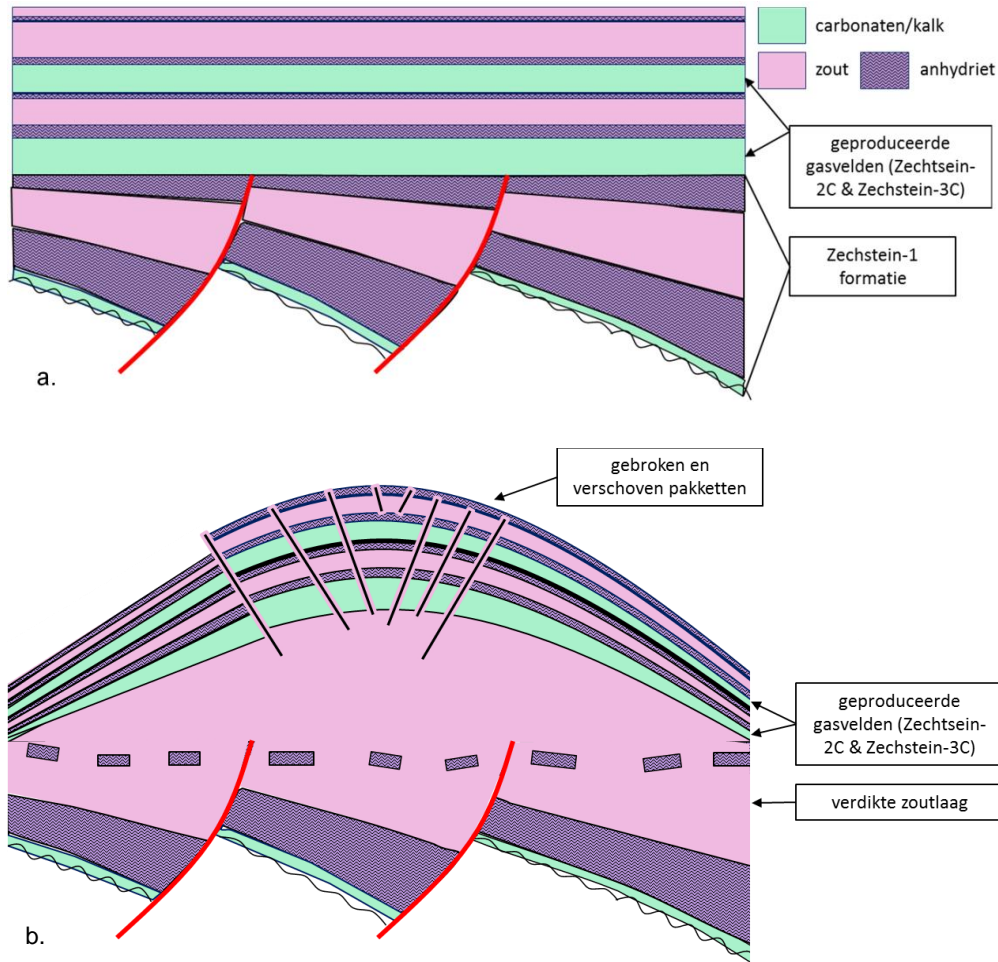


Figuur 2: Schematisch overzicht van de verschillende geologische lagen in Twente. De diktes en toppen van de lagen zijn overgenomen uit put ROW-07-S1. Injectie vindt plaats in de lagen ZEZ2C en ZEZ3C. (Figuur gebaseerd op TNO-AGE, 2016)

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
14/56



Figuur 3: a) Oorspronkelijke opeenvolging van de verschillende lagen van de Zechstein groep. Onder meer zichtbaar is de variërende dikte van de Zechstein-1 pakketten door afzetting in laaggelegen gebieden begrensd door breuken. b) Door spanningen in de aardkorst zijn zoutlagen gaan bewegen en hebben zich lokaal verdikt. De bovenliggende Zechstein pakketten zijn daardoor om de zoutpakketten heen geplooid en hier en daar gebroken en verschoven. (Figuur gebaseerd op TNO-AGE, 2016)

## 2.4 De zandsteen reservoirs

Het dieper gelegen reservoir uit het geologisch tijdperk *Carboon* bestaat uit een opeenvolging van zandsteenreservoirs die toegewezen zijn aan de Limburg Groep<sup>2</sup>. Het gaat om een afwisseling van zand en kleisedimenten die ~310 miljoen jaar geleden tijdens het Laat Carboon zijn afgezet (nlog.nl, 2016). Deze sedimenten zijn afgezet op land in een gebied dat werd gedomineerd door grote riviersystemen. Op de plek waar de rivieren stroomden is zand en grind afgezet. Naast de rivieren werd tijdens hoog water en overstromingen klei afgezet. Uit boringen in o.a. het Rossum-Weerselo veld blijkt dat de zandsteenlagen variëren

<sup>2</sup> De specifieke formatie die is gevonden in de putten in de Twentevelden is de Tubbergen Formatie. Voor een uitgebreide beschrijving van deze formatie, zie Kombrink (2008)

in dikte van 5 meter tot enkele tientallen meters (nlog.nl, 2016). Kernen uit ditzelfde veld<sup>3</sup> laten zien dat de zanden zeer poreus zijn en een grote doorlatendheid hebben, terwijl de doorlatendheid van de kleilagen relatief laag is.

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

15/56

---

<sup>3</sup> De kernen zijn genomen in put ROW-06-S1. Gegevens van [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl)

### 3 Vorming van zoutcavernes en bodemdaling

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
16/56

Het water van het Schoonebeek olieveld heeft een relatief laag zoutgehalte (NAM, 2016a) ten opzichte van volledig met zout verzadigd water. Het water wordt geïnjecteerd in gasvelden in Twente in het gedepleteerde carbonaatreservoir omgeven door Zechstein zout (haliet) en anhydriet<sup>4</sup>. De anhydrietlaag zit direct boven het reservoir (zie Hoofdstuk 2). Aangezien anhydriet niet permeabel en slecht oplosbaar is, kan hier geen oplossing plaatsvinden. Haliet is echter een zeer goed oplosbaar zout. Eventueel contact tussen het geïnjecteerde water en het haliet zal daarom zoutoplossing veroorzaken.

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de mogelijkheid van zoutoplossing en de potentiële (ongecontroleerde) cavernevorming. Ditzelfde onderwerp is eerder onderzocht door NAM (NAM 2014c) en gereviewd door Prof. Dr.-Ing. Hou (TU Clausthal) en Dr. Bruel (Mines ParisTech) in 2016. Vervolgens wordt in dit hoofdstuk gekeken naar de gevolgen van grootschalige zoutoplossing in verband met potentiële bodemdaling. Hierbij is het belangrijk op te merken dat het zeer onwaarschijnlijk geacht wordt dat grootschalige zoutoplossing zal plaatsvinden (redenering hiervoor in sectie 3.1). Toch wordt in sectie 3.2 gekeken naar de eventuele gevolgen van zulke zoutoplossing. Hierbij zijn de aannames telkens zo gekozen dat de berekeningen een zo groot mogelijke invloed van de waterinjectie laten zien. De werkelijke gevolgen zullen vanwege de conservatieve aannames minder groot zijn. In sectie 3.3 wordt vervolgens aandacht besteed aan de fysische redenering waarom cavernevorming niet realistisch geacht wordt en aan wat de gevolgen zouden zijn van zulke (onrealistische) cavernevorming.

#### 3.1 Zoutoplossing door waterinjectie

Ten eerste, enkele punten over de oplossing van haliet in water en de potentie voor grootschalige zoutoplossing.

- Haliet (NaCl) is een zout met een zeer hoge wateroplosbaarheid. Voor de volledige oplossing van 1 m<sup>3</sup> haliet (2150 kg) is 7 m<sup>3</sup> water nodig.
- Oplossing van haliet kan plaatsvinden wanneer onverzadigd water in fysiek contact staat met haliet. In het geval van de waterinjectie kan dit plaatsvinden nabij breuken en op plekken in het reservoir waar het geïnjecteerde water in direct contact komt te staan met het haliet.
- Direct contact tussen het reservoirgesteente en haliet bestaat in de Twente gasvelden meestal niet vanwege de anhydrietlaag die zich op veel plaatsen tussen het reservoir en het haliet bevindt. Anhydriet is vrijwel niet oplosbaar in water en werkt als barrière voor zoutoplossing.
- De oplossingsnelheid van haliet is afhankelijk van de mate van verzadigdheid (de zoutconcentratie) van het water. Naarmate het water

<sup>4</sup> Het zandsteenreservoir in Rossum-Weerselo wordt buiten beschouwing gelaten in dit hoofdstuk over cavernevorming omdat dit reservoir niet omgeven is door zout. De afsluitende lagen voor het zandsteenreservoir bestaan uit schalie- en kleilagen binnen de zandsteenformatie en de dikke Zechstein-1 anhydrietlaag aan de bovenkant (NAM, 2014a).



**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

17/56

zouter wordt, neemt de oplossingsnelheid af. Voor snelle oplossing van haliet moet (snelle) circulatie van water plaatsvinden. Hierdoor kan voortdurend relatief zoet water worden aangevoerd wat in contact komt met haliet waardoor zoutoplossing voortdurend kan plaatsvinden.

- Vanwege de lage doorlatendheid van het reservoirgesteente en de hoge viscositeit<sup>5</sup> van water t.o.v. aardgas dat zich in de carbonaatlagen bevindt, zal circulatie zeer langzaam op gang komen. Een mogelijke uitzondering is in scheuren vlakbij de put en aan de bovenkant van het reservoir. Over het algemeen komt hier anhydriet voor. Het is echter niet uitgesloten dat haliet lokaal in direct contact staat met het carbonaatreservoir. In dat geval is het onwaarschijnlijk dat de scheuren open zijn, omdat deze zich dan gevuld zal hebben met haliet aangezien haliet zich op deze diepte plastisch gedraagt (zie begrippenlijst *kruip*). Hierdoor zal circulatie, ook in de scheuren, slechts zeer langzaam op gang komen.
- Op een geologische tijdschaal (duizenden tot miljoenen jaren) is het, ook voor (vrijwel) stilstaand water, mogelijk om volledig zoutverzadigd te raken door middel van diffusie.

Gezien de bovenstaande punten is het onwaarschijnlijk dat een significante hoeveelheid zout zal oplossen ten gevolge van waterinjectie in de gedepleteerde gasvelden in Twente. Daarnaast is het formatiewater<sup>6</sup>, dat miljoenen jaren de tijd heeft gehad om zout op te lossen, niet volledig verzadigd (NAM, 2014b). Dit wijst erop dat zoutoplossing in het reservoir niet snel plaatsvindt.

## 3.2 Mogelijke bodemdaling door grootschalige zoutoplossing

Voor analyse van een grootschalige zoutoplossing en de resulterende bodemdaling zijn aannames gedaan. Deze aannames zijn zodanig gekozen dat een de maximale hoeveelheid zout wordt opgelost, hoewel dit onwaarschijnlijk is (zie sectie 3.1).

De aannames zijn:

- De carbonaatreservoirs in het zout zijn volledig omgeven door haliet wat sterk oplosbaar is. Er is geen barrière van anhydriet, wat wel aanwezig is in de gedepleteerde gasvelden in Twente.
- Het geïnjecteerde water is initieel volledig zoet en lost onmiddellijk de maximale hoeveelheid zout op zonder dat hiervoor circulatie nodig is. Elke 7 m<sup>3</sup> water leidt tot de onmiddellijke oplossing van 1 m<sup>3</sup> zout.
- Al het zout wordt opgelost aan de bovenkant en onderkant van het reservoir, over hetzelfde oppervlak als het reservoir (Figuur 4).
- Het opgeloste zoutvolume wordt gelijk verdeeld over de caverne aan de bovenkant en de caverne aan de onderkant van het reservoir, aangezien het reservoir (in het model) aan zowel bovenkant als onderkant in contact staat met haliet (zie eerste aanname) waardoor het water zich ook naar de onderkant van het reservoir zal verplaatsen.

<sup>5</sup> Viscositeit: weerstand tegen stroming (ook wel stroperigheid), zie ook begrippenlijst

<sup>6</sup> Formatiewater: het water dat van origine in de formatie voorkomt

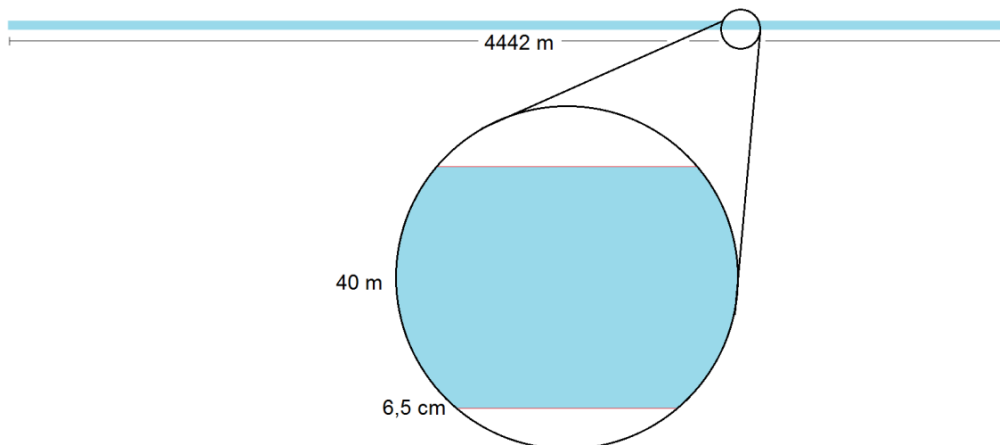
**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
18/56

- Het reservoir heeft een cilindrische geometrie zodat verschillende methodes voor bodemdalingsanalyse gemakkelijk vergeleken kunnen worden (Figuur 4).
- Het aan de bovenkant opgeloste volume zal volledig verdwijnen omdat het met zout verzadigde water vervolgens kan wegzakken naar het onderliggende reservoir. De aan de onderkant gevormde caverne wordt stabiel geacht, omdat deze altijd met water gevuld zal zijn.
- De injectie, oplossing van het zout en de vervorming van de ondergrond gebeuren instantaan. Er wordt geen rekening gehouden met de tijdsduur van de waterinjectie (orde 20 jaar).

De aannames zijn zo gekozen dat ze leiden tot een zo groot mogelijke bodemdaling (een "worst-case" scenario). Het is zeer onwaarschijnlijk dat de waterinjectie tot deze bodemdaling zal leiden gezien de eerder genoemde punten met betrekking tot de potentie voor grootschalige zoutoplossing.



Figuur 4: Aangenomen geometrie van de gevormde cavernes en het gedepleteerde gasveld. Deze geometrie wordt omgeven door het omliggende gesteente (weggelaten voor deze visualisatie). De rode lijnen aan de onderkant en bovenkant van het ingezoomde reservoir geven de hoogte van de gevormde cavernes aan.

Gebaseerd op de maximale injectievolumes (Royal HaskoningDHV, 2016b), en de hierboven beschreven aannames, zal - onder bovenstaande aannames - de grootste hoeveelheid zout oplossen in het Rossum-Weerselo veld, waar in totaal maximaal 29,4 miljoen m<sup>3</sup> water geïnjecteerd zal worden (~28 miljoen m<sup>3</sup> in de Z2 en Z3 carbonaat-reservoir (via 5 putten) en 1,4 miljoen m<sup>3</sup> in het zandsteenreservoir (via 1 put)). Het Rossum-Weerselo veld is daarom gekozen voor verdere analyse.

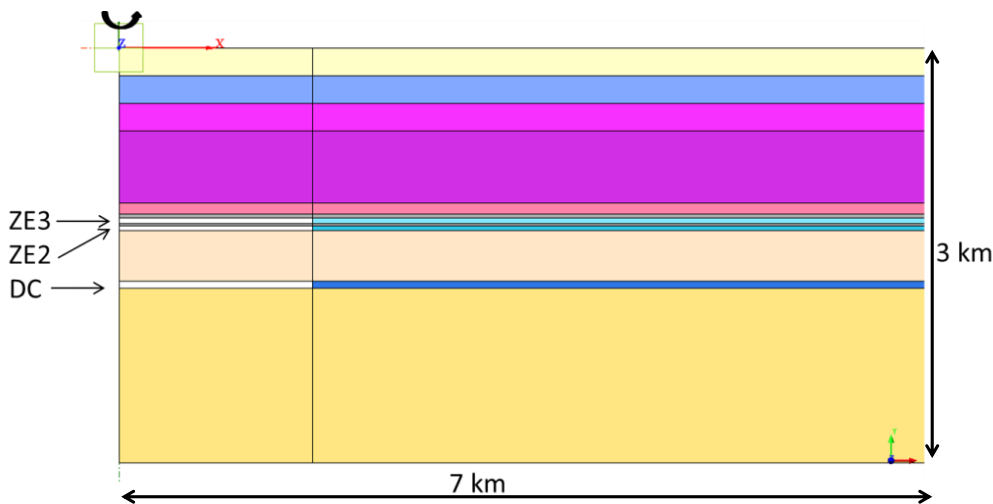
De ~28 miljoen m<sup>3</sup> water in de carbonaatreservoirs lost 4,05 miljoen m<sup>3</sup> zout op (volgens aanname hierboven), verdeeld over 4 cilindrische volumes van gelijke grootte (een volume aan de bovenkant en aan de onderkant voor elk van de twee carbonaatlagen) met een oppervlak van 15,5 km<sup>2</sup> (het oppervlak van het Rossum-Weerselo veld). Dit betekent dat elke caverne 6,5 cm hoog is.

**Datum**  
6 december 2016

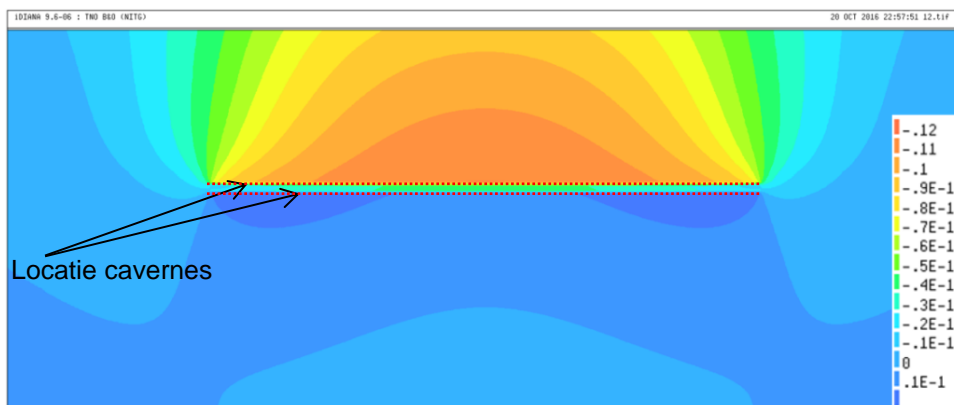
**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
19/56

Van deze simpele geometrie is een eindige-elementen model<sup>7</sup> gemaakt, gebaseerd op de aanname van horizontale gelaagdheid van de gesteentelagen. Het effect van het verdwijnen van de twee volumes aan de bovenkant van de carbonaat-reservoirs vertaalt zich in komvormige bodemdaling aan het maaiveld, met een maximale diepte van 9,6 cm (zie Figuur 6). Dezelfde geometrie is doorgerekend met een semi-analytische methode voor de voorspelling van bodemdaling (Fokker & Orlic, 2006). De semi-analytische methode voorspelt een bodemdalingssom met een maximale diepte van 10,5 cm. Deze getallen zijn van dezelfde orde van grootte als de bodemdalingberekeningen van de NAM, die met een gedetailleerder reservoir en geomechanisch model uitkomen op een maximale bodemdaling van 12-14 cm (NAM, 2014b)



Figuur 5: De geometrie van het gebruikte eindig-elementen model. De locatie van de carbonaaten- en zandsteen reservoirs is aangegeven.



Figuur 6: Neerwaartse verplaatsing in de ondergrond (in meters) ten gevolge van de verwijdering van de zoutvolumes aan de bovenkant van de beide carbonaatreservoirs. In dit model zijn de volumes aan de onderkant van de carbonaatreservoirs niet

<sup>7</sup> Eindige-elementen modellen worden in zeer veel industrieën toegepast om materiaalgedrag onder belasting mee te analyseren en voorspellen. Behalve voor modellen van de ondergrond worden ze bijvoorbeeld ook toegepast bij het ontwerpen van vliegtuigen, auto's, bruggen en gebouwen.

meegenomen. Deze volumes vervormen elastisch en hebben een minimale bijdrage aan de bodemdaling. Maximale waarde van de bodemdaling aan het maaiveld is 9.6 cm.

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
20/56

### 3.3 Cavernevorming

Het is zeer onwaarschijnlijk dat een significante hoeveelheid zout zal oplossen ten gevolge van waterinjectie in de gedepleteerde gasvelden in Twente (zie sectie 3.1). Echter, zelfs als grootschalige zoutoplossing plaats zal vinden, zal deze niet leiden tot de vorming van cavernes (met zout water gevulde holtes) omdat zout zich op de diepte van de gasvelden plastisch gedraagt. Bij eventuele oplossing van haliet, zal de gevormde holte zich na enige tijd sluiten door het plastische kruipgedrag (zie begrippenlijst) van het zout. Het water kan immers het carbonaatgesteente instromen. Dit is tegenstellig tot commerciële zoutcavernes, waar het water enkel via de put kan ontsnappen. De eventueel gevormde holte wordt dus weer 'dichtgedrukt', waardoor zich geen grote holte kan vormen.

Hoewel de vorming van cavernes fysisch onrealistisch is, wordt hier gekeken naar de potentie van zoutcavernes om in te storten als deze toch zouden worden gevormd. Een ongewenste caveerne zou een ongunstige geometrie kunnen hebben, zoals een zeer brede en lage caveerne. Een dergelijke caveerne zou dan makkelijker kunnen instorten. Ervaring in koolmijnen met lage en horizontaal ver strekkende holtes leert dat instortingen kunnen ontstaan als een ondergraving groot genoeg is. Deze instortingen worden gekenmerkt door 3 zones: (1) de instortingszone met een hoogte van 2-8 maal de hoogte van de oorspronkelijke ondergraving, (2) de verbroken zone, met een hoogte van 30-50 maal de hoogte van de oorspronkelijke ondergraving, (3) een ongebroken, vervormde zone daarboven, die reikt tot het maaiveld (en resulteert in geleidelijke bodemdaling, zie sectie 3.2) Voor een caveerne van 6,5 m hoog (zie sectie 3.2) vertaalt zich dit in een instortingszone van <1m hoog en een verbroken zone van <10 m hoog. Het Zechstein zout is tientallen meters dik, dus bij instorting zal enkel het onderste deel van de zoutlaag verbroken raken waardoor het water niet kan gaan lekken naar bovenliggende waterlagen.

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
21/56

## 4 Breukstabiliteit

Omdat door waterinjectie de spanningen in en rond het reservoir veranderen, is door NAM (NAM, 2015a) onderzoek verricht naar de kans op geïnduceerde aardbevingen. Professor William Ellsworth, een expert (Geologische Dienst van de Verenigde Staten van Amerika, nu Stanford University) op het gebied van geïnduceerde aardbevingen heeft een review (Ellsworth, 2015) uitgevoerd op dit rapport van NAM. Beide concluderen dat het mogelijk moet zijn om water te injecteren in de leeg geproduceerde gasvelden zonder hierbij (voelbare) aardbevingen te veroorzaken. Prof. Ellsworth plaatst hierbij de kanttekening dat het wordt aangeraden de gevoeligheid van het seismische netwerk (van het KNMI) te verbeteren naar een minimaal waarneembare magnitude tussen 0,5 en 1,0. Dit omdat het met de huidige inzichten niet is te verwachten dat de waterinjectie aardbevingen zal veroorzaken. Mocht dit wel gebeuren, dan is dit een duidelijk aanwijzing dat de huidige inzichten onjuist zijn. Bij registratie van kleine bevingen kan er vroegtijdig worden ingegrepen. De NAM heeft deze aanbeveling inmiddels opgevolgd door een netwerk van 7 extra geofoons te installeren in Twente, waardoor aardbevingen met magnitudes van 0,5 en groter in de regio kunnen worden waargenomen (NAM, 2016b).

Ter verificatie van het werk van de NAM en Professor Ellsworth heeft TNO berekeningen uitgevoerd met betrekking tot de spanningsontwikkeling tijdens gasproductie en waterinjectie in de Zechstein carbonaten en Carboon zandsteen. Hierbij is gekeken naar de zowel invloed van *poriëndruk* (zie begrippenlijst) als *temperatuur* op de spanningsontwikkeling en breukstabiliteit. Een breukstabiliteitsanalyse is indicatief voor de potentie voor aardbevingsvorming omdat aardbevingen het resultaat zijn van breukinstabiliteit. Deze berekeningen zijn gebaseerd op een versimpelde weergave<sup>8</sup> van de werkelijkheid en geven daarom een **indicatie** van de breukstabiliteit. In dit hoofdstuk worden de berekeningen op hoofdlijnen doorgenomen. Voor additionele figuren en uitleg, zie Appendix IV.

### 4.1 Staat van de gasvelden voor injectie

Aardgasproductie uit de Twente velden is halverwege de jaren '50 begonnen (NAM, 2007) en gestopt in 2009 (NAM, 2009). In 2011 is men vervolgens begonnen met injectie van geproduceerd water van het Schoonebeek olieveld (dit veld bevindt zich in de Bentheimer zandsteen, uit het geologisch tijdvak *Krijt*). Injectie vindt plaats met een snelheid van 4000-5000 m<sup>3</sup> per dag (NAM 2015b). Dit is lager dan de vooraf verwachte injectiesnelheid (12.500 m<sup>3</sup> per dag) door lagere volumes van productiewater vanuit het Schoonebeek veld (Royal HaskoningDHV, 2016b).

---

<sup>8</sup> Effecten veroorzaakt door de geometrie van het reservoir (reservoir begrensd door breuken, koepel-structuur, verzet van breuken, ruimtelijke verschillen in gesteente-compactie (zie begrippenlijst), drukverschillen en lokale temperatuur veranderingen) en aanwezigheid van zout (tijdsafhankelijke effecten, kruip) kunnen niet meegenomen worden in deze analyse. Initiële spanningssituatie en sterkte van de breuken is ook onzeker.

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
22/56

Het produceren van aardgas uit een gasveld verlaagt de poriëndruk in het reservoir waardoor de spanningen in en rond het reservoir veranderen. Dit beïnvloedt de beginstaat van het reservoir voor aanvang van waterinjectie. Daarnaast zal waterinjectie op haar beurt de spanningen in en rond het reservoir doen veranderen. Voor de Twentevelden zijn geen directe gegevens beschikbaar over de spanningssituatie van de velden na aardgasproductie. Er is echter wel indirecte informatie beschikbaar.

Zo is er tijdens de 55 jaar van aardgasproductie geen seismische activiteit waargenomen (NAM, 2015a; KNMI, 2016). Dit gaat om aardbevingen met een magnitude groter dan 1,5 op de schaal van Richter<sup>9</sup>. Dit wijst erop dat het aannemelijk (doch niet bewezen) is dat de breuken in de ondergrond niet onder een kritische spanning<sup>10</sup> hebben gestaan. In de deterministische studie hazard (zie begrippenlijst) (Van Eijs et al., 2006; Van Thienen-Visser et al., 2012) komt naar voren dat de kans op een beving tijdens gasproductie voor deze velden varieerde tussen 19% en 42% (zie Tabel 1). De Zechstein formaties van Rossum-Weerselo en Tubbergen kregen een verwaarloosbare kans op beven toegeschreven vanwege het relatief kleine breukoppervlak in deze velden.

Tabel 1. Overzicht van de kans op beven door gaswinning zoals vermeld in de DHAIS studie (Van Thienen-Visser et al., 2012)

Gasveld	Formatie	Kans op beven	Opmerking
Rossum-Weerselo	Carboon	19%	
Rossum-Weerselo	Zechstein	Verwaarloosbaar	Relatief klein breukoppervlak
Tubbergen	Carboon	19%	
Tubbergen	Zechstein	Verwaarloosbaar	Relatief klein breukoppervlak
Tubbergen-Mander	Zechstein	42%	

Injectietesten in Rossum-Weerselo en Tubbergen-Mander hebben aangetoond dat de oorspronkelijke spanningssituatie in de Twentevelden (zowel de Zechstein als het Carboon reservoir) bijna isotroop was (NAM, 2015a). Dat betekent dat spanningen in alle richtingen ongeveer gelijk zijn. Het gevolg hiervan is o.a. dat relatief grote spanningsveranderingen nodig zijn om breuken in de ondergrond te destabiliseren. Dit omdat de beginsituatie relatief stabiel is.

## 4.2 Effecten van veranderingen in de poriëndruk in de carbonaatreservoirs

In het carbonaatreservoir vindt stroming voornamelijk plaats door het netwerk van scheuren en breuken. Het reservoirgesteente heeft een lage doorlatendheid

<sup>9</sup> Hierbij moet worden opgemerkt dat voor 1995 het KNMI netwerk nog niet alle bevingen met magnitude groter dan 1,5 kon registreren. Na 1995 zou iedere beving met een magnitude groter dan 1,5 gemeten moeten zijn door het KNMI netwerk.

<sup>10</sup> Met kritische spanning wordt bedoeld dat de spanning waaronder een breuk staat een zodanige waarde heeft, dat slechts een kleine verandering in het spanningsveld ervoor kan zorgen dat een breuk gaat bewegen.

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

23/56

(permeabiliteit), maar opslag in het gesteente is wel mogelijk vanwege het relatief grote poriënvolume. Door de lage doorlatendheid van het gesteente loopt bij rechtstreekse injectie in breuken en scheuren de druk in de breuk hoger op dan in het omliggende gesteente. Ook wanneer niet rechtstreeks in een breuk wordt geïnjecteerd kunnen verschillen ontstaan tussen de waterdruk in de scheuren en breuken enerzijds en het omliggende gesteente anderzijds. Hydraulische connectiviteit<sup>11</sup> tussen het scheurennetwerk en de breuken speelt daarbij een belangrijke rol. De dichtheid van het scheuren-netwerk zal het hoogst zijn in de omgeving van de grotere breukstructuren, waardoor de kans op drukverschillen tussen de breuk en het omliggende gesteente hier het grootst is. Tijdens de productiefase neemt de druk in de gesteentescheuren (en de daarmee in verbinding staande breuken) sneller af dan in het gesteente zelf. De (tijdelijk) lagere druk in scheuren en in breuken ten opzichte van het gesteente werkt dan stabiliserend. Tijdens de injectiefase vindt het omgekeerde proces plaats. De druk in de scheuren en de breuken neemt eerder toe dan in het aangrenzende gesteente. Dit effect wordt verder versterkt door de hogere viscositeit<sup>5</sup> van het water ten opzichte van het gas.

Er zijn twee scenario's doorgerekend voor de carbonaatreservoirs in Twente. In het eerste scenario wordt uitgegaan van een sterke koppeling tussen poriëndruk en spanning. Uit experimenten en productie-ervaring blijkt dat deze koppeling in carbonaatgesteenten doorgaans minder sterk is dan aangenomen in dit eerste scenario (zie o.a. Worthington & Longeron, 1991), waardoor dit scenario minder representatief geacht wordt voor de gasvelden in Twente. Het tweede scenario houdt hier rekening mee en gebruikt een koppeling die representatiever geacht wordt voor carbonaatgesteenten. Voor de berekeningen wordt uitgegaan van een cohesieloze breuk, waarvan de sterkte alleen afhangt van de wrijving op de breuk ten gevolge van de spanning die loodrecht op de breuk staat<sup>12</sup>. Daarnaast wordt aangenomen dat breuk zo georiënteerd dat deze makkelijk in beweging te brengen is. De aannames voor zowel de sterkte als de oriëntatie van de breuk zijn zo gekozen de breuk zo gemakkelijk mogelijk verschuift. In de analyse wordt gekeken naar de ontwikkeling van schuifspanning (destabiliserend) en normaalspanning (stabiliserend). Voor uitleg, zie Appendix IV.

Onder de gekozen aannames blijven alle breuken stabiel, met uitzondering van de breuk in het Tubbergen reservoir in scenario 1 (zie Figuur A4 in Appendix IV). Gezien de onrealistische sterke koppeling tussen poriëndruk en spanning in dit scenario wordt dit niet als een indicatie genomen voor het optreden van bevingen. Figuur 7 toont een diagram van de stabiliteitsanalyse van een carbonaatreservoir in het Rossum-Weerselo veld.

---

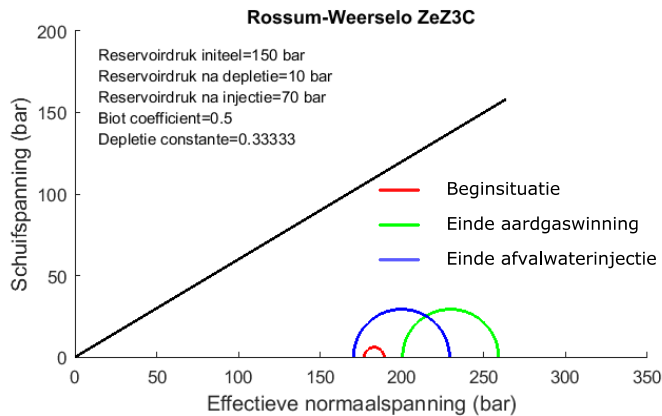
<sup>11</sup> Hydraulische connectiviteit: de mate van verbinding in termen van vloeistofdruk en vloeistofstroming

<sup>12</sup> Deze aanname houdt in dat de breuk zich min of meer gedraagt als een blok dat op tafel ligt. De kracht die het kost om het blok te verschuiven hangt af van hoe hard er van boven op het blok wordt gedrukt. Er is geen cohesie (zoals bijvoorbeeld lijm) die het blok en de tafel bijeen houdt.

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
24/56



Figuur 7: Breukstabiliteitsanalyse (scenario met realistisch geachte koppeling tussen poriëndruk en spanning) voor een carbonaatreservoir in het Rossum-Weerselo veld. Er treedt geen verschuiving op. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een breuk vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt.

### 4.3 Effecten van veranderingen in de poriëndruk in het zandsteen-reservoir

Doordat de doorlatendheid van zandsteen veel hoger is dan dat van carbonaten zijn veel van de processen die hierboven worden beschreven niet van toepassing op de zandsteenreservoirs. In deze reservoirs zullen geen grote drukverschillen ontstaan tussen de scheuren en breuken enerzijds en het omliggende gesteente anderzijds. Bovendien is de koppeling tussen poriëndruk en spanning in zandsteen sterker dan in carbonaten. Er zijn daarom andere scenario's geanalyseerd voor de zandsteenreservoirs dan voor de carbonaatreservoirs hierboven.

Scenario 1 beschouwt het zandsteenreservoir als een ideaal poreus-elastisch medium, waarin spanningsveranderingen ten gevolge van poriëndrukverandering volledig omkeerbaar zijn. Deze aanname is voor zandsteen niet geheel realistisch en resulteert in een zeer stabiele eindsituatie voor de breuk.

Scenario 2 gaat uit van een deels permanente vervorming van het reservoir tijdens de drukverlaging ten gevolge van gaswinning. Dit scenario is vooral representatief voor injectie in zandsteenreservoirs (bijv. Santarelli et al., 1992). Onder deze aanname heeft de waterinjectie een destabiliserend effect op de breuken. Met de verwachte einddruk in het reservoir is dit effect echter niet sterk genoeg om de breuk te doen verschuiven waardoor een beving zou kunnen plaatsvinden.

Scenario 3 gaat uit van een drukverandering die uitsluitend in de scheuren en breuken plaatsvindt en niet in het reservoirgesteente. In dit scenario resulteert de waterinjectie tot de verwachte einddruk in verschuiving langs de breuk, d.w.z. er kan een beving optreden. Voor zandsteen is deze aanname niet realistisch door de grote doorlatendheid van het gesteente. Het laatste scenario is doorgerekend vanwege de aanwezigheid van slecht doorlatende kleilagen binnen het zandsteenreservoir. Als injectie plaatsvindt vlakbij of in een breuk met een

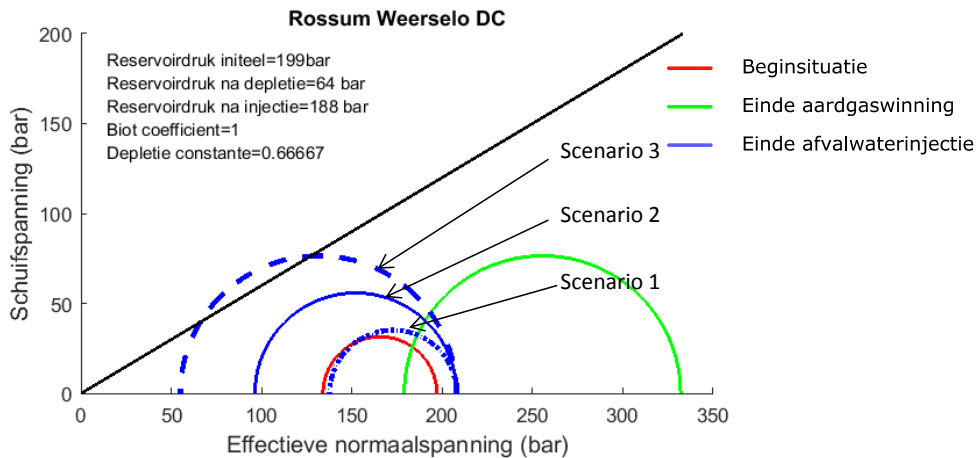


**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
25/56

hoge doorlatendheid binnen de kleilaag, zal de drukverandering in de breuk groter zijn dan in de kleilaag. Dit zou dan lokaal tot een spanningsverandering volgens Scenario 3 kunnen leiden. Vanwege de goede “smeerbaarheid” van klei zijn breuken door kleilagen vaak niet goed doorlatend. Daarom wordt dit scenario minder representatief geacht.



Figuur 8: Breukstabiliteitsanalyse voor een zandsteenreservoir in het Rossum-Weerselo veld. Er treedt geen verschuiving op in Scenario 2. Dit is het waarschijnlijk geachte scenario. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een breuk vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt.

Tabel 2: Samenvattende tabel met geanalyseerde scenario's voor drukverandering en de effecten op de breuk (stabiliteit of verschuiving op de breuk). In deze analyse is het niet mogelijk onderscheid te maken tussen seismisch verschuivende breuken (verschuivingen die aardbevingen veroorzaken) en aseismisch verschuivende breuken (verschuivingen die geen aardbevingen veroorzaken).

Reservoir	Scenario	Effect
Tubbergen carbonaatreservoir	Sterke koppeling druk-spanning (onrealistisch)	Verschuift
	Zwakke koppeling druk-spanning (realistisch)	Stabiel
Tubbergen-Mander carbonaatreservoir	Sterke koppeling druk-spanning (onrealistisch)	Stabiel
	Zwakke koppeling druk-spanning (realistisch)	Stabiel
Rossum-Weerselo carbonaatreservoir	Sterke koppeling druk-spanning (onrealistisch)	Stabiel
	Zwakke koppeling druk-spanning (realistisch)	Stabiel
Rossum-Weerselo zandsteenreservoir	1. Ideaal poreus-elastisch (onrealistisch)	Stabiel
	2. Deels plastische vervorming (realistisch)	Stabiel
	3. Enkel drukverandering in breuken (onrealistisch)	Verschuift

#### 4.4 Effecten van veranderingen in de temperatuur

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
26/56

Door injectie van water dat kouder is dan het reservoirgesteente zal het gesteente rondom de injectieputten afkoelen. Een afname van de temperatuur door injectie van koud water kan leiden tot spanningen in het reservoir, veroorzaakt door de thermische contractie van het reservoir gesteente. Dit kan op zijn beurt leiden tot spanningsveranderingen op de breuken. Omdat een aantal injectieputten relatief dicht bij gekarteerde breuken liggen, kan deze spanningsverandering effect hebben op de breukstabiliteit. Daarom zijn temperatuursverandering meegenomen in de breukstabiliteitsanalyse

Op basis van **indicatieve** berekeningen van TNO (zie Appendix III) kan afgeleid worden dat het afgekoelde gebied tot enkele honderden meters rondom de injectieput kan reiken. Dit is gebaseerd op onmiddellijke injectie van de maximale volumes (volumes uit: Royal HaskoningDHV, 2016b) per put, en geeft daarom een sterke overschatting van zowel het bereik als de grootte van de temperatuurverandering. Om het temperatuur profiel na 20 jaar injectie te berekenen zijn uitgebreide reservoir model berekeningen nodig – waarin onder andere informatie is verwerkt over de geometrie van het veld, ruimtelijk variatie in de doorlatendheid van het gesteente en (variatie in) het scheuren en breuken netwerk. De door TNO uitgevoerde analyse van een vereenvoudigde situatie (voor een homogeen, horizontaal oneindig uitgestrekt veld, uniforme temperatuurverandering) laat zien dat afkoeling leidt tot een afname van horizontale spanning<sup>13</sup> van ~3 bar per 1 °C. In een aantal gevallen liggen de injectieputten relatief dicht bij gekarteerde breuken (TUB-10: 150m, TUM-1: 100m, TUM-3: 200m, ROW-2: <100m, ROW4: 230m, ROW5: 50m); hier kan de temperatuurdaling en de gerelateerde thermische contractie van het gesteente rondom de injectieput lokaal de stabiliteit van de breuk doen afnemen. De waterinjectie zal in werkelijkheid gespreid door de tijd plaatsvinden en ook de afkoeling van het gesteente zal geleidelijk verlopen. Hierdoor zal eventuele destabilisatie en verschuiving van de breuk op slechts een klein deel van het breukvlak plaatsvinden, met mogelijk een kleine beving als gevolg. Dit onderstreept het belang van monitoren van kleine aardbevingen.

---

<sup>13</sup> Spanningen in de ondergrond zijn in het algemeen samendrukkend. Met afname wordt hier bedoeld: minder samendrukkend

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

27/56

## 5 Hydrofractie

Tijdens injectie van vloeistof in een reservoir wordt de poriëndruk rond de put verhoogd. Als de injectiedruk hoog genoeg is, kan deze groter worden dan de lokale samendrukkende spanning (plus de treksterkte van het gesteente), met als gevolg dat zich een scheur kan openen. In dit hoofdstuk worden enkele **indicatieve** berekeningen uitgevoerd om te evalueren of de injectie in de Twentevelden kan leiden tot het ontstaan van zulke hydraulische scheuren ('hydraulic fractures') in het reservoir of in de afsluitende laag. Het is van belang op te merken dat het vormen van hydraulische scheuren tijdens de waterinjectie in Twente geen doel op zich is, zoals het geval is bij hydrofractie voor schaliegaswinning. In deze analyse wordt gekeken naar de potentie voor scheurvorming als bijverschijnsel van de waterinjectie.

### 5.1 Aannames

Deze berekeningen worden gedaan onder de volgende aannames:

- Het gesteente beschikt niet over treksterkte en scheurt zodra de poriëndruk gelijk is aan de kleinste samendrukkende spanning. In de praktijk hebben de meeste gesteentes enige sterkte onder trekspanning, als is deze niet erg groot.
- De temperatuurverandering door de injectie van relatief koud water draagt bij aan de afname van de samendrukkende spanning (Figuur 9) en wordt overall binnen de invloed-radius (zie Appendix III) in gelijke mate gevoeld. In werkelijk zal een temperatuurgradiënt ontstaan, waardoor de afname van de samendrukkende spanning in werkelijkheid minder groot zal zijn dan hier wordt aangenomen<sup>14</sup>.

Deze aannames leiden tot het ontstaan van scheuren ('fracking') bij lagere injectiedrukken. Voor de volledigheid wordt ook aangegeven wanneer al bestaande (en ongunstig georiënteerde<sup>15</sup>) scheuren kunnen verschuiven.

### 5.2 Resultaten

De berekeningen zijn uitgevoerd voor elke put waar injectie gepland is. Voor elke put is lokale spanningstoestand gebruikt, en de lokale poriëndrukverandering (NAM, 2015a) (zie ook Tabel 7 en Tabel 8 in Appendix II). In de analyse is afkoeling voor elke put 20 °C, gebaseerd op de temperatuur-diepte relatie in de aardkorst en de temperatuur van het injectiewater. Verdere details over de berekeningen staan in Appendix V. Hierin staat de spanningsverandering ten

<sup>14</sup> Om te bepalen deze temperatuurgradiënt er uitziet zijn uitgebreide reservoir model berekeningen nodig – waarin onder andere informatie is verwerkt over de geometrie van het veld, ruimtelijk variatie in de doorlatendheid van het gesteente en (variatie in) het scheuren en breuken netwerk.

<sup>15</sup> De stabiliteit van een scheur hangt af van zijn oriëntatie in het spanningsveld. Hier wordt gekeken naar de meeste onstabiele scheur in het spanningsveld. Alle scheuren met een andere oriëntatie zijn nog stabiel en alleen de meest ongunstig georiënteerde scheur verschuift (uitgaand van scheuren met gelijke eigenschappen)

**Datum**

6 december 2016

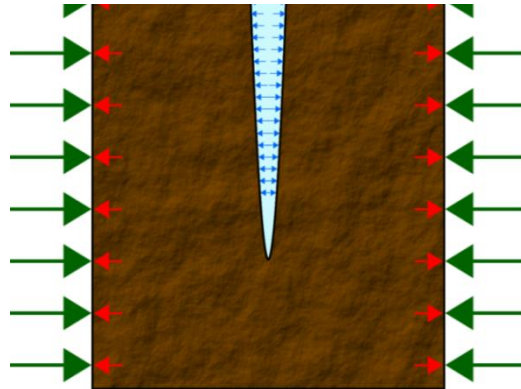
**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

28/56

gevolge van de afkoeling, de poriëndrukverandering, de verdere toename van poriëndruk die vereist is om te leiden tot verschuiving lang bestaande scheuren met een ongunstige (makkelijk te verschuiven) oriëntatie, en de verdere toename van poriëndruk die vereist is om te leiden tot hydrofractie. Uit de analyse blijkt dat de spanningsverandering ten gevolge van de veranderende poriëndruk alleen zal niet groot genoeg zijn om te leiden tot hydrofractie. In combinatie met de thermische spanning is hydrofractie wel mogelijk.



Figuur 9: Het openen van een "frac" gebeurt wanneer de vloeistofdruk (blauw) groter is dan de spanning die de frac dichtduwt. De spanning bestaat uit een geologische component (groen) en een thermische component (rood). Bij de injectie van koude vloeistof zorgt de thermische component voor een afname van de heersende spanning, waardoor fracs makkelijker ontstaan.

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
29/56

Tabel V-1 uit appendix V geeft de resultaten weer voor de verschillende scenario's.

Hieruit kan worden geconcludeerd:

- De door de injectie veroorzaakte thermische spanningsverandering (door afkoeling van het gesteente) is ongeveer 50 tot 65 bar.
- Hydrofractie vindt niet plaats bij afwezigheid van deze thermische effecten.
- De totale spanningsverandering (combinatie van druk en temperatuur) kan – onder de door de NAM gekozen condities - in vier putten leiden tot hydrofractie
- Lokaal kunnen dicht bij de put al bestaande, ongunstig georiënteerde scheuren verschuiven en/of langer worden.
- Er zijn geen aanwijzingen dat hydrofractie/verschuiving heeft plaatsgevonden tijdens de injectie tot nu toe. Mogelijke verklaringen zijn:
  - De hier gedane aannames m.b.t. sterkte, temperatuurveranderingen en spanningsverandering zijn conservatief: ze voorspellen eerdere hydrofractie/verschuiving dan wordt waargenomen.
  - Doordat slechts een deel van de totale injectie heeft plaatsgevonden zijn de huidige spanningsveranderingen te klein om hydrofractie/verschuiving te veroorzaken.
  - Hydrofractie/verschuiving hebben wel plaatsgevonden, maar zijn niet waargenomen.

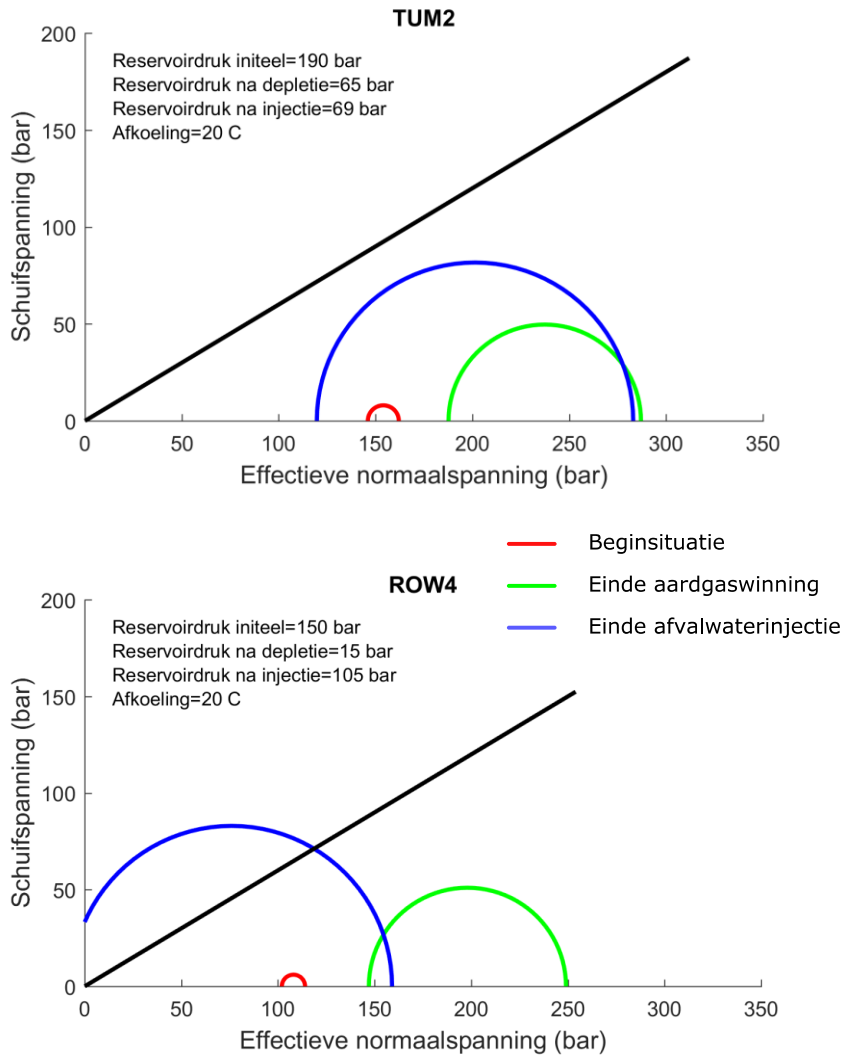
Hydrofractie kan tijdens de scheurvorming leiden tot (micro-) seismiciteit, met typische magnitudes van -1,0 of kleiner. Het veroorzaken van grotere aardbevingen tijdens hydrofractie gebeurt wanneer grote bestaande breuken verschuiven als gevolg van de vloeistofinjectie. Veranderingen in breukstabiliteit ten gevolge van waterinjectie in Twente is behandeld in Hoofdstuk 4.

De hoogte van “fracs” (hydraulische scheuren) blijft over het algemeen beperkt tot de gesteentelaag waarin ze zich vormen. Dit komt door verschillen in de spanningstoestand tussen de verschillende gesteentelagen. In het geval van de carbonaatreservoirs in Twente is de spanningstoestand in het zout sterk verschillend van die in de gedepleteerde reservoirs. Het sterk plastische (kruip) gedrag van steenzout op de diepte van de reservoirs zorgt ervoor dat scheuren zich überhaupt niet vormen of vrijwel onmiddellijk weer sluiten. De spanningstoestand en het materiaalgedrag van zout zorgen ervoor dat eventuele “fracs” ten gevolge van de waterinjectie zich tot de carbonaatlagen zullen beperken.

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
30/56



Figuur 10: Fracking analyse voor 2 putten (TUM2 en ROW4, beide injecterend in carbonaatlagen). Onder de in de tekst genoemde aannames leidt injectie in TUM2 niet tot verschuiving langs bestaande scheuren of fracking. Injectie in ROW4 leidt tot zowel verschuiving langs bestaande scheuren als fracking. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een breuk vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt.

## 6 Bevindingen

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

31/56

In drie gedepleteerde gasvelden in Twente (te weten: Tubbergen, Rossum-Weerselo en Tubbergen-Mander) wordt sinds 2011 water geïnjecteerd. Dit water is afkomstig van oliewinning in het Schoonebeekveld (Drenthe). In deze notitie is gekeken naar de effecten die deze waterinjectie teweegbrengt met betrekking tot:

1. cavernevorming en bodemdaling
2. breukstabiliteit
3. hydrofractie

Hiervoor is gebruik gemaakt van beschikbare informatie over de velden en de lokale geologische situatie. Hieronder vallen de rapporten van de NAM, externe experts, openbare databanken (nlog.nl en dinoloket.nl), peer-reviewed wetenschappelijke literatuur, en kennis van deskundigen. Er zijn indicatieve berekeningen en analyses uitgevoerd ter ondersteuning van dit rapport. De technische details hiervan kunnen gevonden worden in de appendices van dit rapport. Met betrekking tot de hierboven genoemde punten zijn de volgende bevindingen gedaan:

**Cavernevorming en bodemdaling:**

- Het is zeer onwaarschijnlijk, dat een caverne van significant grootte zal worden gevormd door het oplossen van zout ten gevolge van waterinjectie in de Twentevelden;
- In het onwaarschijnlijke geval, dat een grote hoeveelheid zout wordt opgelost, blijven de effecten aan het maaiveld beperkt tot geleidelijke bodemdaling in de orde van 10 cm (gebaseerd op het Rossum-Weerselo veld). Bij de andere velden zal dit kleiner zijn, vanwege de lagere volumes van geïnjecteerd water.

**Breukstabiliteit:**

- Injectie van water en de daarmee gepaard gaande veranderingen in de poriëndruk en afkoeling van het reservoir leidt tot spanningsveranderingen op de breuken in de drie reservoirs;
- De initiële spanningscondities in het reservoir zijn gunstig. Er zijn relatief grote spanningsveranderingen nodig voor breukreactivatie;
- Afkoeling rondom de injectieputten door injectie van koud water heeft een negatief effect op de breukstabiliteit. In combinatie met poriëndrukverandering kan dit mogelijk lokaal leiden tot een spanningsverandering, die groot genoeg is voor lokale breukreactivatie.

**Hydrofractie:**

- De totale spanningsverandering (combinatie van druk en temperatuur) kan – onder de door de NAM gekozen condities - in vier putten leiden tot hydrofractie;
- Lokaal kunnen dichtbij de put reeds bestaande, ongunstig georiënteerde scheuren verschuiven of langer worden. Hydrofractie kan tijdens de

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

32/56

scheurvorming leiden tot (micro-) seismiciteit met typische magnitudes van - 1,0 en kleiner;

- Zowel de spanningstoestand als het materiaalgedrag van zout zorgt ervoor, dat eventuele “fracs” zich tot de carbonaatlagen zullen beperken. Er zijn geen verwachte gevolgen aan of nabij het maaiveld.

De conclusies zijn in lijn met bevindingen van eerdere studies m.b.t. de waterinjectie in Twente (NAM, 2014b; NAM, 2014c; NAM, 2015a) en eerdere reviews (Ellsworth, 2015; Mines ParisTech 2015; TU Clausthal, 2016).

Deze conclusies zijn gebaseerd op indicatieve berekeningen. De uitkomsten dienen als verificatie van eerdere, uitgebreidere, analyses en zijn daarom minder complex qua opzet. De analyse kan verder worden uitgebreid met berekeningen waarin onder andere de volgende factoren kunnen worden meegenomen: de invloed van reservoirgeometrie, breukverzet, ruimtelijke variatie in reservoir drukken en temperatuur, differentiële compactie (zie begrippenlijst) en tijdsafhankelijk gedrag van zout.

**Monitoring:**

Het eventueel optreden van geïnduceerde aardbevingen ten gevolge van waterinjectie in de drie gedepleteerde gasvelden in Twente is niet uit te sluiten op basis van de huidige analyse, maar TNO-AGE acht dit niet waarschijnlijk. Seismische monitoring van de waterinjectie, gericht op het waarnemen van kleine aardbevingen (magnitudes tussen de 0,5 en 1,0), waarbij geen schade optreedt, is zodoende van belang om de analyse te staven. Als tegen de verwachting in toch dergelijke bevingen zouden worden geregistreerd, moeten aanvullende maatregelen (waaronder additioneel onderzoek) worden genomen.

De NAM heeft deze aanbeveling inmiddels opgevolgd door een netwerk van 7 extra geofoons te installeren in Twente. Dit maakt het, volgens de NAM, mogelijk om alle aardbevingen met magnitudes van 0,5 en groter in de regio te waar te nemen (NAM, 2016b).

In de context van het voorliggende project (waterinjectie afkomstig uit het Schoonebeekveld in de drie gedepleteerde gasvelden in Twente) geeft de huidige verificatie - in combinatie met uitvoering van het voorliggende monitoringsplan door de vergunninghouder - op dit moment geen aanleiding tot nadere studie.



**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
33/56

## Referenties

Ellsworth, W.L. (2015). Review of "Threat Assessment for induced seismicity in the Twente water disposal fields". Via: <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/publicaties/2016/06/23/6-dr-ellsworth---review-of-twente-threat-assessment/6-dr-ellsworth-review-of-twente-threat-assessment.pdf>

Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A. (2014). Applied Geothermics. Springer Berlin, 751p, ISBN 978-3-642-34022-2

Fokker, P.A., Orlic, B. (2006). Semi-analytic modelling of subsidence. *Mathematical Geology* **38**(5), pp. 565-589

KNMI Aardbevingscatalogus (2016). <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus>, bezocht: 19-10-2016

Kombrink, H. (2008). The Carboniferous of the Netherlands and surrounding areas; a basin analysis. *Geologica Ultraiectina* (294). Departement Aardwetenschappen.

Mines ParisTech (2015). Review of Twente Salt Dissolution Studies - Contribution to the evaluation of massive re-injection of fresh water in depleted Twente gas fields; the Netherlands, R151211DBRU

NAM (2007), Informatiekrant waterinjectie juni 2007. Via <http://www.nam.nl/techniek-en-innovatie/waterinjectie-in-twente/downloads-waterinjectie-twente.html>, bezocht: 19-10-2016

NAM (2009), Informatiekrant waterinjectie maart 2009 Via <http://www.nam.nl/techniek-en-innovatie/waterinjectie-in-twente/downloads-waterinjectie-twente.html>, bezocht: 19-10-2016

NAM (2014a), Geology description of Twente Gas Fields: Tubbergen, Tubbergen-Mander and Rossum-Weerselo, report no.: EP201310201845

NAM (2014b), Subsidence caused by Halite dissolution due to water injection into depleted Carbonate gas reservoirs encased in Halite, report no.: EP201310204177

NAM (2014c), Halite dissolution modelling of water injection into Carbonate gas reservoirs with a Halite seal, report no.: EP201310203080

NAM (2015a), Threat assessment for induced seismicity in the Twente water disposal fields, report no.: EP201502207168

NAM (2015b), Addendum Waterinjectie Management Plan, kenmerk EP201502216336

NAM (2016a), Samenvatting jaarrapportage 2015 monitoring injectiewater Twente, kenmerk EP201603238283

NAM (2016b). Artikel "NAM plaatst extra Geofoons in Twente". <http://www.nam.nl/nieuws/2016/nam-plaatst-extra-geofoons-in-twente.html>, bezocht 16-11-2016

NLOG, [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl), bezocht: 17-10-2016

Peng, S., Chiang, H.S. (1984) Longwall mining. Wiley New York, 708p, ISBN 0471868817

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

34/56

Royal HaskoningDHV (2016a), Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek: Zorgpuntennotitie. Referentie: I&BBD9591-100-100R001D01

Royal HaskoningDHV (2016b), Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek: Tussenrapport alternatievenafweging. Referentie: I&BBD9591-100-100R001F02

Santarelli F.J., Tronvoll, J.T., Henriksen, R., Bratli, R.K. (1998). Reservoir Stress Path: The Depletion and the Rebound. *SPE/ISRM 47350*

TNO-AGE (Adviesgroep Economische Zaken) (2016), Waterinjectie Twente – Anhydrietlagen waterinjectie Twente. AGE 16-10.077

TU Clausthal (2016). Review of the 3 NAM Reports 1.Geology description of Twente Gas Fields: Tubbergen, Tubbergen-Mander and Rossum-Weerselo (EP201310201845), 2.Halite dissolution modelling of water injection into Carbonate gas reservoirs with a Halite seal (EP201310203080), 3.Subsidence caused by halite dissolution due to Water injection into depleted Carbonate gas reservoirs incased Halite (EP201310204177), 8 april 2016

Van Eijs, R.M.H.E., Mulders F.M.M., Nepveu M., Kenter C.J.,Scheffers, B.C., (2006) Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands. *Eng. Geol.* 84, 99–111.

Van Heekeren, H., Bakker, T., Duquesnoy, T., De Ruyter, V., Mulder, L. (2009) Abandonment of an Extremely Deep Cavern at Frisia Salt. *SMRI Spring 2009 Technical Conference, 27-28 April 2009, Krakow, Poland.*

Van Thienen-Visser, K, Nepveu, M, Hettelaar, J., (2012) Deterministische hazard analyse voor geïnduceerde seismiciteit in Nederland. TNO-rapport 2012 R10198

Worthington, P.F., Longeron, D. (1991). *Advances in Core Evaluation II* (v. 2). Routledge, 508 p, ISBN 2881248268

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
35/56

## Begrippenlijst

**Anhydriet:** Calciumsulfaat ( $\text{CaSO}_4$ ), een type zout dat slecht oplosbaar is in water. De gehydrateerde vorm van anhydriet (gips,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) is ook slecht oplosbaar in water.

**Carbonaat:** Hieronder vallen verschillende gesteenten waaronder calciumcarbonaat kalksteen ( $\text{CaCO}_3$ ) en dolomiet ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

**Deterministische hazard studie:** Hierin wordt gekeken naar de grondbewegingen op de locatie waarin men geïnteresseerd is, ten gevolge van verschillende aardbeving-scenario's. Deze scenario's zijn deterministisch van aard. Dat wil zeggen dat een aardbevings-scenario bestaat uit een aardbeving met een vastgelegde diepte, locatie en magnitude.

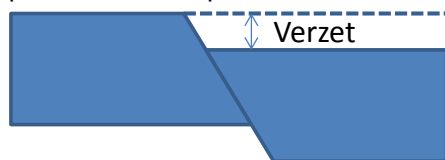
**(Differentiële) compactie:** Het afnemen van het gesteentevolume (vaak als gevolg van poriëndrukverlaging). Wanneer dit in verschillende mate plaatsvindt aan weerszijde van een breuk kan dit leiden tot een spanningsverandering die destabiliserend werkt op de breuk

**Doorlatendheid:** (ook wel 'permeabiliteit') de mate waarin vloeistoffen en gassen door het gesteente kunnen stromen. Hoe hoger de doorlatendheid, hoe gemakkelijker de stroming door het gesteente kan plaatsvinden. Als de doorlatendheid laag is, is er meer drukverschil nodig om hetzelfde transport te bewerkstelligen.

**Kruip:** Kruip beschrijft de blijvende vervorming van materialen die onder differentiële spanning (verschillende spannings-magnitude in verschillende richtingen) staan. In de diepe ondergrond gedraagt steenzout (haliet) zich als een soort stopverf.

**Poriëndruk:** Veel gesteentetypes (zoals ook zandsteen en carbonaten) bevatten poriën. Deze poriën zijn lege ruimte in het gesteente die gevuld kunnen zijn met gassen of vloeistoffen zoals olie, water, lucht of aardgas. De vloeistofdruk of gasdruk van het medium in de poriën wordt de poriëndruk genoemd.

**Verzet:** De verticale afstand tussen twee oorspronkelijk op dezelfde liggende punten, die ten opzichte van elkaar zijn verplaatst door een breuk. (Engels: offset)



**Spanning:** Kracht per oppervlak. In de ondergrond kan de spanningssituatie beschreven worden door drie spannings-magnitudes (de hoeveelheid kracht per oppervlak) en de bijbehorende (onderling loodrechte) spanningsrichtingen. Component 1 werkt in de verticale richting (het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen) en de andere twee componenten werken in de horizontale richtingen.

**Viscositeit:** "Stroperigheid". De mate waarin een vloeistof of gas stroming weerstaat. Vloeistoffen met een lage viscositeit (zoals gas) stromen gemakkelijker

door een gesteente met een bepaalde doorlatendheid dan een vloeistof met een hogere viscositeit (zoals water) door hetzelfde gesteente.

Zout: In de context van deze notitie wordt hiermee haliet (steenzout, NaCl) bedoeld.

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

36/56

**Ondertekening**

Utrecht, 06 december 2016



Dr. I. C. Kroon  
Afdelingshoofd

TNO

TNO-AGE  
Auteur

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

37/56

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
38/56

## Appendix I: Rapporten en notities

### CE:

- Document 1: Met water de diepte in, Publicatienummer 04.6619.34, oktober 2004
- Document 2: Waterstromen van oliewinning, 17 maart 2006

### Commissie voor de MER:

- Document 1: Injectie productiewater Olieveld Schoonebeek, projectnr: 3093, 7 maart 2016

### Deltares:

- Document 1: Toetsing Tussenrapport Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek, 1221062-002, augustus 2016

### Mines ParisTech:

- Document 1: Review of Twente Salt Dissolution Studies - Contribution to the evaluation of massive re-injection of fresh water in depleted Twente gas fields; the Netherlands, R151211DBRU

### Minister van Economische Zaken:

- Document 1: Markering en benaming met betrekking tot waterinjectie in Twente, kenmerk DGETM-EO / 16064352, 29 april 2016

### Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM)

- Document 1: Hoofdrapport Milieu Effecten Rapportage, 31 maart 2006
- Document 2: Geology description of Twente Gas Fields: Tubbergen, Tubbergen-Mander and Rossum-Weerselo, EP201310201845
- Document 3: Halite dissolution modelling of water injection into Carbonate gas reservoirs with Halite seal, EP201310203080
- Document 4: Subsidence caused by Halite dissolution due to water injection into depleted Carbonate gas reservoirs encased in Halite, EP201310204177
- Document 5: Technical evaluation of Twente water injection wells ROW3, ROW4, ROW7, ROW9, TUB7, and TUB10 3 years after start of injection, EP201410210164
- Document 6: Factsheet: Hoe zit het precies met de waterinjectie in Twente, 2015
- Document 7: Factsheet: Waterinjectie Twente factsheet nr.2, 2015
- Document 8: Samenvatting jaarrapportage 2014 monitoring kwaliteit injectiewater Twente, EP201504203634
- Document 9: Threat assessment for induced seismicity in the Twente water disposal fields, EP201502207168
- Document 10: Addendum Waterinjectie Management Plan, EP201502216336
- Document 11: Response to questions Prof. Hou, Received Tuesday February 2, 2016 via Ir. Hans Roest from SodM
- Document 12: Response to questions Dr. Bruel, Received Tuesday February 25, 2016 via Ir. Hans Roest from SodM

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

39/56

- Document 13: Nieuwsbericht: Tussenrapport onderzoek alternatieven water injectie Twente afgerond, 28 juni 2016
- Document 14: Samenvatting jaarrapportage 2015 monitoring injectiewater Twente, EP201603238283
- Document 15: NAM toelichting – Tussenrapport “Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek” inclusief zorgpuntennotitie, EP201606209286
- Document 16: Zechstein lithology and map sections, 7 pagina's

## Nederlandse Geologische Vereniging:

- Document 1: Grondboor en Hamer: Zoutspecial, nr 4/5 2010 jaargang 64

## Provincie Drenthe, Provincie Overijssel, Ministerie van Economische Zaken:

- Document 1: Nota van beantwoording MER Herontwikkeling olieveld Schoonebeek, januari 2008

## Raad van State:

- Document 1: Uitspraak 201004639/1/M1, 201004671/1/M1 en 201006944/1/M1, ECLI:NL:RVS:2011:BR3245, 27 juli 2011

## Royal HaskoningDHV:

- Document 1: Notitie Afweging Long List naar Short List, 18 maart 2016
- Document 2: Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek – Tussenrapport alternatievenafweging, Referentie: I&BBD9591-100-100R001F02
- Document 3: Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek – Zorgpuntennotitie, Referentie: I&BBD9591-100-100R001D01

## Staatstoezicht op de Mijnen

- Document 1: Evaluatie SodM – Reviews NAM rapporten m.b.t. 'Risico's zoutoplossing' en 'Seismic threat analysis', juni 2016

## Stichting Stop Afvalwater Twente (SAT)

- Document 1: Ingezonden brief “Waterinjectie>>>zoutoplossen>>> extreme gevolgen”, maart 2016
- Document 2: Handout “Het toverwoord anhydriet!?”, Uitgereikt door de SAT op 17 augustus 2016 tijdens gesprek met minister Kamp
- Document 3: Overzicht met foutieve, onjuiste en misleidende beweringen, Versie 3, 30 augustus 2016
- Document 4: Watervulling verloop bij ROW2, Henk Steggink (SAT Technische Commissie), augustus 2016
- Document 5: Een diepe ondermijning (holte) zakt eerder in (sinkhole) dan een ondiepe ondermijning, Henk Steggink (SAT Technische Commissie), augustus 2016
- Document 6: Bevindingen en op- en aanmerkingen op het document “Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek – Tussenrapport alternatievenafweging” van RoyalHaskoningDHV, SAT Technische Commissie, 19 september 2016

- Document 7: Alternatief productiewater, ingebracht door de Stichting StopAfvalwaterTwente

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

40/56

## TNO Adviesgroep Economische Zaken:

- Document 1: Waterinjectie Twente – Anhydrietlagen waterinjectie Twente, AGE 16-10.077, 9 september 2016

## TU Clausthal:

- Document 1: Review of the 3 NAM Reports 1.Geology description of Twente Gas Fields: Tubbergen, Tubbergen-Mander and Rossum-Weerselo (EP201310201845), 2.Halite dissolution modelling of water injection into Carbonate gas reservoirs with a Halite seal (EP201310203080), 3.Subsidence caused by halite dissolution due to Water injection into depleted Carbonate gas reservoirs incased Halite (EP201310204177), 8 april 2016

## TU Delft:

- Document 1: Contraexpertise verslag Afvalwaterinjectie in Noordoost-Twente, 17 februari 2016

## United States Geological Survey, Prof. William L. Ellsworth

- Document 1: Review of "Threat Assessment for induced seismicity in the Twente water disposal fields", 2 oktober 2015



**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
41/56

## Appendix II: Veld-specifieke informatie

Tabel 3: Het Tubbergen veld

	Informatie	Bron
<b>Structuur</b>	Koepel	NAM 2014a
<b>Dikte</b>	ZeZ2C reservoir circa 40 m ZeZ3C reservoir circa 50 m <sup>16</sup>	NAM 2014a
<b>Putten/volume</b>	TUB7 en TUB 10 Gepland injectievolume: ca. 10 miljoen m <sup>3</sup> Tot nu geïnjecteerd: 1,82 miljoen m <sup>3</sup>	Royal HaskoningDHV, 2016b
<b>Maximale injectiesnelheid</b>	TUB7: 2250 m <sup>3</sup> /d TUB10: 2000 m <sup>3</sup> /d	NAM 2015a
<b>Breuken</b>	Meerdere breuken met verschillende oriëntaties (O-W, WNW-OZO, ZW-NO en NNW-ZZO) De injectieputten liggen ten oosten van een grotere breukstructuur, met een NNW-ZZO strekking (330°). Het maximale verzet <sup>17</sup> langs deze breuk is 80m (NAM 2014a). De breuk heeft een totale lengte van circa 2 km. Injectieput TUB-7 ligt op circa 700m afstand van de breuk (verzet ter plaatse 80 m), injectieput TUB-10 ligt op een afstand van 150 m (verzet ter plaatse 25 m).	NAM 2014a

<sup>16</sup> NAM (2014b) geeft een hogere gemiddelde waarde van 69 m.

<sup>17</sup> Het verzet geeft het diepteverschil aan tussen twee punten aan weerszijde van de breuk die initieel op dezelfde diepte lagen. Zie ook begrippenlijst

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
42/56

Tabel 4: Het Tubbergen-Mander veld

	Informatie	Bron
<b>Structuur</b>	Langgerekte koepel	NAM 2014a
<b>Dikte</b>	ZeZ2C reservoir circa 25 m ZeZ3C reservoir circa 45 m	NAM 2014a
<b>Putten/volume</b>	TUM-1, TUM-2 en TUM-3 Gepland injectievolume: 3,46 miljoen m <sup>3</sup> Tot nu geïnjecteerd: 0,23 miljoen m <sup>3</sup>	Royal HaskoningDHV, 2016b
<b>Maximale injectiesnelheid</b>	TUM1: 100 m <sup>3</sup> /d TUM2: 100 m <sup>3</sup> /d TUM3: 346 m <sup>3</sup> /d	NAM 2015a
<b>Breuken</b>	Meerdere kleinere breuken, vooral aan de westzijde van het gasveld (overwegend O-W en NW-ZO strekking) Het gasveld wordt aan de oostzijde begrensd door de Gronau breukzone (strekking NNW-ZZO). De putten TUM-1 en TUM-3 liggen op een afstand van ~100m, respectievelijk ~200m van een gekarteerde breuk. Het verzet van deze breuk is maximaal 20m.	NAM 2014a

Tabel 5: Het Rossum-Weerselo veld (carbonaatreservoir)

	Informatie	Bron
<b>Structuur</b>	Langgerekte koepel	NAM 2014a
<b>Dikte</b>	ZeZ2C reservoir circa 30 m ZeZ3C reservoir circa 40 m	NAM 2014a
<b>Putten/volume</b>	ROW-2, ROW-4, ROW-5, ROW-7 en ROW-9 Gepland injectievolume: ca. 28 miljoen m <sup>3</sup> Tot nu geïnjecteerd: 3,26 miljoen m <sup>3</sup>	Royal HaskoningDHV, 2016b
<b>Maximale injectiesnelheid</b>	ROW2: 2000 m <sup>3</sup> /d ROW4: 2500 m <sup>3</sup> /d ROW5: 2500 m <sup>3</sup> /d ROW7: 1800 m <sup>3</sup> /d ROW9: 1350 m <sup>3</sup> /d	NAM 2015a
<b>Breuken</b>	Meerdere breuken, met verschillende oriëntaties (O-W, NNW-ZZO en NNO-ZZW).  De injectieputten ROW-2, ROW-4, ROW-5 en ROW-7 liggen binnen een afstand van 500 m van een gekarteerde breuk. Het verzet van de breuken is klein, variërend van 5-40 m.	NAM 2014a

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
43/56

Tabel 6: Het Rossum-Weerselo veld (zandsteenreservoir)

	<b>Informatie</b>	<b>Bron</b>
<b>Structuur</b>	Langgerekte koepel	NAM 2014a
<b>Dikte</b>	Zandsteenreservoir circa 65 m	Schatting op basis van TNO data
<b>Putten/volume</b>	ROW-3 Gepland injectievolume: 1,40 miljoen m <sup>3</sup> Tot nu geïnjecteerd: 0,04 miljoen m <sup>3</sup>	Royal HaskoningDHV, 2016b
<b>Breuken</b>	Meerdere breuken, met verschillende oriëntaties (O-W, NNW-ZZO en NNO-ZZW).	NAM 2014a

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
44/56

Tabel 7: Putdrukken gebruikt voor berekeningen (NAM, 2015a). Voor de breukstabiliteit-analyse (Hoofdstuk 4) wordt gerekend met de gemiddelde velddrukken. Voor de hydrofractie-analyse (Hoofdstuk 5) wordt gekeken naar de druk per put.

Put	Originele druk bar	Huidige druk bar	Druk na injectie bar
TUM1	190	17	37
TUM2	190	65	69
TUM3	190	51	59
ROW2	150	8	17
ROW3	199	77	188
ROW4	150	15	105
ROW5	150	7	10
ROW7	150	12	79
ROW9	150	15	148
TUB7	211	7	113
TUB10	211	15	131

Tabel 8: Lokale beginsituatie spanningstoestand. Lokale spanningen zijn berekend met een verticale spanningstoename van 2.2 bar/10m en een horizontale spanningstoename van 2.1bar/10m (gebaseerd op NAM, 2015a). Dieptes de velden zijn genomen als gemiddelde velddiepte (NAM, 2014a).

Veld	Diepte [m]	Verticale spanning [bar]	Horizontale spanning [bar]
Tubbergen-Mander carbonaatreservoir	1600	352	336
Rossum-Weerselo carbonaatreservoir	1200	264	252
Rossum-Weerselo zandsteenreservoir	1800	396	378
Tubbergen carbonaatreservoir	1300	286	273

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
45/56

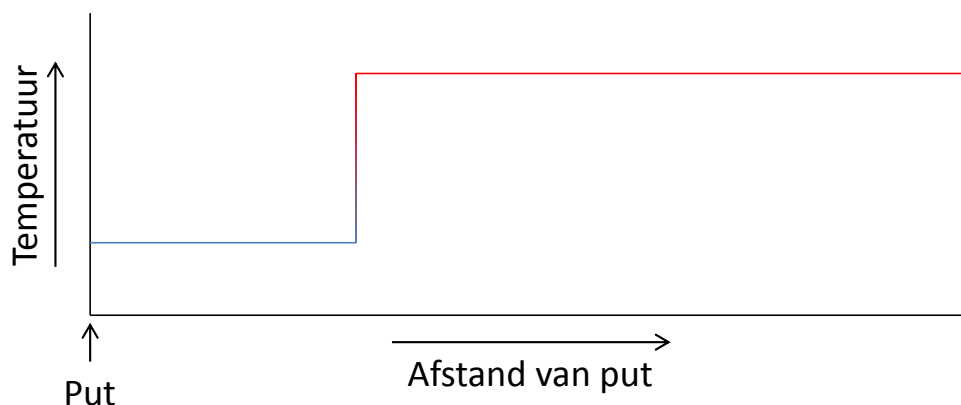
### Appendix III: Berekening van afkoeling rond putten

Gebaseerd op de gegevens in Appendix II wordt de radius van afkoeling rond de put uitgerekend per put. De totale injectievolumes per veld worden verdeeld evenredig met de maximale injectiesnelheid.

#### Berekeningen

De methodologie wordt hier gedemonstreerd voor de TUM7 put in het Tubbergen carbonaatreservoir. Dezelfde methodologie is gebruikt voor de putten in alle velden (zowel carbonaatreservoirs als zandsteenreservoirs). Hier worden alleen de resultaten voor gepresenteerd.

In deze berekening wordt ervanuit gegaan dat de injectie onmiddellijk en volledig plaatsvindt, waarna het water zich niet verder verplaatst en enkel het gesteente afkoelt (het water warmt hierbij op). Het resulterende temperatuurprofiel ziet er als volgt uit:



Figuur A1: Temperatuurprofiel na injectie van koud water volgens de hier gebruikte aannames

#### TUB7

- Geïnjecteerd volume:  $\frac{2250}{2000+2250} \times 10,16$  miljoen  $m^3 = 5,38$  miljoen  $m^3$
- Injectie temperatuur: 20 °C
- Gesteente temperatuur: 50 °C
- Porositeit: 3% matrix
- Netto percentage reservoirgesteente: 65% (geschatte waarde). De andere 35% is gesteente waarin geen injectie/productie plaats kan vinden (bijvoorbeeld tussenliggende kleilaagjes)
- Dikte reservoir: 90 m (40 m + 50 m)
- Soortelijke warmte water 4200 kJ/  $m^3/K$
- Soortelijke warmte gesteente 2200 kJ/  $m^3/K$  (Eppelbaum et al., 2014)

Het poriënvolume gevuld door het geïnjekteerde water is 5,38 miljoen  $m^3$ . Het daarbij horende gesteentevolume is  $5,38/0,03$  (porositeit) = 179 miljoen  $m^3$

De netto hoogte van dit volume is gegeven door 65% van 90m=58.5 m

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
46/56

Het bijbehorende oppervlak is  $170 \text{ miljoen} / 58.5 = 3,1 \text{ miljoen m}^2$ . Uitgaande van een cirkelvorming oppervlak geeft dit een radius van  $\sqrt{3,1E6 / \pi} \approx 988 \text{ m}$ .

Het geïnjecteerde water vult dus een cilindervormig volume met een radius van 988 m.

Het afgekoelde volume is kleiner. Om het water op te warmen is  $4200 \text{ kJ} / \text{m}^3 / \text{K} * (50-20) \text{ K} * 5.38 \text{ miljoen m}^3 = 678 \text{ miljard kJ}$  nodig. Deze energie wordt onttrokken aan een cilindervormig gesteentevolume dat zich rond de put bevindt.

Deze energie wordt onttrokken aan het volgende gesteentevolume:  $678 \text{ miljard m}^3 / (2200 * (50-20)) = 10,3 \text{ miljoen m}^3$ . Dit gesteentevolume is 90m hoog (ook het niet-reservoirgesteente koelt af).

Oppervlak:  $10,3 \text{ miljoen m}^3 / 90 \text{ m} = 0,114 \text{ miljoen m}^2$ , met een radius van  $\sqrt{1.14E5 / \pi} = 191 \text{ m}$ .

In andere woorden, het afgekoelde gesteente reikt tot bijna 200m van de put (onder de aanname van thermisch evenwicht en radiale, symmetrische, verticaal perfect verdeelde stroming).

Tabel 9: Afstand van afkoeling door injectie van water onder de hierboven beschreven aannames.

Veld	Put	Afstand van afkoeling
Tubbergen	TUB7	191 m
	TUB10	180 m
Rossum-Weerselo	ROW2	215 m
	ROW4	240 m
	ROW5	240 m
	ROW7	204 m
	ROW9	176 m
	ROW6	117 m
	TUM1	74 m
Tubbergen-Mander	TUM2	74 m
	TUM3	138 m

#### Gevoeligheden voor verandering van inputparameters:

Onder de aanname dat het hele gesteentevolume rond de put afkoelt, is de berekening ongevoelig voor veranderingen in porositeit. Gevoeligheid voor de soortelijke warmte van het gesteente is beperkt binnen fysisch realistische waarden (~10 m). Veruit de belangrijkste aanname, met de grootste invloed, is dat het hele gebied rond de put uniform afkoelt.

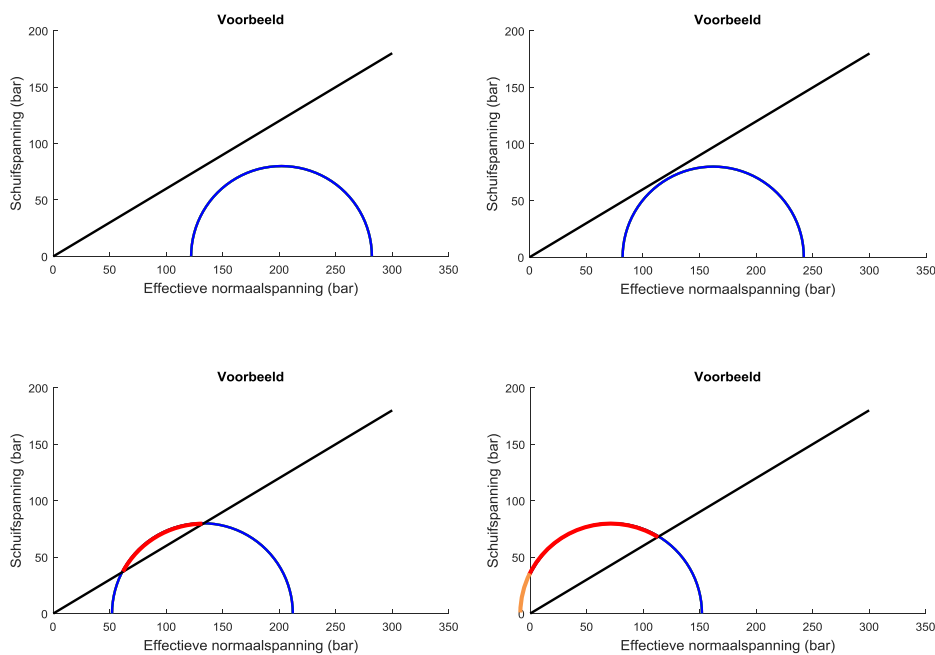
**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

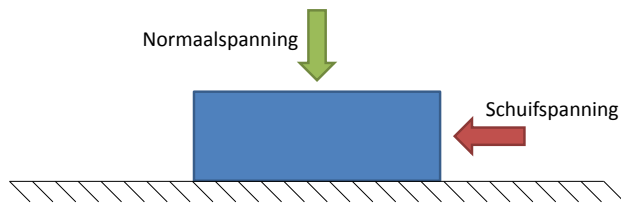
**Blad**  
47/56

## Appendix IV: Breukstabiliteit Mohr-Coulomb stabiliteitsanalyse

Voor de stabiliteitsberekeningen wordt gebruik gemaakt van zogenaamde Mohr-Coulomb diagrammen. Hierin wordt de spanningssituatie in een punt gevisualiseerd door een cirkel. De verschillende punten op de cirkel zijn representatief voor de verschillende oriëntaties die een vlak (een breuk of een scheur) door dat punt kan hebben. Op de verticale as staat de (destabiliserende) schuifspanning. Op de horizontale as staat de (stabiliserende) normaalspanning (zie Figuur A3). De diagonale lijn geeft de stabiliteit aan van een cohesieloos vlak met een frictiehoek (een stabiliteitsconstante) van 0,6. Deze waarde ligt aan de lage kant van het typische bereik voor gesteenten (0,6 tot 1,0). Dat wil zeggen dat we de analyse doen voor een relatief makkelijk te verschuiven breuk. Zodra een deel van de cirkel boven de diagonale lijn uitkomt, zullen breuken met bepaalde oriëntaties gaan verschuiven. Hieronder een voorbeeld.



Figuur A2: Mohr-Coulomb voorbeeld. Linksboven: stabiel. Rechtsboven: stabiel, bijna verschuiving. Linksonder: verschuiving op ongunstig georiënteerde vlakken (rood). Rechtsonder: verschuiving op ongunstig georiënteerde vlakken (rood), en fracking (Appendix V) vanwege negatieve spanning (trekspanning, oranje).



**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

**Blad**

48/56

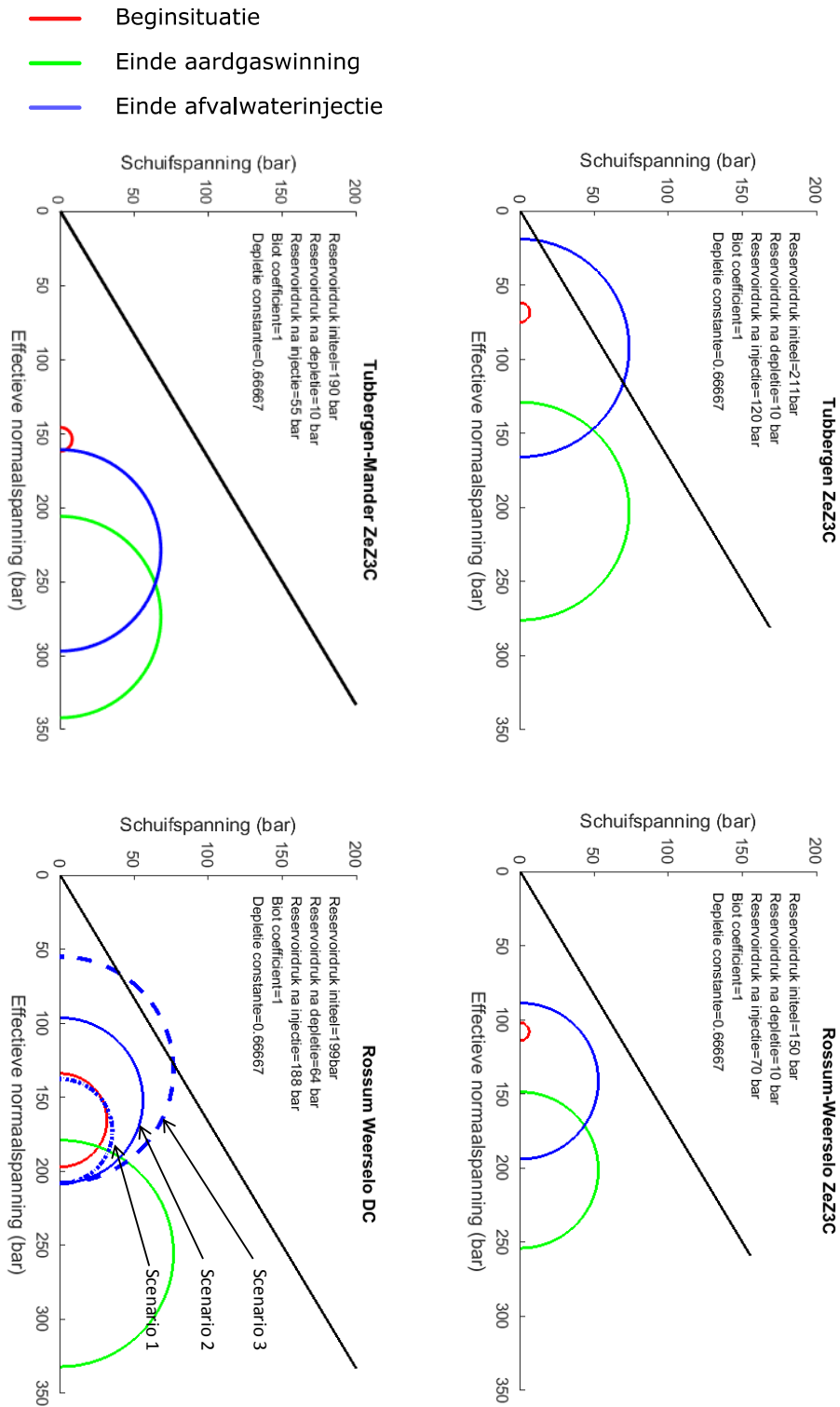
Figuur A3: Illustratie van de rol van schuifspanning en normaalspanning op een vlak



**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
3E 16-10.104

**ad**  
I/56



Figuur A4: Breukstabiliteit-analyse voor een sterke koppeling tussen poriëndruk en spanning (eerste scenario voor carbonaatreservoirs). In deze analyse verschuift de breuk in het Tubbergen carbonaatreservoir tijdens injectie (blauwe lijn Tubbergen) en in het Rossum-Weerselo zandsteenreservoir (gestippelde blauwe lijn, Rossum Weerselo DC). Deze situaties worden niet representatief geacht (zie tekst, Hoofdstuk 4). Voor het Carbon zandsteenreservoir (Rossum Weerselo DC) wordt scenario 2

representatief geacht. Voor de carbonaatreservoirs wordt Figuur A5 representatief geacht.

**Datum**

6 december 2016

**Onze referentie**

AGE 16-10.104

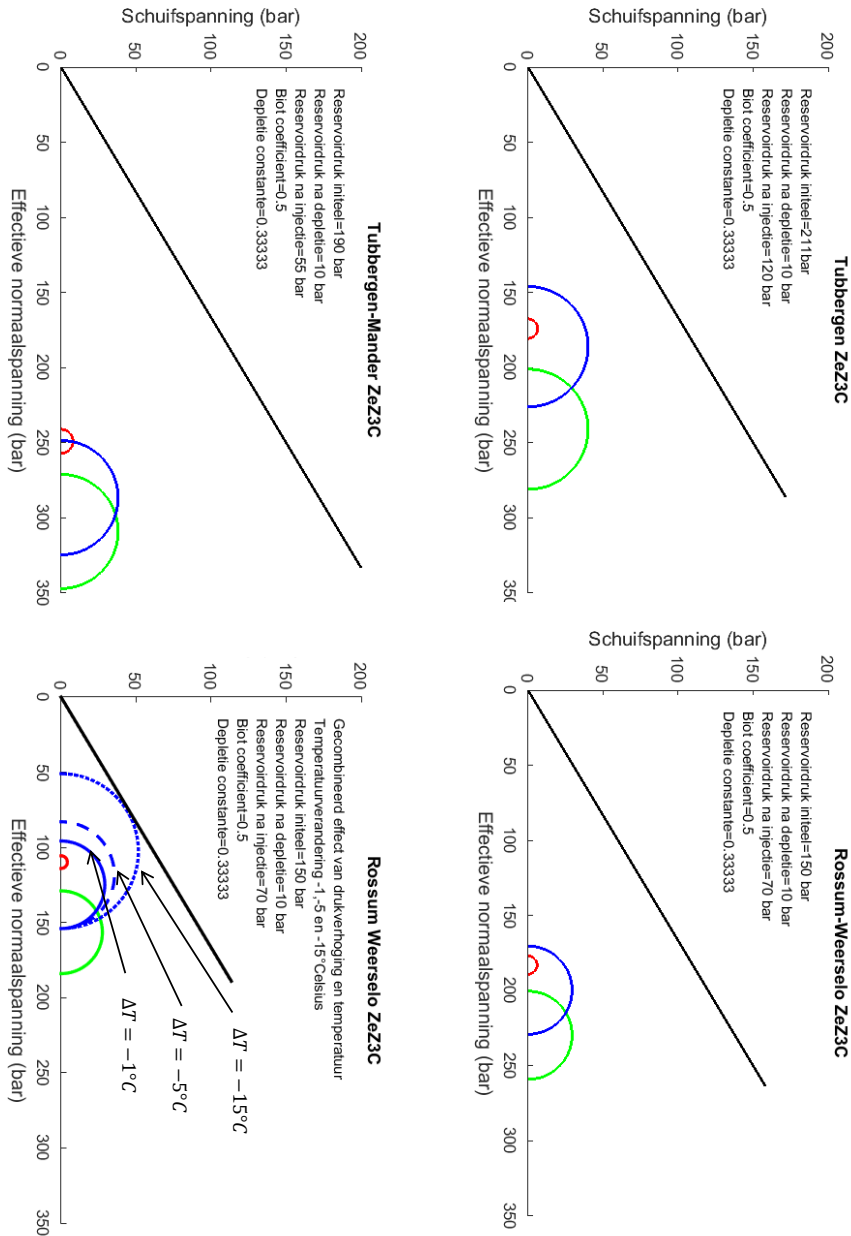
**Blad**

50/56

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
51/56



Figuur A5: Breukstabiliteit-analyse voor een zwakkere koppeling tussen poriëndruk en spanning (tweede scenario voor carbonaatreservoirs). Voor het Rossum-Weerselo carbonaatveld wordt bovendien getoond wat de invloed van afkoeling op de breukstabiliteit is. Stabiel in alle situaties, behalve bij een afkoeling op de breuk van meer dan 15 °C in de carbonaatreservoirs van Rossum-Weerselo. Tubbergen en Tubbergen-Mander hebben meer dan 15 °C afkoeling nodig, vanwege de lokale spannings situatie na injectie.

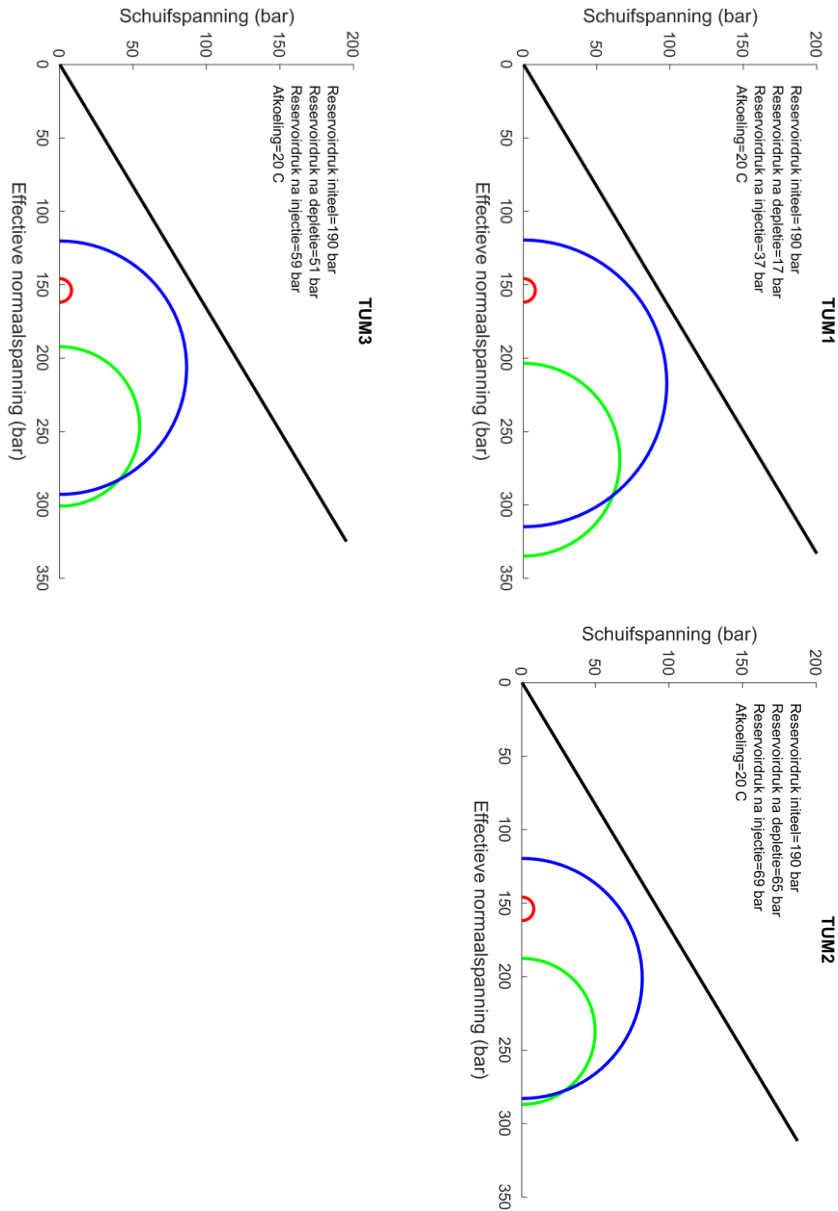
- Beginsituatie
- Einde aardgaswinning
- Einde afvalwaterinjectie

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
52/56

## Appendix V: Hydrofractie



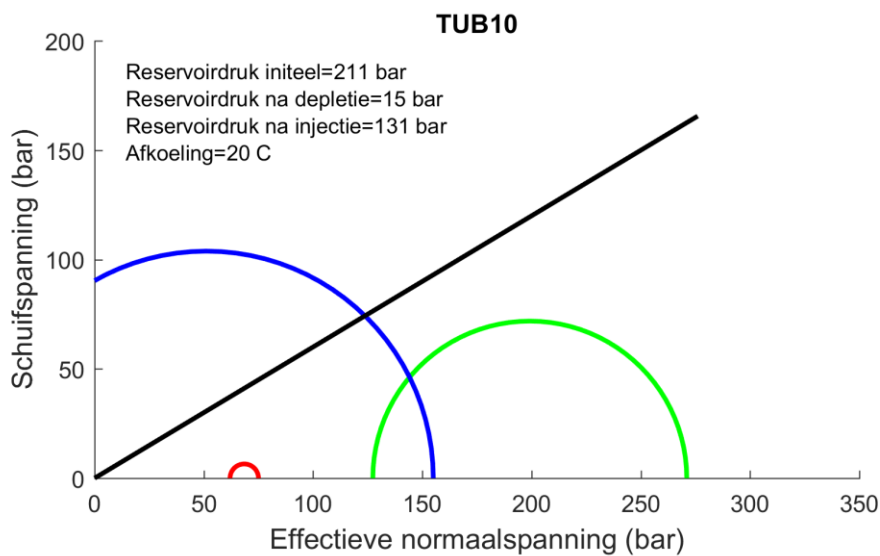
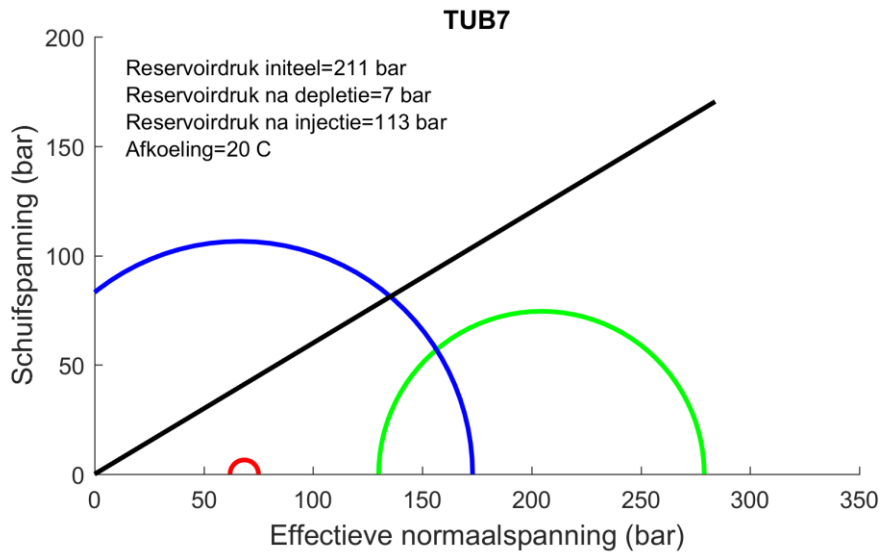
Figuur A6: Spannings- en frackinganalyse per put, gebaseerd op voorspelde putdrukken (NAM, 2015a) en afkoeling van 20 °C. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een scheur vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt. Fracking vindt plaats wanneer een cirkel de verticale as raakt. Hier voor alle putten: Geen verschuiving en geen fracking.

- Beginsituatie
- Einde aardgaswinning
- Einde afvalwaterinjectie

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
53/56



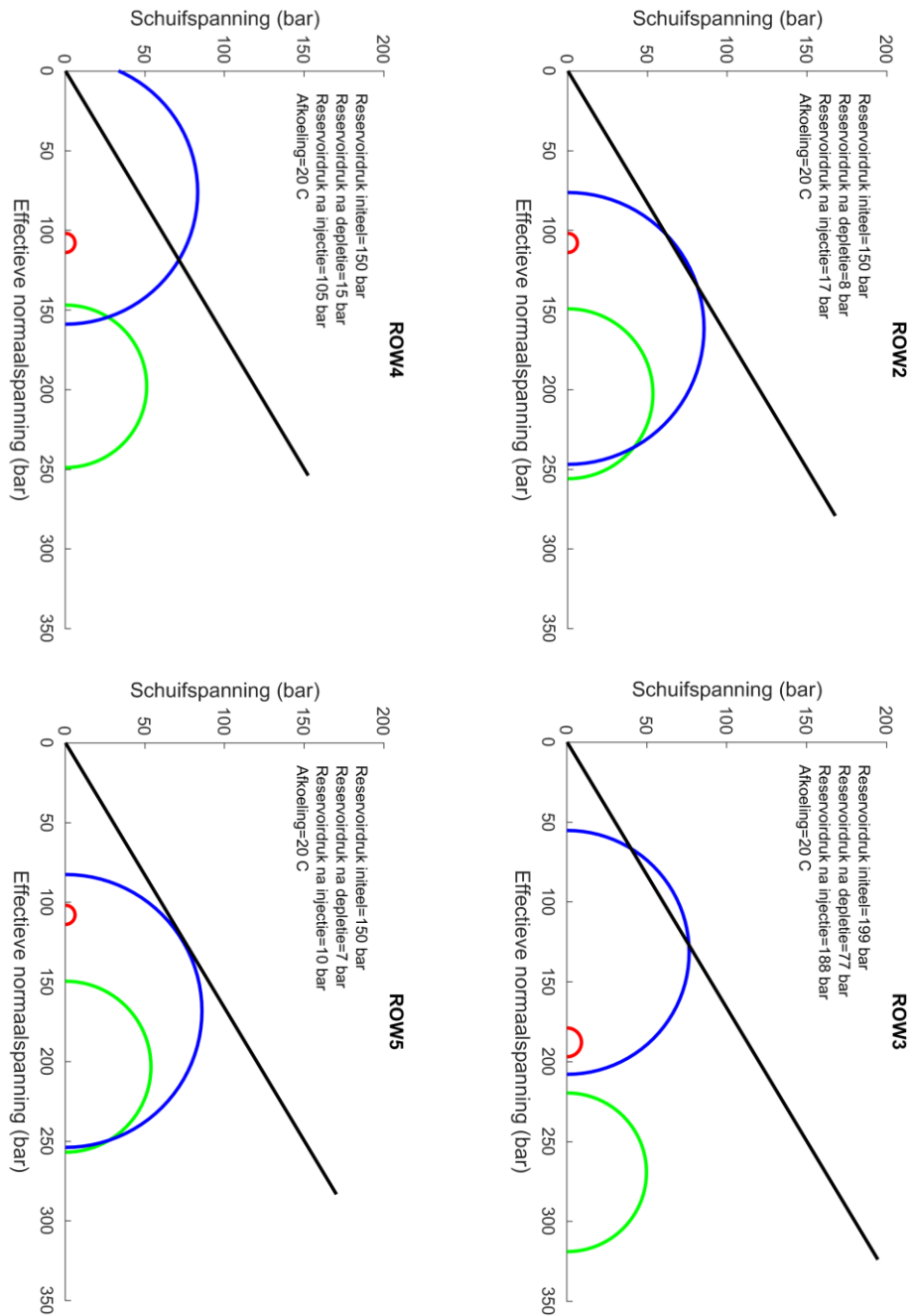
Figuur A7: Spannings- en frackinganalyse per put, gebaseerd op voorspelde putdrukken (NAM, 2015a) en afkoeling van 20 °C. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een scheur vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt. Fracking vindt plaats wanneer een cirkel de verticale as raakt. Hier voor beide putten: Verschuiving en fracking.

- Beginsituatie
- Einde aardgaswinning
- Einde afvalwaterinjectie

**Datum**  
6 december 2016

**e referentie**  
: 16-10.104

**1**  
**6**



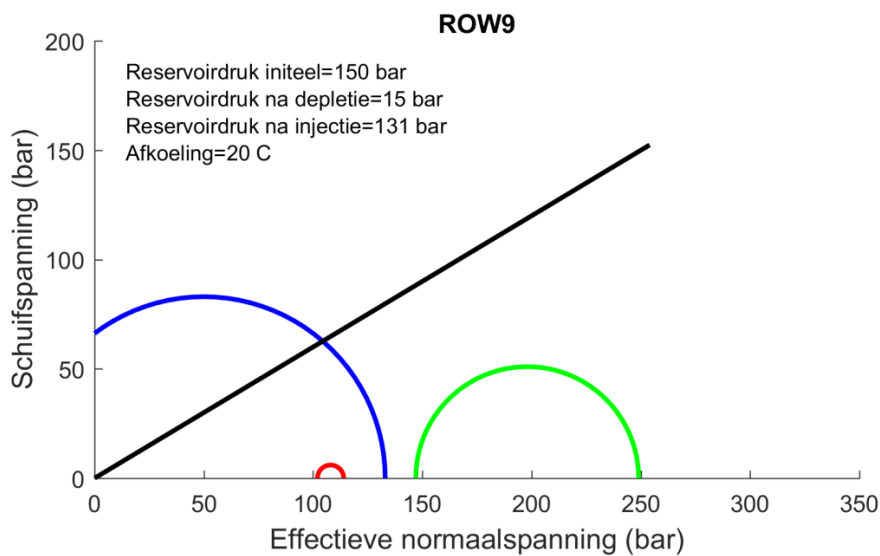
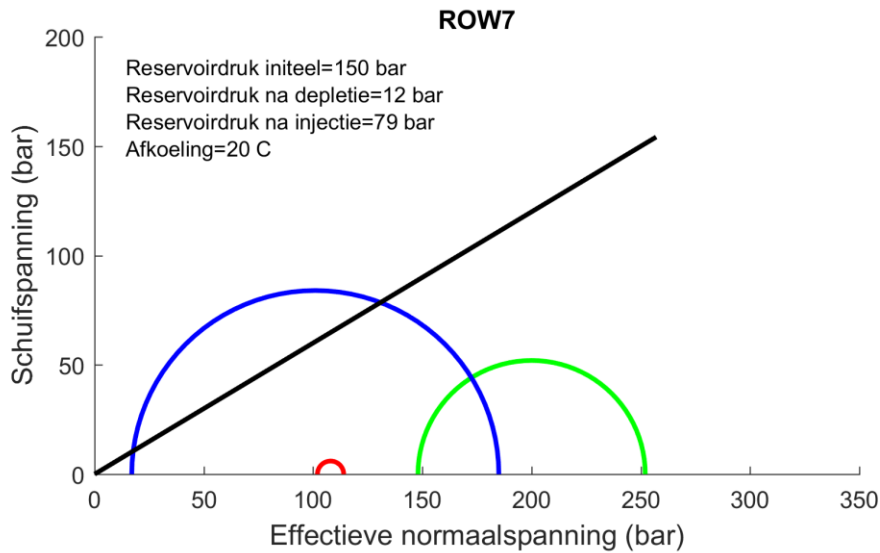
Figuur A8: Spannings- en frackinganalyse per put, gebaseerd op voorspelde putdrukken (NAM, 2015a) en afkoeling van 20 °C. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een scheur vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt. Fracking vindt plaats wanneer een cirkel de verticale as raakt. Hier: verschuiving in ROW 2 en ROW3, verschuiving en fracking in ROW 4. ROW5 is net stabiel, bijna aan het schuiven.

- Beginsituatie
- Einde aardgaswinning
- Einde afvalwaterinjectie

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
55/56



Figuur A9: Spannings- en frackinganalyse per put, gebaseerd op voorspelde putdrukken (NAM, 2015a) en afkoeling van 20 °C. Zie Appendix IV voor uitleg over dit type diagrammen. Verplaatsing van een scheur vindt plaats als cirkel boven de faallijn (dik, zwart) uitkomt. Fracking vindt plaats wanneer een cirkel de verticale as raakt. Hier: verschuiving in ROW7, verschuiving en fracking in ROW9.

- Beginsituatie
- Einde aardgaswinning
- Einde afvalwaterinjectie

**Datum**  
6 december 2016

**Onze referentie**  
AGE 16-10.104

**Blad**  
56/56

Tabel V-I: Overzicht van berekende indicatieve spanningsveranderingen ten gevolge van waterinjectie. Aangegeven wordt de spanningsverandering door afkoeling met 20 °C, de poriëndrukverandering (hier worden de uiteindelijk verwachte putdrukken gebruikt, zie Appendix II en NAM (2015a)), hoeveel verdere druktoename nodig is voor verschuiving langs scheuren en voor fracking condities. In deze analyse is het niet mogelijk onderscheid te maken tussen seismisch verschuivende breuken (verschuivingen die aardbevingen veroorzaken) en aseismisch verschuivende breuken (verschuivingen die geen aardbevingen veroorzaken).

Put	Thermische spanning ( $\Delta T = 20C$ )	Drukverandering $\Delta P$	Verdere $\Delta P$ nodig voor verschuiving langs bestaande scheuren	Verdere $\Delta P$ nodig voor fracking condities
	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]
TUM1	64	20	28	120
TUM2	64	4	43	120
TUM3	64	8	39	120
ROW2	64	9	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	76
ROW3	53	111	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	55.
ROW4	64	90	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	Frackt al onder huidige aannames <sup>18</sup>
ROW5	64	3	2	83
ROW7	64	67	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	17
ROW9	64	133	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	Frackt al onder huidige aannames <sup>18</sup>
TUB7	64	106	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	Frackt al onder huidige aannames <sup>18</sup>
TUB10	64	116	Verschuift al onder huidige aannames <sup>18</sup>	Frackt al onder huidige aannames <sup>18</sup>

<sup>18</sup> In alle putten waar verschuiving/fracking wordt voorspeld heeft tussen 2011 en 2016 injectie plaatsgevonden. In deze periode is geen seismiciteit waargenomen in de regio en er zijn geen aanwijzingen dat hydrofractie/verschuiving langs scheuren heeft plaatsgevonden in deze periode.