



**NAM**

**Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.**

---

Risicoanalyse:

Ondergrondse Gas Opslag: Verspreiding van stoffen  
vanuit het Norg voorkomen

---

## Table of Contents

1: Introductie .....	3
2: Vlinderdas analyse voor ondergrondse verspreiding van stoffen vanuit de Norg gasopslag locatie (voorkomen en putten).....	3
2.1: Definitie van de hoofdgebeurtenis .....	5
2.2: Beschrijving en begrenzing van de ondergrondse gasopslag .....	5
3: Risico's.....	10
R1:    Kruipende zoutformaties die kunnen leiden tot vervorming en scheuren van verbuizing .....	10
R2:    Corrosie van de binnenste productieverbuizing wat kan resulteren in lekkage via de annulaire ruimte naar lekkagepunten in de putverbuizing .....	11
R3:    Lekkende afdichting van productiepacker.....	12
R4:    Reactivatie van natuurlijke breuken door het opnieuw op druk brengen van het voorkomen.....	13
R5:    Cyclische belasting die leidt tot verslechtering van de cementkwaliteit rondom de onderste verbuizingsschoen.....	15
R6:    Putgroei door thermische uitzetting als gevolg van gasproductie .....	16
R7:    Slechte cementkwaliteit die kan leiden tot lekkage tussen de putverbuizing en afdichtende formaties.....	18
R8:    Geïnduceerde breuken als gevolg van hogedruk gasinjectie .....	19
R9:    Over-injectie van gas in het Norg voorkomen .....	21
Additionele risico's met een zeer lage waarschijnlijkheid of effect die daarom niet opgenomen in de vlinderdas analyse.....	22
4: Consequenties.....	24
C1:    Accumulatie van koolwaterstof gas in afgesloten ruimtes of putkelders .....	24
C2:    Accumulatie van koolwaterstofgas in ondiepe formaties .....	25
C3:    Accumulatie van koolwaterstofgas in formaties op "gemiddelde diepte" .....	25
C4:    Voorkomens van koolwaterstofgas in diepere delen van de Zechstein formatie.....	26
C5:    Weglekken van koolwaterstof gas uit het voorkomen (economische consequentie) .....	27
5: Overige veranderingen aan het voorkomen.....	29
Zandproductie:.....	29
Verlagen van formatiespanning of geïnduceerde breuken binnen het producerende voorkomen .....	29
Vorming van zwaveldioxide (H <sub>2</sub> S) .....	29
Verandering van de compositie van het koolwaterstofgas in het voorkomen .....	30

## 1: Introductie

Het Norg veld is gesitueerd in het noordelijke deel van de Drenthe II concessie en is ontdekt in 1965 door de Norg-1 put. Van 1983 tot 1995 is hoogcalorisch gas geproduceerd, waarna het veld werd ingesloten om omgezet te worden in een ondergrondse gasopslag locatie. In die periode is 10.4 miljard kubieke meter gas geproduceerd. Vanaf 1997 dient het veld als ondergrondse gasopslag waarbij in de wintermaanden gas geproduceerd wordt en het veld weer gevuld wordt in de zomer. In 2014 is de gasinjectie- en productiecapaciteit uitgebreid naar 7 miljard kubieke meter werk volume door extra putten te boren en de installaties uit te breiden.

## 2: Vlinderdas analyse voor ondergrondse verspreiding van stoffen vanuit de Norg gasopslag locatie (voorkomen en putten)

Een vlinderdasanalyse (Engels “Bowtie analysis”) is een veelgebruikt instrument om een analyse te maken van mogelijke dreiging van gevaar. Het doel is om risico’s, barrières en consequenties op een gestructureerde manier inzichtelijk te maken en op deze manier de dreiging beheersbaar te maken. Deze methodologie is toegepast om de dreiging van het ongecontroleerd verspreiden van koolwaterstofgas in de ondergrond rondom de Norg opslaglocatie in kaart te brengen.

Een vlinderdas is een grafische representatie wat de dreigingen zijn, hoe gevaarlijke situaties kunnen escaleren en welke controlemogelijkheden er zijn. Het maakt de effectiviteit inzichtelijk van barrières om het gevaar te voorkomen of beheersen, of schadelijke consequenties te mitigeren.

De volledige grafische representatie van de vlinderdas “Verspreiding van stoffen uit de Norg Ondergrondse Gasopslag” is weergegeven in Appendix A.

In het midden van de vlinderdas bevindt zich de mogelijkheid tot het ontstaan van een gevaarlijke situatie, de dreiging of hoofdgebeurtenis. Aan de linkerzijde staan de mogelijke risicofactoren die kunnen leiden tot een gevaarlijke situatie. Aan de rechterzijde staan de potentiële consequenties op het moment dat de gevaarlijke situatie zich voordoet.

Tussen de risico’s en de hoofdgebeurtenis bevinden zich barrières die voorkomen dat een gevaarlijke situatie kan ontstaan. Aan de rechterzijde staan barrières die mogelijke consequenties mitigeren of zelfs de consequenties volledig kunnen voorkomen in gevallen dat de gevaarlijke situatie zich toch voordoet. In dit rapport worden de verschillende elementen (hoofdgebeurtenis, risico’s, consequenties en barrières) van de vlinderdas analyse beschreven die gerelateerd zijn aan de ondergrondse verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen in gasopslag veld Norg.

Een samenvatting van de bevindingen staan weergegeven in Tabel 2.1.

	Risico's	Waarschijnlijkheid	Justificatie voor waarschijnlijkheid	Barrières	Overgebleven waarschijnlijkheid
1	Kruipende zoutformaties die kunnen leiden tot vervorming en scheuren van verbuizing	Hoog	Schade aan putten is voorgekomen in Nederland	Materiaal selectie voor verbuizingsterkte over risicozones, continue drukmeting, productiepomp die toegang geeft in geval schade alsnog optreedt	Klein
2	Corrosie van de binnenste productieverbuizing wat kan resulteren tot lekkage door de annulaire ruimte naar lekkage punten in de putverbuizing	Hoog	Corrosie van staal in verbuizing en productiepomp is voorgekomen in Nederland	Materiaal selectie (CR-13) voor productiepomp en corrosie remmende vloeistoffen in annulaire ruimte. Druk meting om te detecteren wanneer lekkage ontstaat	Klein
3	Lekkende afdichting van productie packer	Hoog	Packer afdichtingen kunnen lekken en is voorgekomen in Nederland	Ontwerp en materiaalselectie voor packers, continue bewaking van de druk in de annulus	Klein
4	Reactivatie van formatie breuken door het opnieuw op druk brengen van het voorkomen	Gemiddeld	Weinig seismische activiteit waargenomen in Nederland als gevolg van gasinjectie	Put locatie en boorrouting gekozen om breuken te ontwijken, bestaande breuken hebben een breukverzet kleiner dan de Zechstein dikte, druk bewaking in annulus	Klein
5	Cyclische belasting die leidt tot degradatie van cement kwaliteit rondom de onderste verbuizingsschoen	Gemiddeld	Drukcyclus niet veel anders dan veranderingen in druk die optreden tijdens schakelen geen productie naar productie	Putontwerp en geselecteerd cement zijn geschikt bevonden voor toepassing in opslag installaties, continue bewaking van annulus druk	Klein
6	Put groei door thermische uitzetting van de put als gevolg van productie	Gemiddeld	Schade als gevolg van drukgroei is niet bekend in Nederland	Putontwerp houdt rekening met alle productie- en injectiescenario's met bijbehorende temperaturen	Klein
7	Slechte cement kwaliteit die kan leiden tot lekkage tussen de putverbuizing en afdichtende formaties	Gemiddeld	Lekpaden achter cement/verbuizing zijn voorgekomen in de industrie	Cement selectie gekozen in lijn met toepassing in gasopslag, druktesten van essentiële afdichtende Zechstein secties, continue drubbewaking van A/B/C annulus	Klein
8	Geïnduceerde formatie breuken in afdichtende formatie als gevolg van hoge druk injectie	Laag	Het is voorgekomen in de industrie dan afdichtende lagen scheuren	Minimale horizontale formatie spanning is 100 bar hoger dan de maximaal haalbare injectie druk, maximale injectiedruk technisch gelimiteerd door compressor capaciteit	Klein
9	Over-injectie van gas in het Norg voorkomen	Laag	Niet bekend waar voorgekomen	Planning en uitvoering van vooraf bepaalde injectie/productie volumes, continue bewaking van druk in het voorkomen	Klein
10	Injectie Joule-Thompson afkoeling of overige temperatuur effecten	Laag	Niet bekend dat afkoeling als gevolg van JT in de industrie geleid heeft tot formatie/cement schade	Injectie gas wordt op een temperatuur gebracht die vergelijkbaar is met de temperatuur van het voorkomen, Joule-Thompson koeling heeft weinig effect	Verwaarloosbaar
11	Aanwezigheid van natuurlijke lekkende formatie breuken in de nabijheid van de opslaglocatie	Laag	Lekkende natuurlijke breuken zijn bekend in de industrie, echter niet in de omgeving van het Norg veld	Keuze van het opslag voorkomen om het juiste soort afdichtende laag te hebben (Zechstein formatie, dikte van de zoutlaag)	Verwaarloosbaar
12	Lekkage door de bovenste afdichtende formatie	Laag	Lekkende afdichtende lagen zijn bekend in de industrie, echter niet in de omgeving van het Norg veld	Keuze van het opslag voorkomen om het juiste soort afdichtende laag te hebben (Zechstein formatie, dikte van de zoutlaag)	Verwaarloosbaar

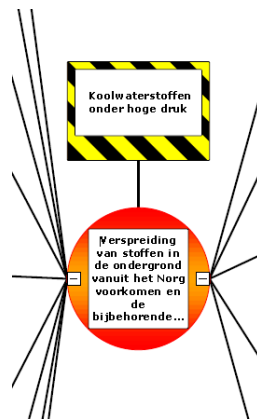
**Tabel 2.1:** *Samenvatting van de risico's en barrières die zijn geïdentificeerd door middel van de vlinderdas analyse op de dreiging van verspreiding van stoffen uit het Norg voorkomen*

## 2.1: Definitie van de hoofdgebeurtenis

Beschrijving: “Verspreiding van stoffen in de ondergrond vanuit het Norg voorkomen en de bijbehorende putten”

Het doel van de vlinderdasanalyse is om een overzicht te geven van alle risico's die zouden kunnen leiden tot het weglekken van gas vanuit het voorkomen of putten, evenals de maatregelen die genomen zijn om te voorkomen dat een gevaarlijke situatie als gevolg van deze risico's kan ontstaan. Deze vlinderdasanalyse beperkt zich specifiek tot de ondergrondse gevaren die gerelateerd zijn aan het opslaan van gas in een ondergronds voorkomen. Voordat een analyse van de dreiging, risico's en consequenties gemaakt kan worden, worden zowel de hoofdgebeurtenis als het opslaggebied omschreven. Vervolgens is een analyse van de scenario's gemaakt welke zouden kunnen leiden tot het weglekken van stoffen vanuit het opslaggebied.

Als voorbeeld: corrosie van de productieverbuizing binnen de grenzen van het voorkomen zal niet leiden tot de verspreiding van stoffen buiten het voorkomen en zal daarom geen risico vormen voor het ontstaan van een gevaarlijke situatie. Een schematische representatie van de bovengenoemde hoofdgebeurtenis is weergegeven in Figuur 2.1, zie ook Appendix A. De lijntjes links en rechts zijn verbonden met de risico's en consequenties die zullen worden besproken in dit rapport.



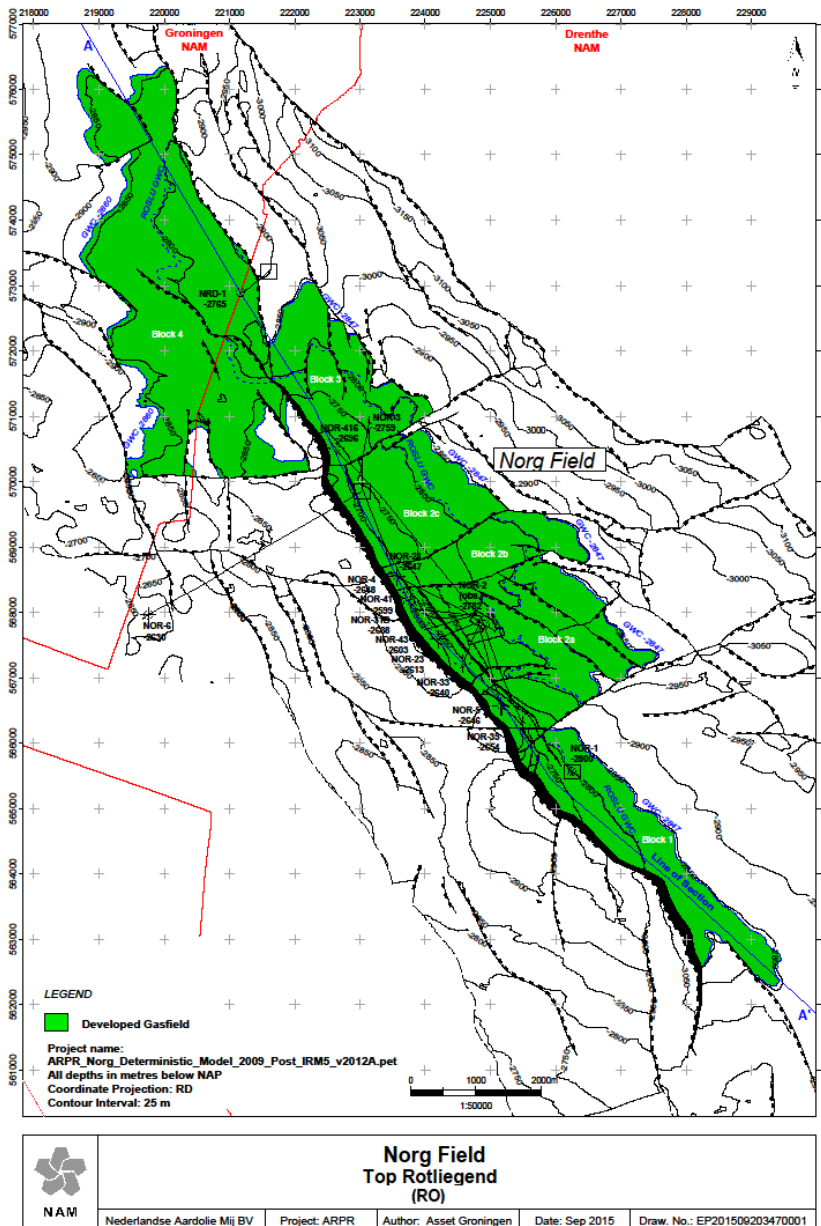
**Figuur 2.1:** Schematische representatie van de hoofdgebeurtenis met de verbindingen links voor risico's (hoofdstuk 3) en rechts voor consequenties (hoofdstuk 4)

## 2.2: Beschrijving en begrenzing van de ondergrondse gasopslag

De ondergrondse gasopslag bestaat uit twee hoofdonderdelen: het gasvoorkomen en de putten naar en van het voorkomen. Deze sectie geeft een gedetailleerde beschrijving van zowel de ondergrondse structuur van het voorkomen als het standaard putontwerp.

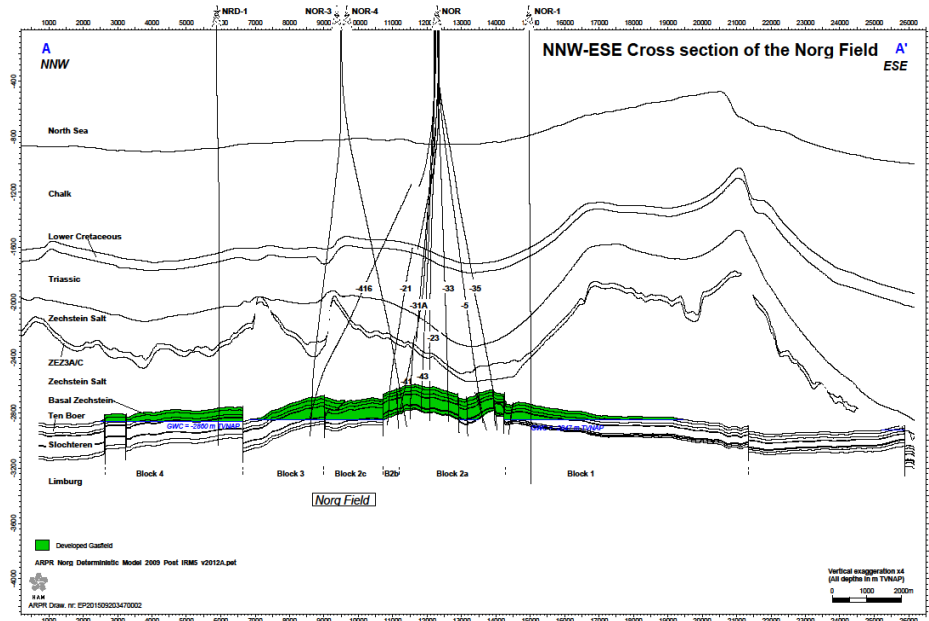
Gas is ingesloten in het poreuze gesteente van het Rotliegend. De Top-Rotliegend kaart van het Norg voorkomen en het omliggende gebied is weergegeven in Figuur 2.2. De laterale begrenzing van de accumulatie is weergegeven door middel van de blauwe lijn. Dit is de snijlijn tussen de onderbegrenzing

van het voorkomen (het gas-water-contact (GWC)) en het Top-Rotliegend oppervlak. Deze bepalen samen de groen gearceerde delen waar gas aangetroffen wordt in de gesteenteformaties. Het Norg voorkomen bestaat uit een langgerekte noordoost hellende monokliene structuur die in het westen wordt afgesloten door een noord-noordwest – zuid-zuidoost georiënteerde afschuivingsbreuk met een verzet van 250 meter. De lange as van het voorkomen helt licht in noordwestelijke richting.



**Figuur 2.2:** Kaart van de top-Rotliegend formatie waarin de gasvoerende formatie gearceerd is in groen. Het gas water contact (GWC) is gemarkeerd met de blauwe lijn. De rode lijn is de concessie grens. De dieptekaart langs de blauwe doorsnedelijng AA' is weergegeven in Figuur 2.3.

Een dwarsdoorsnede langs de lengterichting van het voorkomen A-A' van Figuur 2.2 is weergegeven in Figuur 2.3.



**Figuur 2.3:** Dwarsdoorsnede langs lijn A-A' in Figuur 2.2. De gasvoerende formatie is weergegeven door het groen gearceerde lagen. Het GWC is weergegeven door de blauwe lijn.

De afmetingen van het voorkomen worden bepaald door de structurele lekpunten (“spill points”) in de noordelijke en zuidelijke punten van het veld. Het voorkomen bestaat uit 4 breukblokken of compartimenten die worden gescheiden door oost-noordoostelijke – west-zuidwestelijke interne breuken (zie Figuur 2.2. en 2.3.) waarvan het verzet enkele tientallen meters bedraagt. Deze blokken met de daarin geboorde putten zijn:

- Blok 1 (Norg-1)
- Blok 2 (Norg-2, -4, -5, -21, -31, 33, -35, -41, -43)
- Blok 3 (Norg-3 en Norg-416)
- Blok 4 / Nieuw Roden (NRD-1, geabandonneerd)

De structuur in blok 2 is complex door interne breuken die er ook toe geleid hebben dat er opgeheven blok tegen de westelijke afsluitende breuk aan ligt, het zogenaamde “pop-up blok”.

Breuken liggen verdeeld over het Norg voorkomen en zijn voornamelijk verticale afschuivingsbreuken. Met productiedata is aangetoond dat Block 1, 2 en 3 direct met elkaar communiceren door de gasvoerende lagen. Verder is er ook communicatie aangetoond tussen Blok 4/Nieuw Roden en het Assen voorkomen op grond van de drukdata van respectievelijk putten NRD-1 en ASN-1.

Het Rotliegend van het Norg voorkomen kan onderverdeeld worden in de Slochteren zandsteen en Ten Boer kleisteen lagen. De Slochteren zandsteen formatie is afgezet in een gemengd fluviatiel en eolisch afzettingsmilieu terwijl de Ten Boer kleisteen is afgezet aan de rand van een lacustrien afzettingsmilieu. De dikte van de Rotliegend sedimenten varieert van 150 meter in het zuiden tot meer dan 200 meter in het noorden. Het kleirijke bovenste gedeelte van de Ten Boer kleisteen vormt samen met de Zechstein groep de afdichtende laag van het voorkomen. De Zechstein sedimenten bestaan uit enkele dolomiet- en anhydrietintervallen afgewisseld met dikke pakketten steenzout. Onder het Rotliegend ligt het Karboon, dat bestaat uit een afwisseling van zandsteen, kleisteen en kool, afgezet in een fluviatiel-deltaïsch milieu. Een aantal hoog op de structuur geboorde putten hebben gasvoerende zandsteenlagen aangetoond bovenin het Karboon waar dit zich nog uitstrekt tot boven het gas-water-contact.

Het zandrijke onderste gedeelte van de Ten Boer is in drukcommunicatie met de Slochteren formatie en wordt dan ook beschouwd als onderdeel van het voorkomen. Aan de bovenkant wordt het voorkomen afgebakend door de Zechstein sedimenten. Aangrenzende blokken vallen ook buiten het opslaggebied zelfs als er drukcommunicatie zou zijn via bijvoorbeeld een watervoerende formatie onder het voorkomen. Zo zou verspreiding van koolwaterstofgas vanuit het Norg veld plaats kunnen vinden door te veel gas te injecteren, waarna het GWC dieper komt te liggen dan het laagste lekpunt zodat gas ontsnapt naar een naastgelegen blok. Een dergelijk scenario zal aangemerkt worden als ongewenste verspreiding van stoffen.

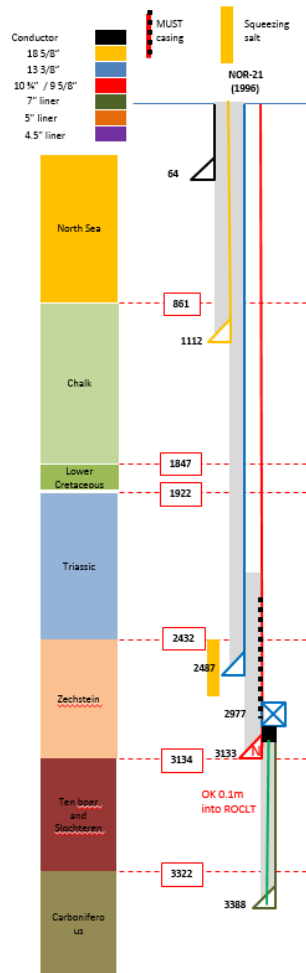
Het ontwerp en het operationele bereik (capaciteit) van de Norg putten is erop gericht om het risico op verspreiding van stoffen te minimaliseren gedurende de volledige levensduur van de put. Het standaard putontwerp voor het Norg veld is weergegeven in Figuur 2.4. Alle putten in het Norg veld staan in meer detail beschreven in Appendix C. De diepten aangemerkt in deze figuur en appendix zijn indicatief, voor exacte getallen dient de meest recente en complete data uit de NAM put-database geraadpleegd te worden. De barrières die beschreven staan in dit rapport zijn van toepassing op alle actieve injectie- en productieputten. De putontwerpen zijn aangepast bij de omzetting van Norg van depletie naar ondergrondse opslag. Sommige van de oudere putten zijn nu nog in gebruik als observatieput.

Tijdens de injectie- of productiefase stroomt gas door de opvoerserie van of naar het voorkomen. Mocht er een lekkage in deze opvoerserie optreden dan komt de annulaire A-ruimte onder druk te staan. In het ontwerp is hier rekening mee gehouden en daarom wordt de annulaire A-ruimte beschouwd als onderdeel van de gasopslag. Een lekkende opvoerserie leidt dus niet per definitie tot ongewenste verspreiding van stoffen uit het voorkomen. Bij detectie van druk op de annulaire A-ruimte kunnen herstelwerkzaamheden worden geïnitieerd die worden uitgevoerd volgens standaard operationele procedures.

Samengevat wordt de begrenzing van ondergrondse gasopslag gedefinieerd door:

*Koolwaterstoffen worden bevinden zich binnen de begrenzing van de ondergrondse gasopslag wanneer deze zich in de opvoerserie of annulaire A-ruimte bevinden, binnen de Rotliegend formatie en binnen de begrenzingen van het Norg voorkomen in Blok 1-4 zoals bepaald door de lekpunten in het noorden en zuiden van het voorkomen.*





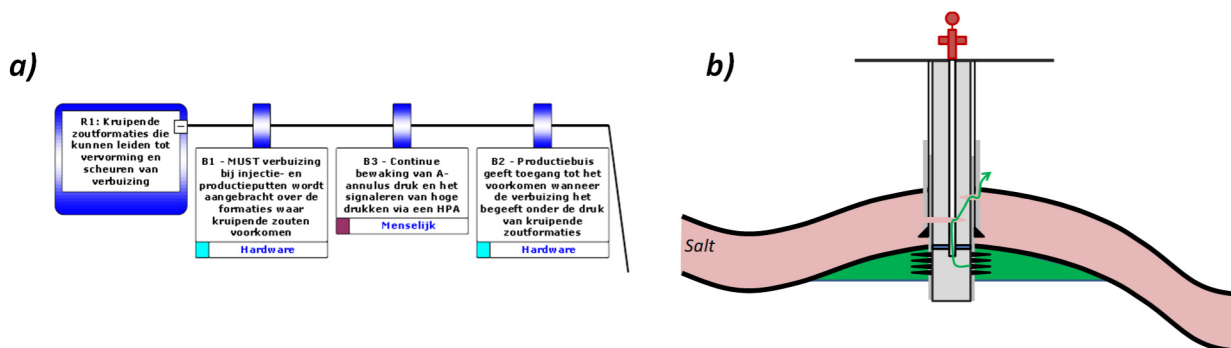
**Figuur 2.4:** Voorbeeld van een typisch putontwerp voor een Norg injectie/productieput en een indicatie van de belangrijkste geologische formaties, verbuizingen, productieverbuizing, schoenen en packers. De opvoerserie is niet weergegeven in dit plaatje.

De volgende hoofdstukken beschrijven de verschillende risico's die kunnen resulteren in het ontstaan van een gevaarlijke situatie en de mogelijke consequenties. Elke paragraaf bevat een deel van de volledige vlinderdas van Appendix A met een schematische tekening ter verduidelijking.

### 3: Risico's

#### R1: Kruipende zoutformaties die kunnen leiden tot vervorming en scheuren van verbuizing

**Beschrijving:** De voornaamste afdichtende laag van het Norg voorkomen wordt gevormd door de Zechstein evaporiet lagen. Onder hoge druk en temperatuur zijn deze zoutlagen vervormbaar en gedragen zich als een viskeuze vloeistof. De hoge druk als gevolg het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen kan leiden tot hoge puntbelastingen op de putverbuizing die dientengevolge kan deformer en in het ergste geval zelfs breken of scheuren. Ook in gevallen waarin alleen deformatie optreedt is het al moeilijker om een reparatie aan de put uit te voeren. In het geval dat zowel de opvoerserie als de putverbuizing het begeven kan er koolwaterstofgas van het voorkomen naar bovenliggende lagen stromen. Wel is het zo dat als er een lekpad ontstaat als gevolg van kruipende zoutformaties deze door dezelfde formaties weer afgedicht zullen worden door verder plastische vervorming rondom de pijpbreuk.



**Figuur 3.1:** a) Visualisatie van het risico kruipende zoutformaties en bijbehorende barrières en b) schematische tekening van verspreiding van stoffen resulterend verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen.

#### Barrières:

**B1** Verstevigde buiswand verbuizing (MUST) bij injectie- en productieputten wordt aangebracht over de formaties waar kruipende zouten voorkomen

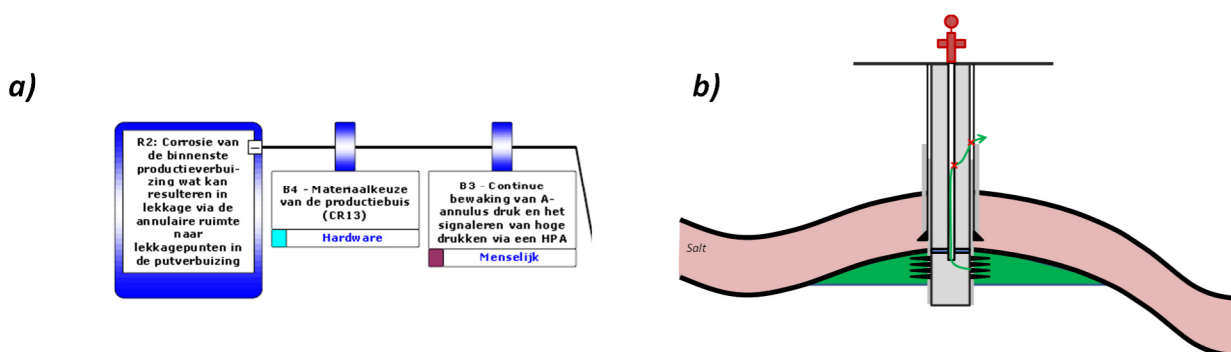
Dit type putverbuizing bestaat uit een extra verstevigde buiswand die maximale weerstand biedt tegen de druk van buitenaf van de kruipende zoutformatie. Deze MUST verbuizing is aangebracht op alle Norg injectie- en productieputten. Er zijn geen situaties bekend waar dit type verbuizing het alsnog begeeft onder de druk van kruipende zouten. Verder wordt de gehele Zechstein geboord met een boorspoeling op oliebasis om het oplossen van de

zoutlagen te voorkomen en op deze manier puntbelastingen als gevolg van uitspoelingsholten te minimaliseren. Op deze manier is de put optimaal te cementeren waarna het viskeuze zout kleine annuli zal vullen en afsluiten.

- B3** *Continue bewaking van A-annulus druk en het signaleren van hoge drukken via een HPA*  
De A-annulus is voorzien van een druksensor die gekoppeld is aan een hogedruk alarm. (“High Pressure Alarm” – HPA). Dit voorkomt dat de druk uitstijgt boven de hoogste ontwerpdruk van de put (MAASP – “Maximum Allowable Annular Surface Pressure” – maximal toegestane annulaire druk gemeten aan de oppervlakte). Mocht een HPA geactiveerd worden dan zal volgens het standaard bedieningsprotocol binnen een uur de druk afgelaten worden. Indien dit niet succesvol verloopt zal verdere actie ondernomen worden. In het meest extreme scenario resulteert dit in het doodpompen van de put waarvoor ook standaardprocedures bestaan (Well Kill Plan Groningen [1]).
- B2** *Opvoerserie geeft toegang tot het voorkomen wanneer de putverbuizing het begeeft onder de druk van kruipende zoutformaties.*  
Mocht het voorkomen dat de putverbuizing zou vervormen of scheuren, dan geeft de opvoerserie nog steeds toegang tot het voorkomen. Een hoge druk alarm op de A-annulus zou detecteren dat er een probleem aan de putverbuizing zou zijn waarna in de meeste gevallen nog steeds doodpompen plaats kan vinden in lijn met de standaardprocedures beschreven in het Groningen Well Kill Plan [1].

## R2: Corrosie van de binnenste productieverbuizing wat kan resulteren in lekkage via de annulaire ruimte naar lekkagepunten in de putverbuizing

**Beschrijving:** Corrosie aan de opvoerserie kan resulteren in een scenario waarin de opvoerserie het uiteindelijk begeeft en er een lekpad kan ontstaan vanuit de opvoerserie naar de annulaire A-ruimte. In het geval dat de putverbuizing ook lekt, kan gas zodoende vanuit het voorkomen via de opvoerserie naar de formaties boven het voorkomen stromen.



**Figuur 3.2:** a) Visualisatie van het risico dat corrosie aan de opvoerserie kan leiden tot een verspreiding van stoffen scenario en b) schematische weergave van de verspreiding van stoffen uit het voorkomen naar bovenliggende formaties als gevolg corrosie aan de opvoerserie.

### Barrières:

#### *B4 Materiaalkeuze van de opvoerserie*

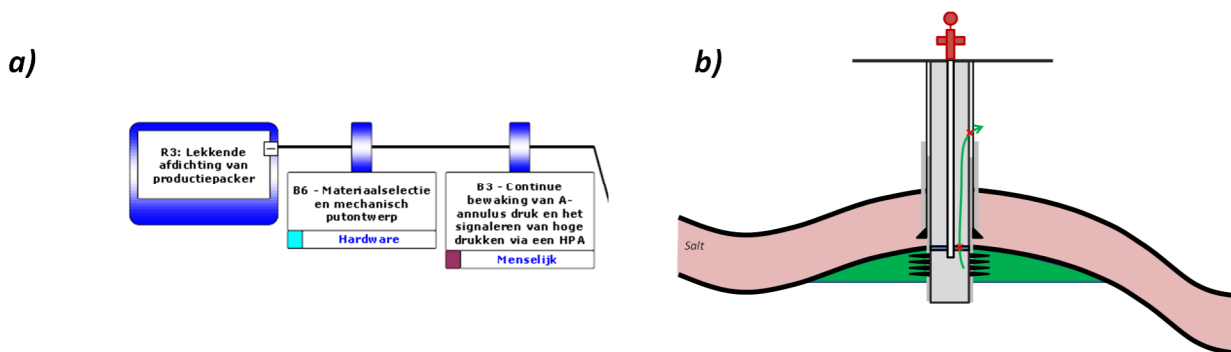
Opvoerserie voor injectie- en productieputten is gemaakt van een corrosie werend materiaal (CR13 corrosie werende legering) [2]. De annulaire ruimte tussen de opvoerserie en putverbuizing is gevuld met vloeistof (KCl zoutoplossing, condensaat, corrosieremmers etc.) en inerte gassen. De afwezigheid van zuurstof voorkomt ook corrosie aan de opvoerserie.

#### *B3 Continue bewaking van A-annulus druk en signaleren van hoge drukken via een HPA*

Zie hiervoor Risico R1-B3

### R3: Lekkende afdichting van productiepacker

Een lekkende productiepacker resulteert in de mogelijkheid voor koolwaterstofgas om vanuit het voorkomen naar de A-annulus te lekken. In het geval dat de verbuizing die de A-annulus begrenst ook beschadigd is en hierdoor een lekpad heeft naar de omliggende formatie kan dit resulteren in het de verspreiding van stoffen buiten het voorkomen.



**Figuur 3.3:** Visualisatie van het risico dat een lekkende productiepacker kan leiden tot verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen en b) een schematische tekening van het scenario dat een lekkende packer zou leiden tot verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen naar bovenliggende formaties.

### Barrières:

#### *B6 Materiaalselectie en mechanisch putontwerp*

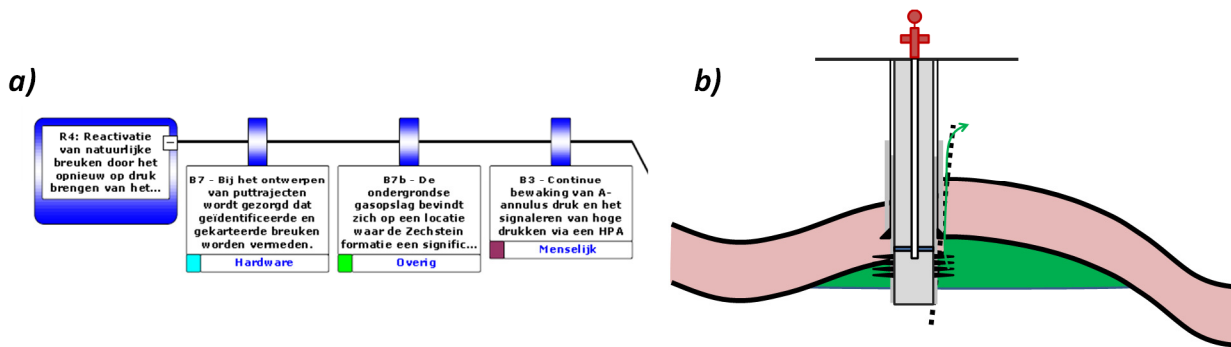
Het materiaal van de productiepacker is gekozen om tijdens de hele levensduur van de packer een goede afdichting te garanderen. De effectiviteit van de productiepacker is getest alvorens de put in gebruik genomen wordt voor injectie of productie [2].

**B3** *Continue bewaking van A-annulus druk en signaleren van hoge drukken via een HPA*

Zie hiervoor R1-B3. De annulaire ruimte van de A-annulus is vloeistofgevuld en enige lekkage van de productie zal daarom snel opgemerkt worden door de druksensoren of HPA. Gas in de A-annulus valt nog binnen de begrenzing van de gasopslag (zie definitie hoofdstuk 2.2)

## R4: Reactivatie van natuurlijke breuken door het opnieuw op druk brengen van het voorkomen

**Beschrijving:** Er zijn meerdere breuken aanwezig in het Norg voorkomen, waarvan enkelen met een aanzienlijk verzet. Al deze breuken kunnen binnen de Rotliggend formatie communicatie tussen blokken mogelijk maken. Naar boven toe worden de breuken echter begrensd door de Zechstein formaties die door de plastische eigenschappen aanwezige breuken afgesloten zullen houden als deze reactiveren. De effectieve afdichtende werking van de Zechstein formaties blijkt uit het feit dat over geologische tijdschaal het gas opgeslagen kon blijven in het voorkomen. Als gevolg van productie of injectie is het mogelijk dat breuken gereactiveerd worden. Langs deze gereactiveerde breuken zou gas kunnen lekken naar ondiepere formaties wat zou kunnen leiden tot verspreiding van stoffen buiten het voorkomen. Verder zou breukreactivatie mogelijk ook kunnen leiden tot integriteitsproblemen aan injectie- of productieputten.



**Figuur 3.4:** a) Visualisatie van het risico dat reactivatie van een breuk zou leiden tot verspreiding van stoffen en b) een schematische weergave van het lekpad dat kan resulteren in de verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen als gevolg van breukreactivatie.

### Barrières:

**B7** *Bij het ontwerpen van puttrajecten wordt gezorgd dat geïdentificeerde en gekarteerde breuken worden vermeden.*

Putten worden ontworpen om de kans van het aanboren van een breuk te minimaliseren. Dit kan alleen voor die breuken die zichtbaar zijn op seismiek of anderszins te herleiden zijn op basis van ondergrondse data. Hiermee worden stabiliteitsproblemen in het boorgat voorkomen, en wordt vermeden dat er rechtstreeks in een breukvlak geïnjecteerd wordt.

*B7b De ondergrondse gasopslag bevindt zich op een locatie waar de Zechstein formatie een significante dikte heeft.*

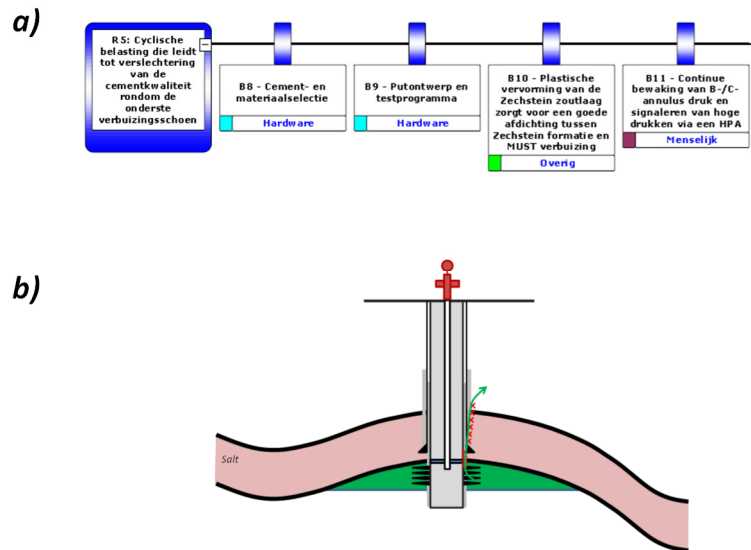
Het Zechstein zout ligt als een continue laag over de Rotliegend formatie en heeft hier overal een significante dikte (> 200 meter). Zelfs voor de breuken met het grootste verzet is dit verzet altijd nog kleiner dan de dikte van de Zechstein formatie. Het plastisch deformatiegedrag binnen de Zechstein zoutlaag zal ervoor zorgen dat elk geïnduceerd breukverzet zal smoren in de zoutlaag. Dwarsdoorsnedes die de dikte van de Zechstein weergeven op verschillende doorsnede locaties staan in Appendix D.

*B3 Continue bewaking van A-annulus druk en signaleren van hoge drukken via een HPA*

Zie hiervoor Risico R1-B3

## R5: Cyclische belasting die leidt tot verslechtering van de cementkwaliteit rondom de onderste verbuizingsschoen

Als gevolg van het afwisselend injecteren en produceren treedt er een cyclische belasting op het cement rondom de perforaties op. De druk varieert hierbij tussen de 200 en 350 barg. Dit leidt tot extra materiaalspanning in het cement rondom de verbuizingsschoen. Naast het cement rondom de productieverbuizing die geperforeerd is over het voorkomen, zit er hoger in de opvoerserie een verbuizing die gecementeerd is in de Zechstein. Deze gecementeerde verbuizing is cruciaal in het boorproces (deze moet immers situaties van onverwachte overdruk tijdens het boren kunnen weerstaan), maar vormt tegelijkertijd ook een barrière om verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen langs het boorgat door de Zechstein te verhinderen. Gezien het belang van deze verbuizingsschoen wordt deze altijd getest op druk. Een lekpad langs de onderste verbuizingsschoen, langs het cement van de productieverbuizing zal dan vervolgens tegengehouden worden door de verbuizing (schoen en cement) over het Zechstein interval. In het geval dat het cement van deze verbuizing ook verzwakt is zou verspreiding van stoffen kunnen optreden.



**Figuur 3.5:** Visualisatie van het risico dat de formatie of het cement degradeert rondom de productieverbuizing met bijbehorende barrières en b) schematische tekening van verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen als gevolg van degradatie van cement kwaliteit (van zowel productieverbuizing als wel bovenliggende opvoerseries)

Barrières:

*B8 Cement- en materiaalselectie*

Cementsoorten staan gespecificeerd in de tabel van Appendix C. Cement wordt geselecteerd op basis van selectiecriteria gespecificeerd in [3,4]

*B9 Putontwerp en testprogramma*

Zoals eerder genoemd, wordt er tijdens het boren een verbuizing gecementeerd in het bovenste deel van de Zechstein. Deze is cruciaal voor het controleren van onverwachte overdruksituaties tijdens het boren van de put en wordt daarom ook altijd getest zodat de hoge druk weerstaan kan worden door de opvoerseries.

*B10 Plastische vervorming van de Zechstein zoutlaag zorgt voor een goede afdichting tussen Zechstein formatie en MUST verbuizing*

Het cement rondom de verbuizingsschoen die het dichtst bij het actieve voorkomen gesitueerd is, is ook blootgesteld aan de grootste drukveranderingen en resulterende materiaalspanningen. Als er degradatie optreedt kan gas vanuit het voorkomen langs het cement omhoog stromen. Indien het gedegradeerde cement zich bevindt in de Zechstein formatie, kan het plastisch deformerende zout zich zo vervormen dat gevormde lekpaden weer afgesloten worden.

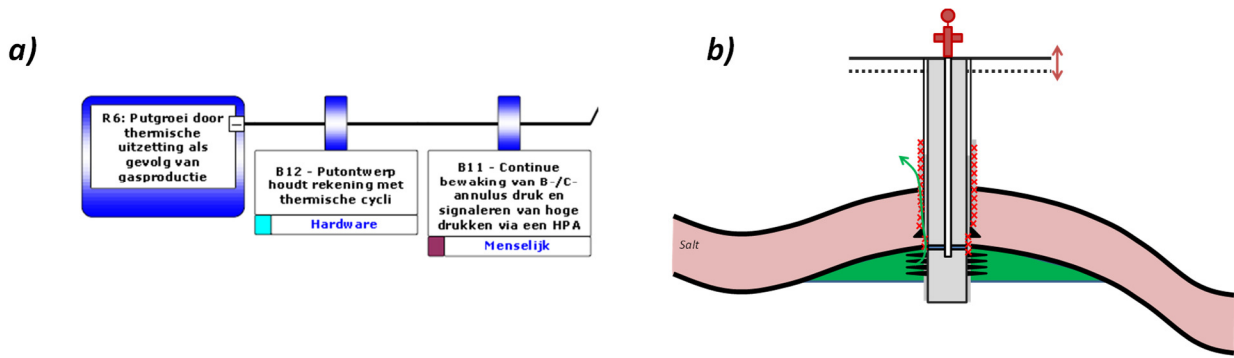
*B11 Continue bewaking van B-/C-annulus druk en signaleren van hoge drukken via een HPA*

In het geval dat het cement van zowel de productieverbuizing als de bovenliggende opvoerseries aangetast is zal gas omhoog kunnen migreren en uiteindelijk in de B- en/of C-annulus terecht kunnen komen. De druk van deze annuli wordt net als de A-annulus bewaakt en er wordt actie ondernomen als deze te hoog is (R1, B3). Een gedetailleerde beschrijving van de acties die genomen worden in het geval van een hoge druk alarm (HPA) staan beschreven in de "Variable Table" voor Norg [5].

## R6: Putgroei door thermische uitzetting als gevolg van gasproductie

Tijdens de productie van warm gas vanuit het voorkomen of tijdens injectie van warm gas zal de temperatuur van de productieverbuizing en de opvoerseries stijgen. Door deze temperatuurstijging zullen de materialen uitzetten en leiden tot zogenaamde putgroei. Dit leidt vervolgens weer tot extra materiaalspanningen in het cement en verbuizing, waardoor vervolgens gas zou kunnen lekken langs de annuli met verzwakt cement naar andere formaties (lekpad achter de productieverbuizingwand).





**Figuur 3.6:** Visualisatie van het risico dat putgroei kan leiden tot verspreiding van stoffen en b) schematische weergave van het verspreiding van stoffen scenario als gevolg van putgroei.

### Barrières:

#### *B12 Putontwerp houdt rekening met thermische cycli*

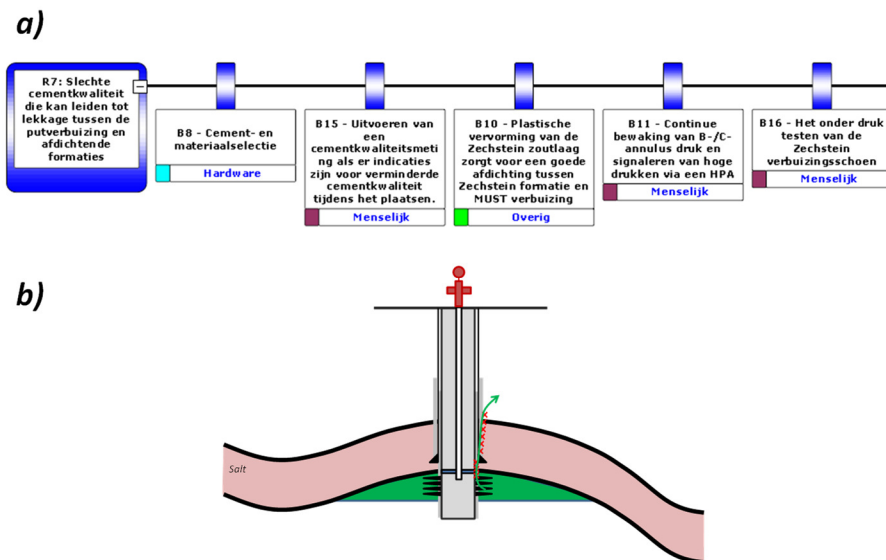
Alle thermische belastingsscenario's worden doorgerekend in de ontwerpfase van de put door middel van computermodellering [2]. Met deze modellen wordt gecontroleerd of het ontwerp van de verbuizing en opvoerseries geschikt is voor zowel injectie- als productiesituaties. Alleen onder extreme omstandigheden zoals bij het doodpompen van een put met koude vloeistof bereiken de materialen spanningswaarden die in de buurt komen van het ontwerpniveau. In het geval van doodpompen met een put is er al sprake van een serieus putincident waarbij naast verspreiding van stoffen de verdere integriteit van de put en het productiesysteem zal worden onderzocht. Dit valt niet onder de vlinderdas analyse voor het risico op verspreiding van stoffen uit het voorkomen.

#### *B11 Continue bewaking van B-/C-annulus druk en signaleren van hoge drukken via een HPA*

In situaties waarin het cement verzwakt geraakt is als gevolg van putgroei zou het mogelijk kunnen zijn dat gas migreert langs het verzwakte cement in de B- en/of C-annulus. De druk van deze annuli wordt net als de A-annulus bewaakt en er wordt actie ondernomen als deze te hoog is (R1, B3) in lijn met de put-integriteitshandleidingen en -standaarden [6]. Een gedetailleerde beschrijving van de acties die ondernomen worden in het geval van een hoge druk alarm (HPA) staan beschreven in de variabele tabel voor Norg [7].

## R7: Slechte cementkwaliteit die kan leiden tot lekkage tussen de putverbuizing en afdichtende formaties

In het algemeen geldt dat de beste cementkwaliteit wordt verkregen in verticale putten in de omgeving van de verbuizingsschoen. De putten in Norg zijn allemaal nagenoeg verticaal of licht wijkend dus een goede cementkwaliteit rondom de schoen kan verwacht worden. Als dit cement niet van goede kwaliteit is of slechter geworden door de cyclische belasting van de materialen door gasopslag operatie zou verspreiding van stoffen kunnen optreden. Gas zou via de cementlekpaden in de B/C annulus of bovenliggende formaties terecht kunnen komen.



**Figuur 3.7:** Visualisatie van het risico dat lage cementkwaliteit zou kunnen leiden tot verspreiding van stoffen en b) schematische weergave van het scenario van verspreiding van stoffen als gevolg van lage cementkwaliteit

### Barrières:

**B8** *Cementontwerp is geoptimaliseerd voor de functionele putspecificaties*

Zie Risico 5.

**B10** *Plastisch vervormingsgedrag van Zechstein zoutlaag vult openingen in cement*

Zie Risico 5. (Micro) kanalen die achterblijven na het pompen van het cement over de Zechstein formatie zullen gevuld worden met zout dat plastisch vervormbaar is onder de heersende drukken in de Zechstein formatie.

**B11** *Continue bewaking van B-/C-annulus druk en signaleren van hoge drukken via een HPA*

Zie R5. Indien gas migreert langs een lekpad achter het cement zal het uiteindelijk terecht kunnen komen in de B- of C-annulus. Op deze annuli zijn drukmeters aangebracht die een hoge druk zullen registreren zodat actie ondernomen kan worden in lijn met de operationele

procedures en de “Well Integrity Management Standard” [6]. Welke actie ondernomen wordt in deze hogedruk situaties staat in detail beschreven in de “Variable Table” voor Norg [7].

*B15 Uitvoeren van een cementkwaliteitsmeting als er indicaties zijn voor verminderde cementkwaliteit tijdens het plaatsen.*

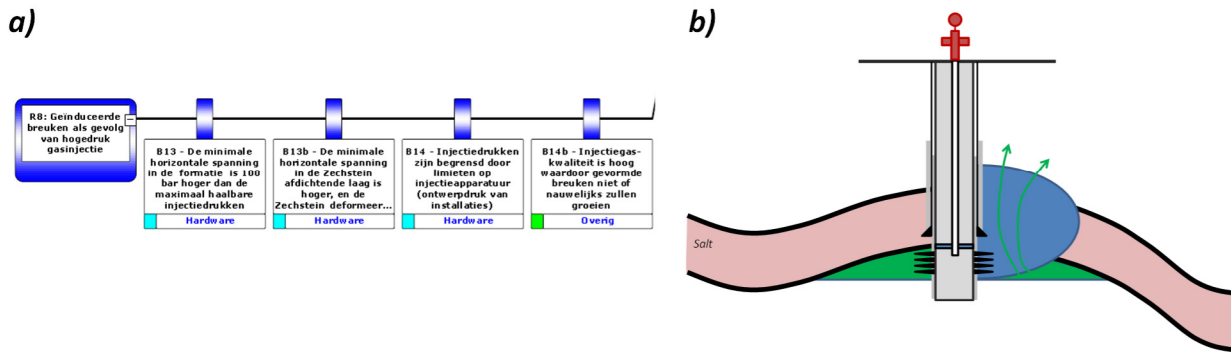
In die gevallen waarin cement gepompt wordt en er zich geen bijzondere situaties voordoen (drukken en volumes volgens verwachting) zal er geen cementkwaliteitsmeting nodig zijn. Situaties waarin dat wel nodig is zijn staan beschreven in de putspecificatie en worden voorafgaand aan het boren vastgesteld.

*B16 Het onder druk testen van de Zechstein verbuizingsschoen*

Zoals eerder uitgelegd onder R5 is een goed cement rondom de Zechstein verbuizingsschoen essentieel voor het opvangen van eventuele onverwachte overdruksituaties die in deze zone voor kunnen komen. Omdat de gelijkwaardige circulatie druk (“ECD”) tijdens het boren van de put altijd hoger is dan de druk die door de productieverbuizing ervaren zal worden, wordt de productieverbuizing verder niet specifiek op druk getest.

## R8: Geïnduceerde breuken als gevolg van hogedruk gasinjectie

Wanneer er gas zou worden geïnjecteerd met een druk die boven de formatiesterkte zou liggen, wat niet het geval is, zou er een mogelijkheid kunnen bestaan dat er breuken worden gevormd. Wanneer deze nieuwgevormde breuken zich bevinden binnen de Rotliegend formatie zouden bevinden zal er geen verspreiding van stoffen plaats vinden. Verspreiding van stoffen zou alleen kunnen optreden als de gevormde breuken zouden doorzetten door de afdichtende laag van het voorkomen, in dit geval de Zechstein formatie. Zoals eerder opgemerkt onder R4 gedraagt de Zechstein zich voornamelijk plastisch en zal daardoor geen breukvorming door deze laag op kunnen treden. De breuk gradiënt in deze formatie is daarnaast ook aanzienlijk hoger dan de gradiënt in het voorkomen (Rotliegend) [ref.8] waardoor breuken niet geïnitieerd kunnen worden. De kwaliteit van het injectiegas is hoog (geen water, geen gesuspendeerde vaste stoffen) waardoor bij de toegepaste injectiedrukken eventuele geïnduceerde breuken niet verder kunnen groeien. Verder is de dikte van de Zechstein formatie meer dan 200 meter (Appendix D) waarmee de kans dat een breuk door de gehele formatie kan doorzetten nihil is.



**Figuur 3.8:** Visualisatie van het risico dat gevormde breuken door hogedruk injectie kunnen leiden tot verspreiding van stoffen en b) schematische weergave waarin geïnduceerde breuken door de afdichtende laag leiden tot verspreiding van stoffen.

### Barrières:

#### *B13 De minimale horizontale spanning in de formatie is 100 bar hoger dan de maximaal haalbare injectiedrukken*

Voor zowel de Ten Boer als de Slochteren formaties is de minimale horizontale spanning bepaald door middel van lektesten op 459 barg [8]. Op basis van reservoirmodellen die gekalibreerd zijn aan historische data kan geconcludeerd worden dat de maximale poriedruk niet hoger geweest is dan 360 bar. Hiermee is dus een veiligheidsmarge van 100 bar aanwezig tussen de maximale poriedruk als gevolg van injectie en de druk waarbij de eerste breuken geïnduceerd zouden worden. De ondergrondse putdrukken (de hoogste drukken die ergens in de opslaglocatie voor kunnen komen) zijn weergegeven in Appendix E.

#### *B13b De minimale horizontale spanning in de Zechsteen afdichtende laag is hoger, en de Zechsteen deformeert plastisch*

De Zechsteen afdichtende laag heeft een hogere minimale horizontale spanning [8] waardoor het creëren van breuken in deze formatie nog onwaarschijnlijker is dan in de Rotliggend formatie beschreven onder B13. Verder zal de Zechsteen geen breuken doorzetten omdat deze formatie plastisch deformeert onder de geldende temperatuur en drukken op de diepte van deze formatie.

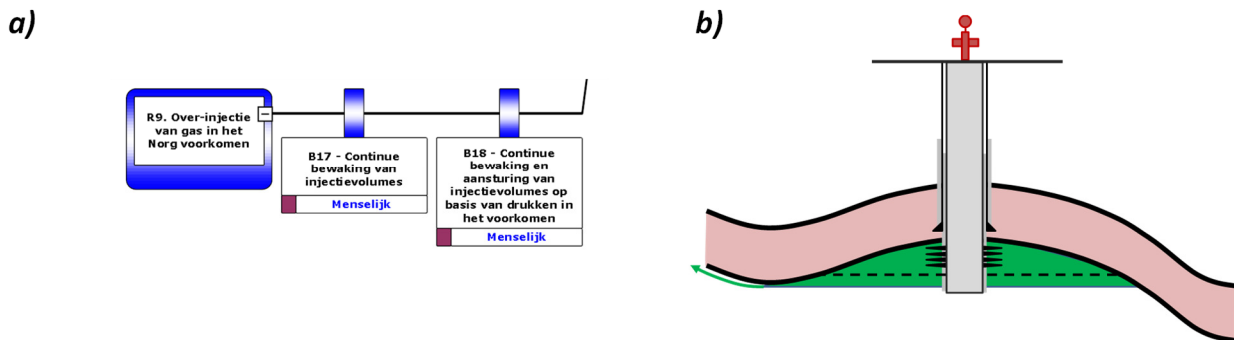
#### *B14 Injectiedrukken zijn begrensd door limieten op injectieapparatuur (ontwerpdruk van installaties)*

De maximale compressoruitlaatdruk van de tweede compressietrap is 315 bar. Dit is de hoogste druk die aan de oppervlakte behaald kan worden en zorgt ervoor dat de druk waarbij breuken gevormd kunnen worden technisch niet overschreden kan worden. Verder is er een hogedruk alarm als op enige wijze de druk boven deze maximale druk uit zou komen. De maximale druk die in de installatie gehaald kan worden wordt beperkt door de compressoren die geïnstalleerd zijn.

*B14b Injectiegaskwaliteit is hoog waardoor gevormde breuken niet of nauwelijks zullen groeien*  
 In het geval dat er toch een breuk zal vormen hangt de groei van een dergelijke breuk af van de kwaliteit van de injectievloeistof. Aangezien deze uit droog gas bestaat waarin geen gesuspendeerde vaste stoffen aanwezig zijn zal een gevormde breuk niet of nauwelijks groeien.

## R9: Over-injectie van gas in het Norg voorkomen

Gas is geïnjecteerd in de periode van opnieuw vullen van het Norg voorkomen (1997-2000) en daarna tijdens het gebruik van het voorkomen als gasopslag. Als deze hoeveelheden gas te groot zouden zijn of als het opslagvolume verkleind zou zijn door hysteresis zou over-injectie mogelijk kunnen zijn. Als gevolg van over-injectie stroomt gas vanuit het voorkomen naar nabijgelegen velden en zal niet meer teruggeproduceerd kunnen worden in de fase van uiteindelijke depletie. Hierdoor zou gas verloren worden met duidelijke economische consequenties, maar zonder dat dit verdere gevaren oplevert.



**Figuur 3.9:** Visualisatie van het risico op verspreiding van stoffen als gevolg van overinjectie en b) een schematische weergave van het scenario dat overvulling van het voorkomen leidt tot verspreiding van stoffen.

### Barrières:

#### *B17 Continue bewaking van injectievolumes*

Tijdens de hervullingsfase en tijdens het gebruik van het Norg voorkomen als gasopslagveld is het vulniveau (“voidage”) altijd gehandhaafd op 1 a 2 miljard kubieke meter. Met andere woorden, op enig moment in het gebruik van het Norg voorkomen als ondergrondse gasopslag is er altijd 1-2 miljard kubieke meter minder gas aanwezig vergeleken met het volume dat origineel aanwezig was in het voorkomen (voor 1983). Hiermee wordt een ruime veiligheidsmarge aangehouden om lekkage naar buurblokken te voorkomen.

#### *B18 Continue bewaking en aansturing van injectievolumes op basis van drukken in het voorkomen*

Voor het Norg voorkomen is een maximale druk bepaald waar beneden het voorkomen gebruikt moet worden. De maximale gemiddelde velddruk blijft ten allen tijden beneden de initiële druk van het voorkomen (327 bar). Hierdoor kan de gaskolom nooit hoger worden dan de initiële gas kolom. Voor Blok 2 geldt een hogere maximale druk (347 bar) om de dynamische effecten van injectie te kunnen accommoderen (alle injectie vindt plaats in Blok 2 dat daardoor een hogere druk heeft dan de gemiddelde reservoirdruk). Er bevindt zich echter geen lekpunt in Blok 2 waardoor dit niet kan leiden tot over-injectie en verlies van gas naar naastgelegen blokken. Meer details voor het volume dat beschikbaar is voordat over-injectie optreedt staan beschreven in Consequentie 5 in hoofdstuk 5.

### Additionele risico's met een zeer lage waarschijnlijkheid of effect die daarom niet opgenomen in de vlinderdas analyse

In de vlinderdas analyse zijn nog drie risico's geïdentificeerd die niet meegenomen zijn in verdere analyses en die gezien de lage waarschijnlijkheid niet als risico gezien worden.

#### **R10 Injectie Joule-Thompson afkoeling of overige temperatuur effecten**

Als gevolg van de drukval tussen de put op reservoirdiepte en de gemiddelde druk in het voorkomen vindt er afkoeling plaats door het "Joule Thompson effect". Hierdoor zou cement extra verzwakt kunnen raken en de minimale horizontale spanning in de formatie kunnen worden verlaagd. Aangezien de maximale drukval van put naar voorkomen druk niet meer bedraagt dan 50 bar zal dit temperatuureffect niet groter zijn dan 20 °C. Dit vormt geen risico voor aantasting van cement of minimale horizontale spanning en is daarom niet verder meegenomen in de vlinderdas analyse.

Andere en mogelijk grotere temperatuureffecten zouden kunnen optreden als gevolg van injectie van koud of heet gas. De injectiegasbehandelingsinstallatie is ontworpen om het gas op een temperatuur vlak bij de temperatuur (90°C) in het voorkomen te injecteren (99°C). De operationele procedures beschrijven wanneer de temperatuur niet meer acceptabel is voor injectie als:

- De gas temperatuur aan de oppervlakte beneden 80°C komt
- De gas temperatuur aan de oppervlakte boven de 125°C komt

De injectie zal onmiddellijk gestopt worden wanneer de temperatuur van het gas buiten dit temperatuurbereik valt. Daarnaast gelden nog de volgende extra maatregelen voor hoge temperaturen:

- Stop injectie als de temperatuur boven langer dan 4 uur boven de 105°C komt
- Stop injectie als het daggemiddelde van de temperatuur boven de 100°C komt.

#### **R11 Aanwezigheid van natuurlijke lekkende breuken in de nabijheid van de opslaglocatie**

De gehele Rotliegend formatie is overdekt met een dikke laag Zechstein zout (>200 m, zie R4, B7). Aangezien de zoutformatie onder de geldende druk en temperatuur condities plastisch

vervormbaar is zal ieder breuk in deze formatie snel weer gesloten worden. Appendix D geeft een doorsnede van de ondergrond rondom het Norg voorkomen de dikke laag Zechstein zout getoond wordt.

#### **R12    Lekkage door de bovenste afdichtende formatie**

De afdichtende formatie over de Rotliegend formatie heeft bewezen een effectieve afdichtende laag te zijn op geologische tijdschaal. Het is daarom zeer onwaarschijnlijk dat natuurlijke lekkage door deze afdichtende laag op dit moment zal plaatsvinden of op enige wijze waarneembaar zou zijn.

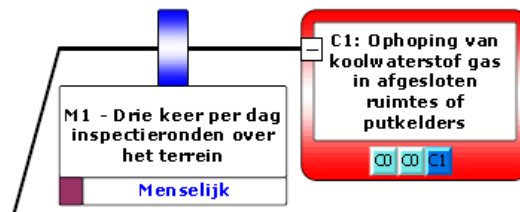
## 4: Consequenties

De consequenties van een mogelijke verspreiding van stoffen kunnen onderverdeeld worden in drie belangrijke categorieën: 1) gas verschijnt aan de oppervlakte en kan zich accumuleren in afgesloten ruimten of putkelders, 2) accumuleren van gas in formaties anders dan het Norg voorkomen en 3) het verlies van gas vanuit het Norg voorkomen naar naastgelegen blokken. Deze laatste vorm van verspreiding van stoffen leidt niet direct tot schade aan personen of infrastructuur, maar zal alleen economische schade veroorzaken. De accumulatie van gas in ondergrondse formaties anders dan het Norg voorkomen is weer onderverdeeld in 2 categorieën: vervuiling van grondwatervoerende lagen en het vormen van secundaire voorkomens als gevolg van lekkage vanuit het primaire Norg voorkomen. De waarschijnlijkheid en de gevolgen van iedere consequentie zijn geclassificeerd volgens de RAM-methodologie die in detail beschreven staat in Appendix G en [9].

### C1: Accumulatie van koolwaterstof gas in afgesloten ruimtes of putkelders

In een scenario waarin koolwaterstofgassen onder druk omhoog migreren in de nabijheid van de injectie- en productieputten, kan dit leiden tot accumulatie van het gas in laag gelegen of afgesloten gebieden, zoals kelders nabij de putten. Het opgehoopte gas kan leiden tot explosiegevaar of verstikking als het niet tijdig wordt opgemerkt of gemitigeerd.

Consequentie classificatie (Mens = C0; Installatie = C0; Milieu = C1)



**Figuur 4.1:** Visualisatie van de consequentie van gasaccumulatie in laaggelegen gebieden of afgesloten ruimten als gevolg van verspreiding van stoffen.

#### Mitigerende maatregelen:

##### *M1 Inspectieronden over het terrein*

Er worden regelmatig inspectieronden uitgevoerd over het Norg gasopslag installatie terrein. Hierbij wordt onder andere gekeken naar de aanwezigheid van borrelende verbuizing wat een indicatie van verspreiding van stoffen zou kunnen zijn. Verder zullen afgesloten ruimten niet betreden worden zonder eerst een gastest uit te voeren en moet een werkvergunning verkregen worden voordat er werkzaamheden in deze ruimten kunnen plaatsvinden.



## C2: Accumulatie van koolwaterstofgas in ondiepe formaties (minder dan 50 meter) – mogelijke oorzaak van grondwatervervuiling

In de ondiepe ondergrond zal koolwaterstofgas vooral ingevangen worden door capillaire krachten in het poreuze gesteente. Op deze diepten worden over het algemeen geen structuren gevonden waarin gas zich verder zou kunnen accumuleren. Daarom zijn de hoeveelheden gas klein en de druk in het gas laag. Kleine hoeveelheden gas zouden door de ondergrond bewogen kunnen worden als gevolg van bijvoorbeeld grondwaterwinning.

Consequentie classificatie (Mens = C0; Installatie = C0; Milieu = B2)



**Figuur 4.2:** Visualisatie van de consequentie van de verspreiding van stoffen dat leidt tot de accumulatie van gas in ondiepe formaties die bijvoorbeeld gebruikt worden voor grondwaterwinning.

## C3: Accumulatie van koolwaterstofgas in formaties op “gemiddelde diepte” (minder dan 1000 meter diep) – mogelijk risico voor boringen inclusief geothermische putten

Op dieptes groter dan de dieptes genoemd onder C2 bestaat de mogelijkheid dat formaties structuren kunnen hebben waarin gas zich op kan hopen. In zulke “secundaire voorkomens” is de gasdruk hoger dan de hydrostatische druk. Deze gasaccumulaties kunnen een risico vormen voor toekomstige booractiviteiten. Mogelijk wordt in de toekomst ook voor geothermische toepassingen naar deze dieptes geboord en is kennis van deze risico’s nodig. Voor het boren van putten naar deze diepten zullen deze accumulaties geen extra risico’s vormen bovenop bestaande gasaccumulaties die voor kunnen komen in deze formaties. Tijdens het boren wordt in lijn met geldende normen en standaarden voor het boren van putten gekozen voor een juiste boorvloei stof dichtheid en gas expulsie controlemethoden. Het vormen van dergelijke secundaire accumulaties is voorgekomen in de industrie.

Consequentie classificatie (Mens = B4; Installatie = B5; Milieu = B2). Opmerking: de classificatie van deze consequenties is gebaseerd op het uiteindelijk ergste scenario dat een onverwachte overdruksituatie zou leiden tot een “blow-out” en niet per definitie aan de consequentie van een secundaire gas accumulatie.



**Figuur 5.3:** Visualisatie van de consequentie van verspreiding van stoffen vanuit het voorkomen dat resulteert in de vorming van een secundaire accumulatie

#### C4: Voorkomens van koolwaterstofgas in diepere delen van de Zechstein formatie – die kunnen leiden tot een overdruksituatie tijdens het boren van diepe putten

Vergelijkbaar aan de accumulatie van hoge druk gas op gemiddelde dieptes (tot 1000 meter) is het ook mogelijk dat gas zich ophoopt op nog diepere niveaus. Zeker in accumulaties die zich aan de basis van het Zechstein bevinden, de zogenaamde Basale Zechstein Carbonaten (Z1 en Z2) is de kans reëel dat deze in drukcommunicatie zijn met het Norg Rotliggend voorkomen. Het risico van hoge druk accumulaties op deze diepte binnen het Zechstein is bekend in de industrie en alle voorzorgsmaatregelen worden hiervoor in acht genomen worden (in lijn met alle overige booractiviteiten op deze dieptes). Anders dan dit risico voor het boren van putten op deze dieptes vormt de aanwezigheid van gas onder hoge druk hier geen risico.



**Figuur 5.4:** Visualisatie van de consequentie van verspreiding van putten waarbij basale Zechstein carbonaatvoorkomens gevuld kunnen worden met gas vanuit het Norg voorkomen.

Consequentie classificatie (Mens = C4; Installatie = C5; Milieu = C2). Opmerking: de classificatie van deze

consequenties is gebaseerd op het uiteindelijk ergste scenario dat een onverwachte gas expulsie zou leiden tot een “blowout” en niet per definitie aan de consequentie van een secundaire gas accumulatie. Echter zijn dit soort consequenties voorgekomen in de industrie bij het boren naar deze diepten.

### C5: Weglekken van koolwaterstof gas uit het voorkomen (economische consequentie)

Op basis van alle petrofysische en geofysische interpretaties is het Norg voorkomen niet gevuld tot aan het lekpunt (“*spill point*” – de diepte waarop gas vanuit de Norg structuur naar naastgelegen blokken zou kunnen migreren). Het vullen van een geologische structuur vindt plaats onder bepaalde grenscondities zoals de druk waarbij het gas water contact (GWC) uiteindelijk in balans is. Als gevolg van tektonische activiteit en het vervolgens omhoog brengen van het voorkomen zal het GWC zich bewegen om uiteindelijk weer in evenwicht te komen in de nieuwe druksituatie. Dit soort paleocontacten zijn vaker geïdentificeerd in de Rotliegend voorkomens in Noord-Nederland.

Het meest ondiepe lekpunt is vastgesteld in het noorden van Blok 4 – Nieuw Roden op een diepte van 2879 meter TVNAP. Het GWC contact nabij dit lekpunt is gevonden op 2860 meter TVNAP. Dit verschil van 19 meter correspondeert met een gasvolume onder standaard condities van 20 miljard m<sup>3</sup>. Met andere woorden, het GWC bereikt het lekpunt op het moment dat er 20 miljard m<sup>3</sup> aan gas teruggeïnjecteerd wordt bovenop het originele gasvolume van het voorkomen. Op basis van experimentele data is vastgesteld dat gas pas mobiel is boven een gassaturatie van 27%. In een conservatieve benadering zou het lekpunt bereikt kunnen worden na injectie van ongeveer 5 miljard m<sup>3</sup>. Daarnaast wordt het Norg voorkomen ook nog geopereerd rondom een vulniveau dat meer dan 1 BCM lager ligt dan het originele vulniveau. Appendix F toont een grafiek van porievolume tegen diepte plot waarop bovenstaande analyse gebaseerd is. Deze relatie is verkregen uit het Norg statische model. Gas dat desondanks via het lekpunt het voorkomen zou verlaten zal in het meest nabijgelegen voorkomen worden opgevangen.

Consequentie classificatie (Mens = B0; Installatie = B5; Milieu = B0). Opmerking: deze consequentie zal pas een effect hebben tijdens de productiefase van het Norg voorkomen en niet tijdens opslag operatie.



**Figuur 5.5:** Visualisatie van de consequentie van verspreiding van stoffen waarbij gas het Norg voorkomen verlaat langs het lekpunt en leidt tot niet meer terug te produceren volumes tijdens leegproductie van het veld.

Mitigerende maatregelen:

## *M2 Continue bewaking van de vulniveaus en drukken*

Injectie- en productievolumes worden continue gemeten en maandelijks verwerkt in het dynamische model van het Norg voorkomen. Het veld wordt altijd gebruikt rondom een vulniveau dat lager ligt dan het initiële vulniveau (>1 miljard m<sup>3</sup> minder dan gas initieel aanwezig). Systematische verliezen vanuit het Norg voorkomen zullen dan ook herkend worden als drukken en productie- en injectievolumes door het model aan elkaar gekoppeld worden. Op dat moment kan een nieuw vulvolume worden bepaald waarbij geen verliezen meer optreden.

## 5: Overige veranderingen aan het voorkomen

Als gevolg van het gebruik van het Norg voorkomen als gas producerend veld (voor 1997) en als ondergrondse gasopslag (na 1997) zijn er een aantal veranderingen aan het voorkomen opgetreden die weinig of niets te maken hebben met het risico op verspreiding van stoffen en de consequenties die hiervoor zijn besproken. Deze zijn dus ook niet opgenomen in de vlinderdasanalyse, maar worden hieronder voor de volledigheid wel besproken. De veranderingen zijn:

- Zandproductie
- Poro-elastische spanningsverlaging en/of breukvorming als gevolg van cyclische belasting
- Vorming van H<sub>2</sub>S
- Compositionele veranderingen van het gas in het voorkomen.

### Zandproductie:

Gasproductie in combinatie met lokaal ongeconsolideerde porie/korrel structuur van het Rotliegend kan leiden tot zandproductie. Zandproductielimieten worden gedicteerd door beperkingen in de gasbehandelingsinstallatie (pijplijnen, vaten, filters, etc.) en de verbruizing. Daarom worden alle putten continue bewaakt op de aanwezigheid van zand en wordt zandproductie gemeten. De hoeveelheid zand die wordt geproduceerd is zeer beperkt.

### Verlagen van formatiespanning of geïnduceerde breuken binnen het producerende voorkomen

In eerdere hoofdstukken is het genereren en voortzetten van breuken in detail behandeld. Hierbij is aangegeven dat het mogelijk is dat (kleine) breuken binnen het gedefinieerde gebied van het Norg voorkomen kunnen ontstaan, maar dat deze niet zullen leiden tot verspreiding van stoffen. In sectie R3/T8 is beschreven dat het risico op het ontstaan van breuken in de richting van minimale horizontale spanning, en als gevolg van gasinjectie, klein is. Daarnaast is het mogelijk dat door de cyclische belasting de gesteentesterkte lokaal wat af zou kunnen nemen [ref. 10]. Zelfs als de minimale stress verlaagd is door injectie en productie, zal deze nog steeds hoger zijn dan de maximale druk die gezien wordt rondom de put. Verder is de zuiverheid van de stoffen die geïnjecteerd worden (droog gas, lage viscositeit, geen gesuspenderde vaste stoffen) zeer hoog hetgeen breukgroei tot een minimum beperkt of zelfs volledig voorkomt. In gevallen dat (kleine) breuken zouden ontstaan zullen deze nog steeds beperkt worden tot het volume binnen het Norg voorkomen en zich niet voortplanten door het Zechstein zout.

### Vorming van zwaveldioxide (H<sub>2</sub>S)

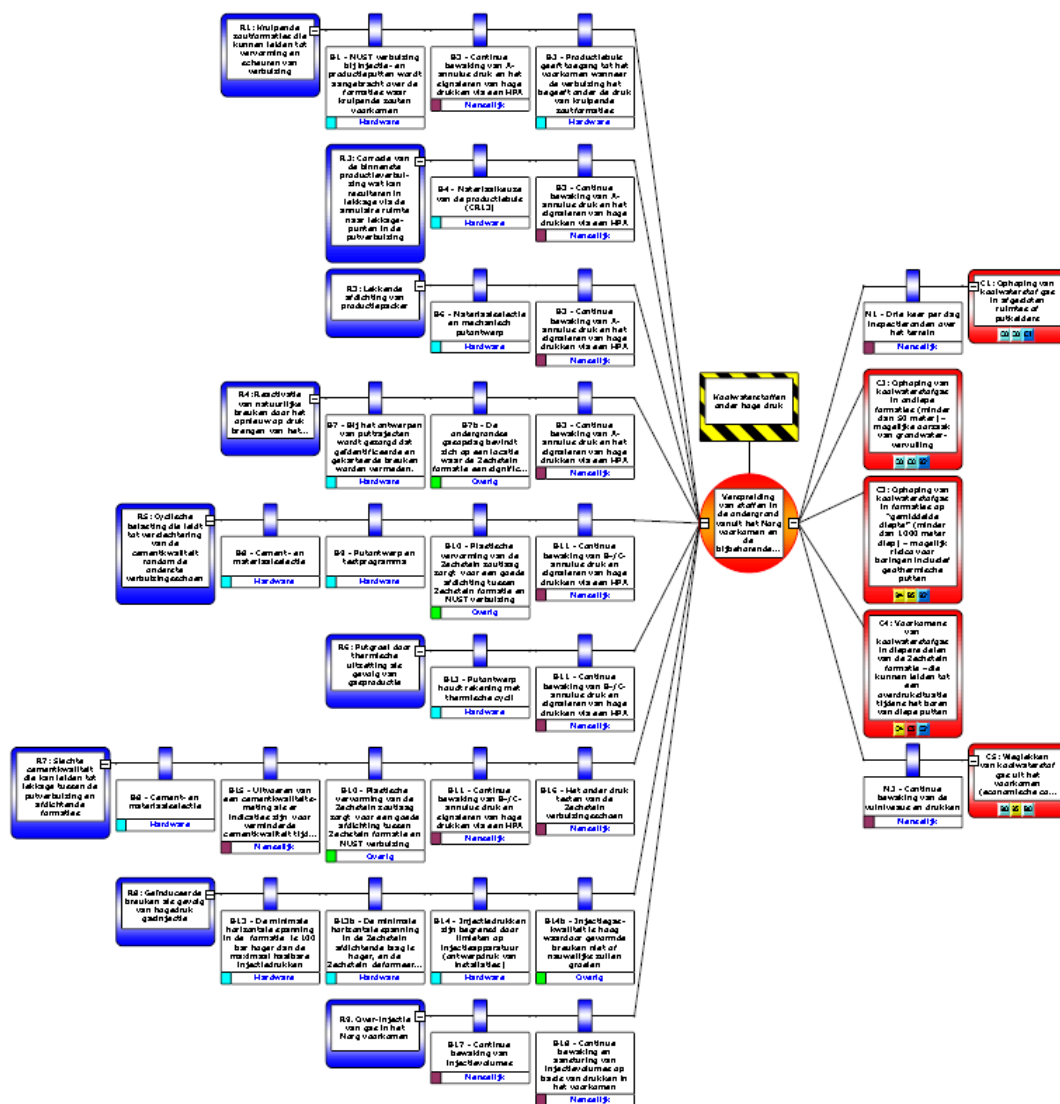
Het Norg voorkomen bevat van origine gas met een niet-meetbaar lage H<sub>2</sub>S concentratie. Het is bekend in de industrie dat H<sub>2</sub>S kan ontstaan als gevolg van biologische activiteit of hoge temperaturen (geochemisch). Voor biologisch gevormd H<sub>2</sub>S gas is er altijd een bron van sulfaat nodig hetgeen vaak voorkomt bij waterinjectie projecten in olievelden. Het verwijderen van sulfaat uit het injectiewater wordt hierbij vaak gezien als de meest effectieve barrière tegen H<sub>2</sub>S vorming. Aangezien de stoffen die geïnjecteerd worden in het Norg voorkomen vrij zijn van enige vorm van water of sulfaat, kan ook geen omzetting naar H<sub>2</sub>S plaatsvinden. H<sub>2</sub>S kan verder ook ontstaan als hete vloeistoffen of gassen worden geïnjecteerd waarbij zwavelhoudende componenten direct in H<sub>2</sub>S worden omgezet. Dit gebeurt over het algemeen pas bij temperaturen boven de 140 °C. Deze temperaturen kunnen door injectie met de Norg injectieinstallatie niet bereikt worden (maximaal 100 °C – Zie R3-T9).

Een andere manier om H<sub>2</sub>S in het Norg voorkomen te introduceren is via directe injectie van H<sub>2</sub>S. Over het algemeen wordt gas vanuit het Groningen veld gecomprimeerd en geïnjecteerd en hierin wordt geen H<sub>2</sub>S aangetroffen. Als echter gas vanuit het hoog-calorische net na bijmenging met stikstof in Norg wordt geïnjecteerd, bestaat de mogelijkheid dat hierin kleine hoeveelheden H<sub>2</sub>S worden aangetroffen. Dit zal geen effect hebben op de Rotliegend formatie; het is zelfs goed mogelijk dat de ijzerrijke mineralen van het Rotliegend het H<sub>2</sub>S zullen binden tot een vaste stof (ijzersulfide). H<sub>2</sub>S zal voornamelijk een zorg vormen voor de gasbehandelingsinstallatie waarin gas zou kunnen accumuleren in de absorptiekolommen. In afgelopen 20 jaar waarin Norg gebruikt is als gasopslag locatie zijn geen aanwijzingen voor H<sub>2</sub>S injectie of productie aangetroffen.

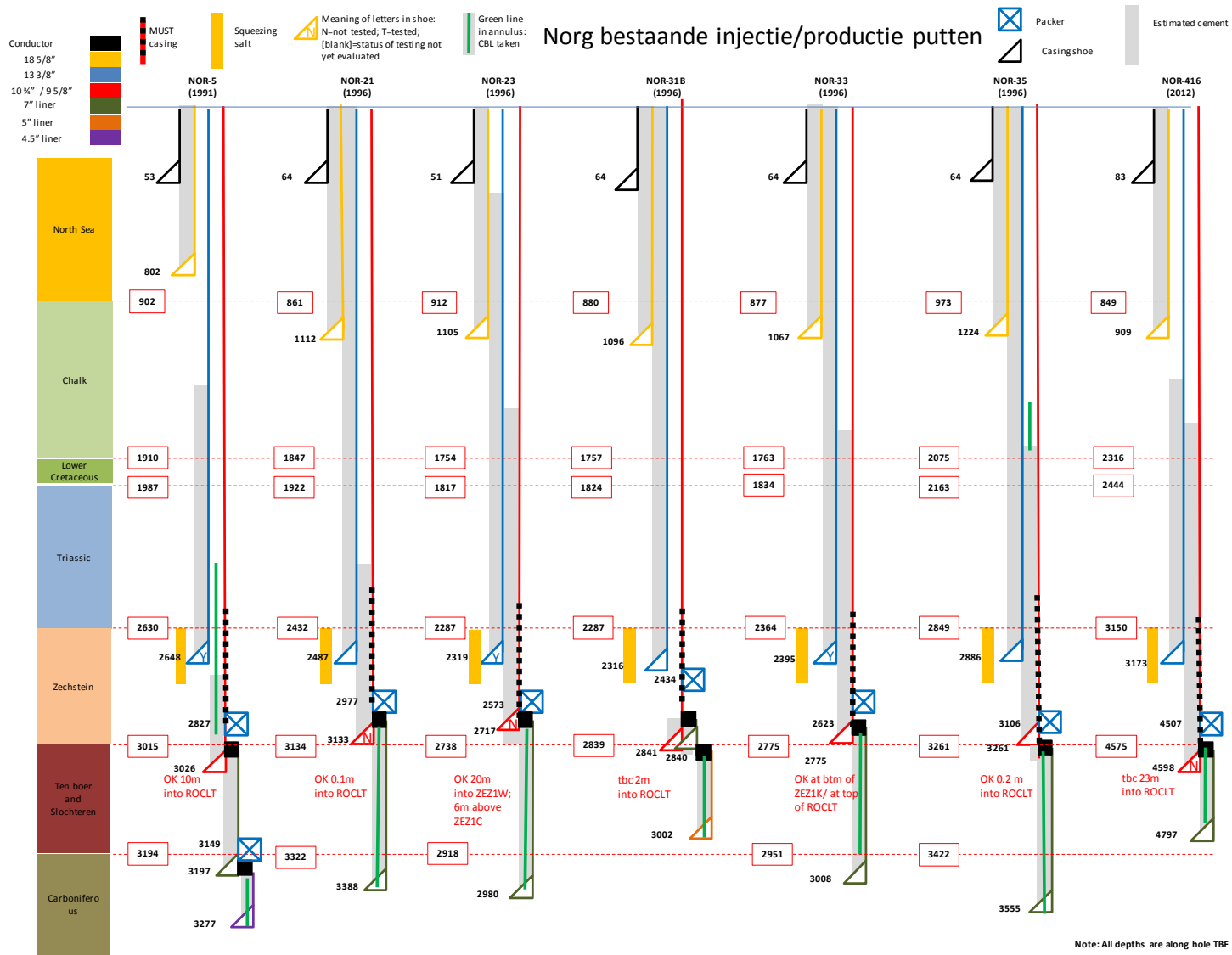
### Verandering van de compositie van het koolwaterstofgas in het voorkomen

Het Norg voorkomen was origineel gevuld met ongeveer 28 miljard m<sup>3</sup> aan hoogcalorisch gas [11]. Na de depletiefase (1983-1997) is het voorkomen weer gevuld door de injectie van Groningen gas (laagcalorisch). Als gevolg van deze hervulfase, en aansluitend het gebruik van het Norg veld als gasopslaglocatie, is een deel van het hoogcalorische gas vervangen door laagcalorisch gas. Dit heeft geen invloed op het voorkomen anders dan dat het injectie gas iets minder samendrukbaar is dan het origineel aanwezige gas. Als gevolg hiervan kan het veld ongeveer 1% minder gas bevatten als het veld na gebruik als opslagveld hypothetisch weer gevuld zou worden tot initiële druk.

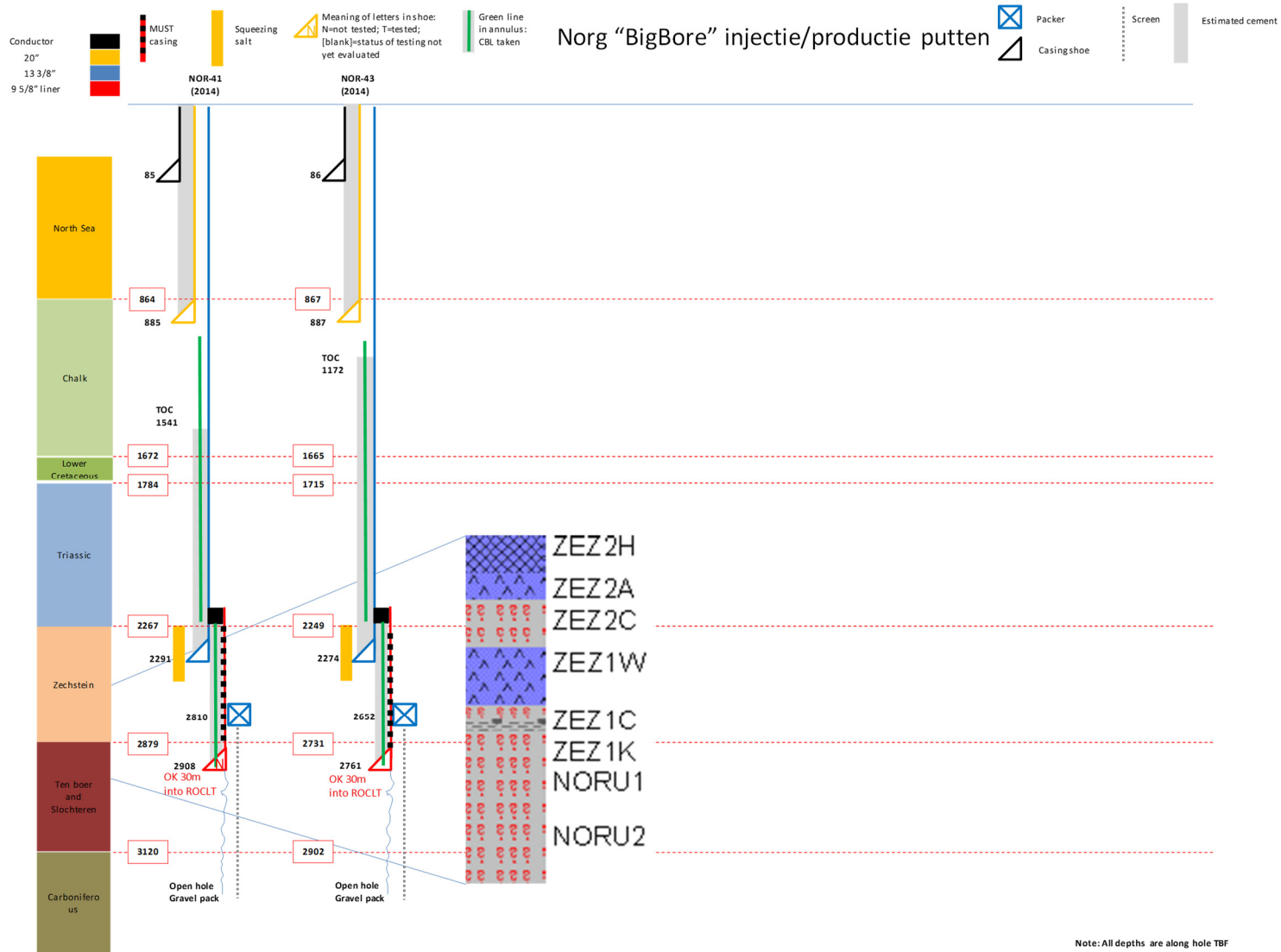
## Appendix A: Vlinderdas analyseresultaat voor de risico's en consequenties van verspreiding van stoffen van het Norg voorkomen



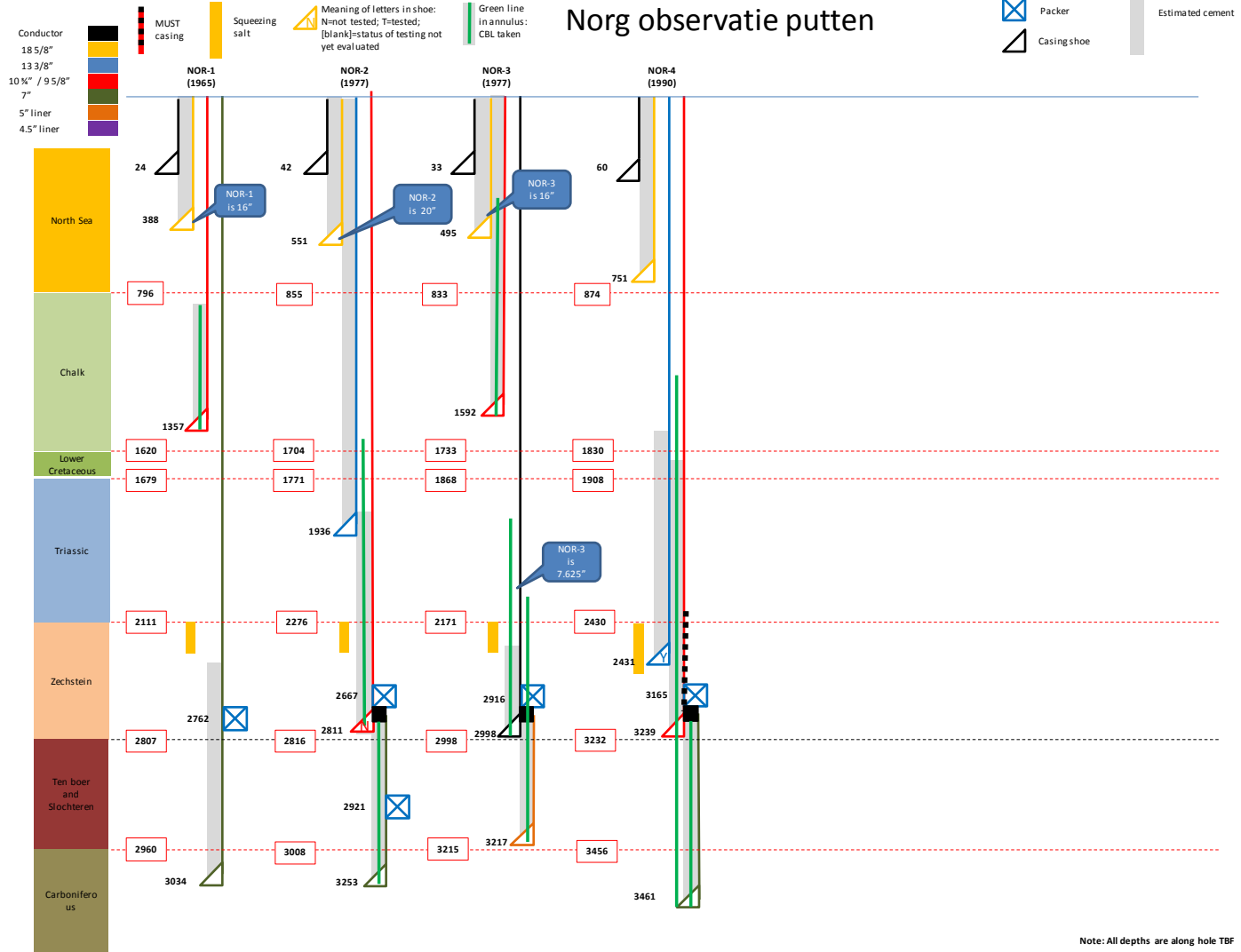
**Appendix B:** Schematische put diagram van de Norg putten. Opmerking: deze put diagrammen zijn indicatief en geschikt voor gebruik in het kader van de vlinderdasanalyse. Voor gedetailleerde schema's dient de NAM put database geraadpleegd te worden en er zouden kleine verschillen in exacte dieptes of put specificatie kunnen zijn.







# Norg observatie putten



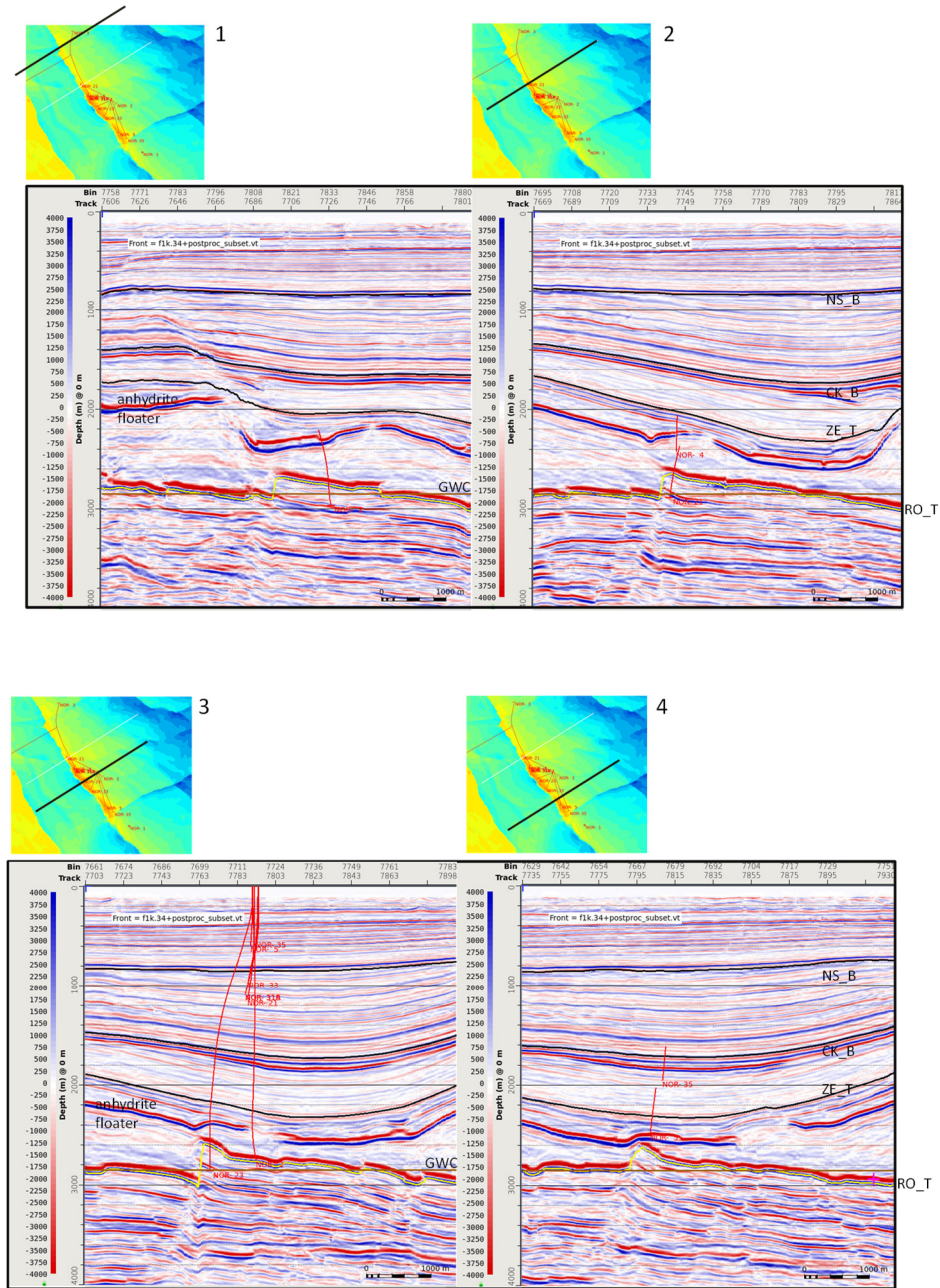
## Appendix C: Overzicht van gebruikt cement en uitgevoerde integriteitstesten

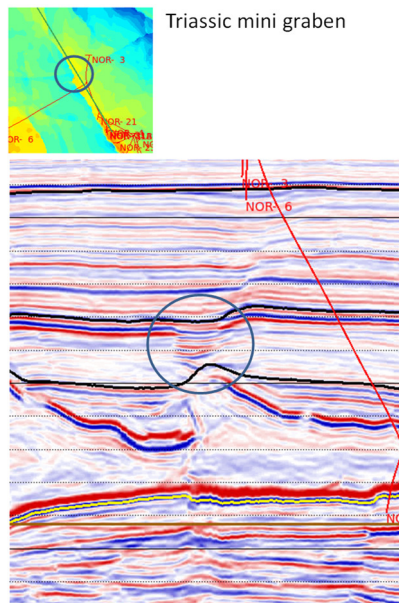
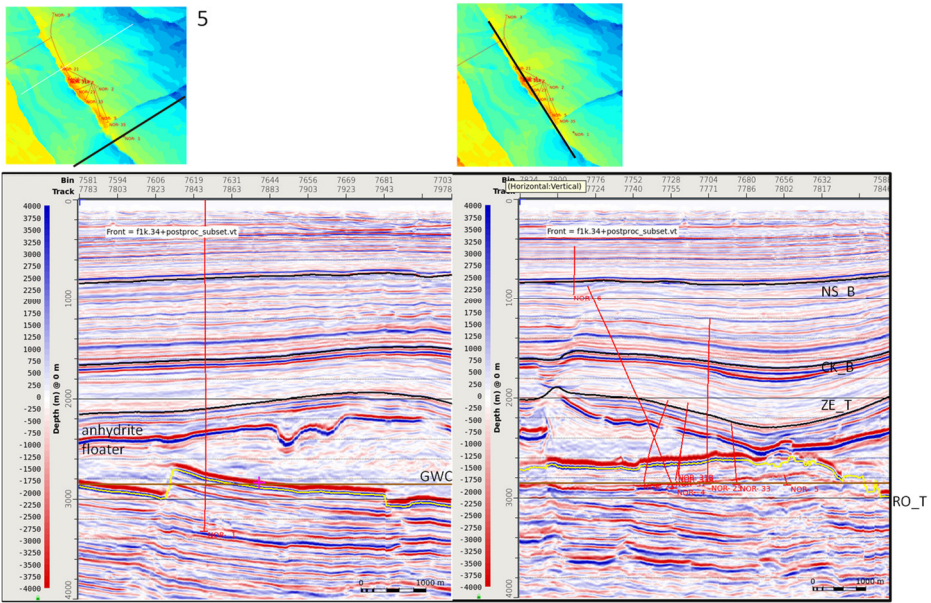
Production casing cementation							CBL/ equivalent, <u>all</u> casings		
Well	Date	Top AH BF	Bottom AH BF	Dens. (kg/m3)	Cement/Mudtype	Title	Publish Date	Company Tag	
Norg-1	Observation	22/okt/65	2254.28	3034.28	1949.57	Dyckerhoff II	<a href="#">CBL_20OCT65_895-1365M</a>	20/Oct/1965	OFDB_NL:32841/43
Norg-2	Observation	28/apr/77	1843.40	2570.00	1650.00	Class E	<a href="#">CBL_16MAY77_2760-3240M</a>	16/May/1977	OFDB_NL:32906/25
Norg-2		28/apr/77	2570.00	2811.91	1999.90	Class D	<a href="#">CBL_10MAY77_1650-2823M</a>	10/May/1977	OFDB_NL:32906/52
Norg-3	Observation	17/nov/77	2250.00	2998.74	1640.42	Class D	<a href="#">ACBL_28NOV77_2100-3204M</a>	28/Nov/1977	OFDB_NL:32992/22
Norg-3							<a href="#">ACBL_VDL_23NOV77_1950-3006M</a>	23/Nov/1977	OFDB_NL:32992/52
Norg-3							<a href="#">ACBL_VDL_11NOV77_340-1599M</a>	11/Nov/1977	OFDB_NL:32992/73
Norg-4	Observation	19/sep/90	1859.89	3239.04	1930.40	Class G	<a href="#">CET_01.TIF_3160-3467M</a>	09/Oct/1990	OFDB_NL:33070/19
Norg-4							<a href="#">CBL_VDL_09OCT90_1490-3460M</a>	09/Oct/1990	OFDB_NL:33070/22
Norg-5	Prod + Inj.	17/mei/91	2653.00	3025.80	1919.61	Class G	<a href="#">ACBL_VDL_13JUN91_3195-3278M</a>	13/Jun/1991	OFDB_NL:33111/163
Norg-5							<a href="#">ACBL_VDL_07JUN91_2267-2969M</a>	07/Jun/1991	OFDB_NL:33111/160
Norg-21	Prod + Inj.	13/apr/96	2250.41	3133.51	1910.03	Class G			
Norg-23	Prod + Inj.	7/feb/96	2069.33	2717.35	1919.61	Class G			
Norg-31B	Prod + Inj.	26/sep/96	2582.56	2841.42	1900.44	Class G			
Norg-33	Prod + Inj.	27/jul/96	1657.40	2775.39	1900.44	Class G			
Norg-35	Prod + Inj.	13/jun/96	1980.40	3261.57	1900.44	Class G	<a href="#">TOC_LSS_20JUN96_1955-1999M</a>	20/Jun/1996	OFDB_NL:33271/34
Norg-41	Prod + Inj.	7/mrt/14	1540.68	2092.18	1670.32	Pozzocemoil	<a href="#">CBL_VDL_GR_14MAY14_2220-2918M</a>	14/May/2014	OFDB_NL:55788/10
Norg-41		7/mrt/14	2092.18	2294.68	2145.77	Class G + 35% Silica	<a href="#">IBC_CBL_GR_14MAY14_935-2234M</a>	14/May/2014	OFDB_NL:55788/13
Norg-43	Prod + Inj.	24/feb/14	1171.99	1990.68	1670.37	Pozzocemoil	<a href="#">USIT_12APR14_1100-2229M</a>	12/Apr/2014	OFDB_NL:55741/19
Norg-43		24/feb/14	1990.68	2273.97	1919.61	Dyckerhoff G +35% Silica	<a href="#">CBL_12APR14_1100-2229M</a>	12/Apr/2014	OFDB_NL:55741/10
Norg-43							<a href="#">CBL_VDL_06APR14_890-2229M</a>	06/Apr/2014	OFDB_NL:55741/16
Norg-43							<a href="#">CBL_VDL_05APR14_2229-2738M</a>	05/Apr/2014	OFDB_NL:55741/13
Norg-416	Prod + Inj.	11/aug/12	2190.12	4604.12	1410.35	G+60% Silica & Cement	<a href="#">CBL_VDL_CCL_21NOV12_4545.4-4763M</a>	21/Nov/2012	OFDB_NL:54534/37

Note: Top of Cement is mostly based on modelling, and as assumptions cannot always be verified, ToC values have some uncertainty

## Appendix D: Dikte van Zechstein afdichtende laag (cap rock).

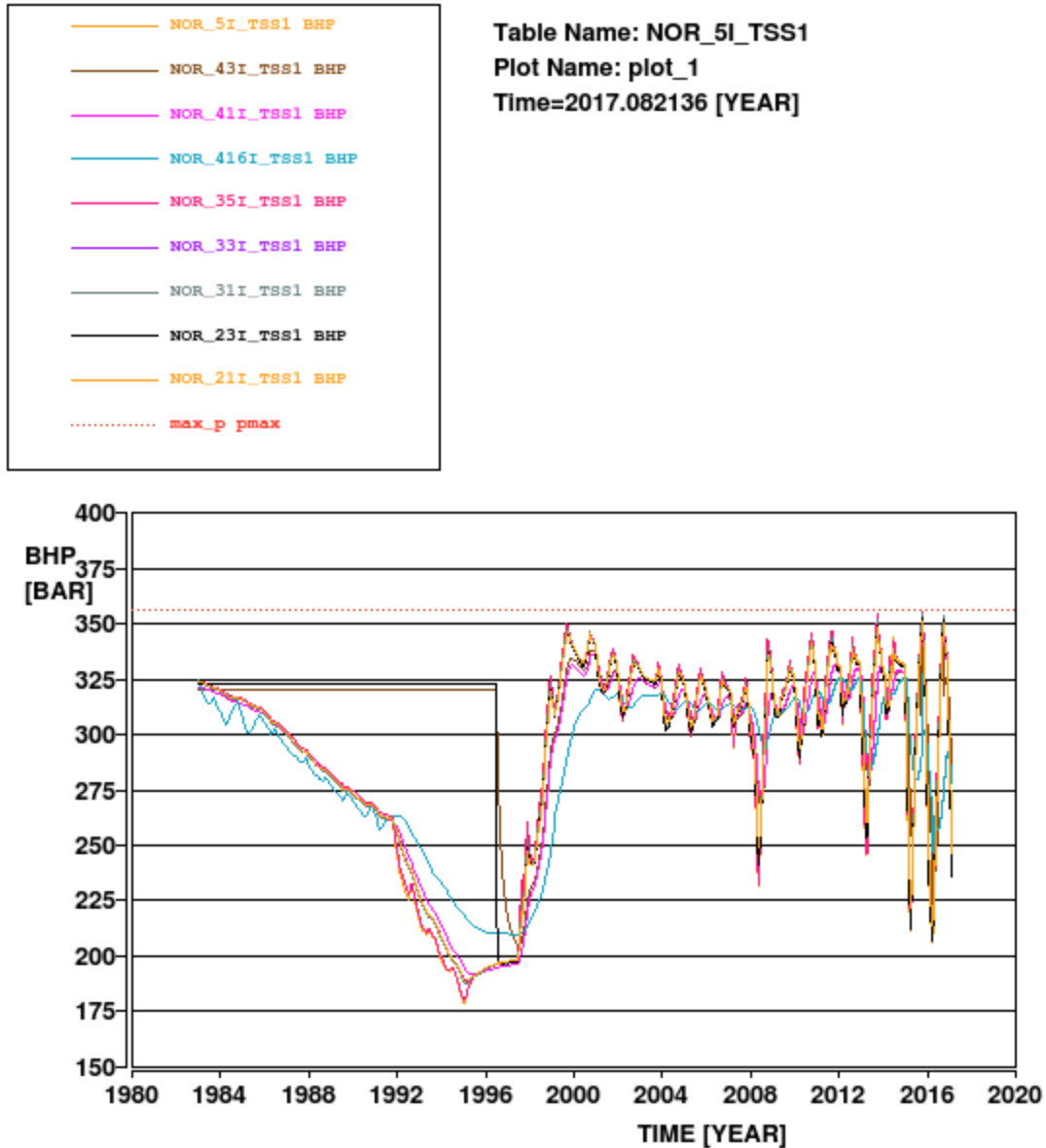
Deze appendix geeft een aantal doorsnedes van het Norg voorkomen waarlangs .seismische data worden getoond. Deze seismische secties laten onder andere zien dat het verzet van de breuken in het Rotliegend voorkomt steeds kleiner is dan de dikte van de Zechstein formatie. Vanwege het plastische vervormingsgedrag van het Zechstein stoppen deze breuken op de grens van Rotliegend en Zechstein en kunnen zich niet voortzetten naar ondiepere niveaus.



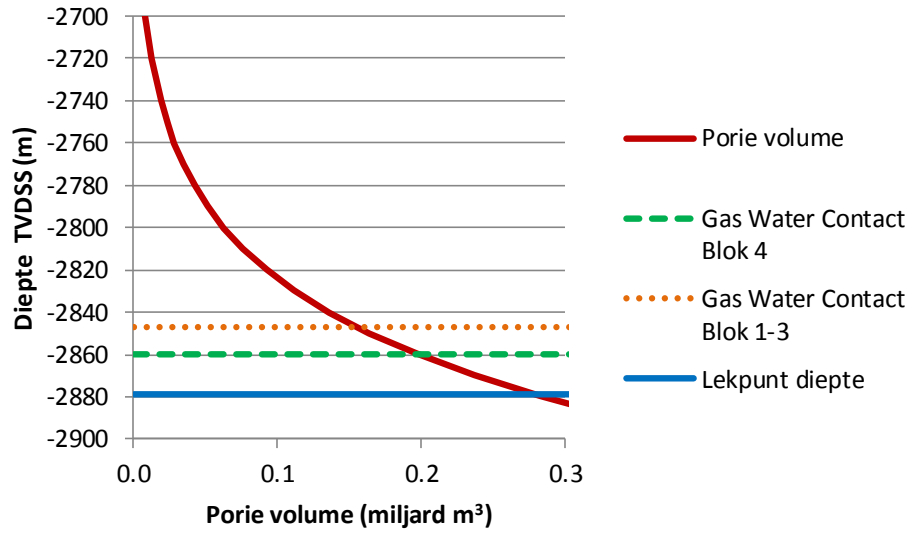


**Appendix E:** Ondergrondse putdrukken (BHP) verkregen uit dynamische simulaties

Onderstaande grafiek geeft de historische ondergrondse drukken (BHP – Bottom Hole Pressure) weer voor alle putten die in het Norg voorkomen injecteren. De hoogste druk die is gemeten in de nabijheid van deze putten is 356 bar. Dit is ongeveer 100 bar lager dan de Rotliegend minimale horizontale spanning.



**Appendix F:** Porievolume als functie van de diepte in het Norg voorkomen.





**Appendix G: Sectie uit [9] die de Risico Assessment Matrix methodologie uitlegd**

**Description of the Risk Assessment Matrix (RAM)**

The RAM is a 6 by 5 matrix that is used for qualitative assessments of risk (Figure A.G.1) is based on the concept of applying experience of events or incidents in the past to provide insight in how these risks can be managed into the future. The RAM is also used for incident classification and reporting, per the “*Incident Investigation and Learning Manual Section*” of [9]

The vertical axis represents increasing Consequences (Severity levels 0 to 5) in terms of harm to people, damage to assets, effect on the environment and communities (P, A, C, E categories).

- The horizontal axis represents increasing Likelihood (levels A to E) of the Consequence under consideration.
- Boxes in the matrix represent levels of Risk, increasing from top left to bottom right corners of the matrix.
- The matrix is divided into light blue, blue, yellow and red areas to illustrate the increasing level of Risk.

SEVERITY	CONSEQUENCES				INCREASING LIKELIHOOD				
	People	Assets	Community	Environment	A	B	C	D	E
					Never heard of in the Industry	Heard of in the Industry	Has happened in the Organisation or more than once per year in the Industry	Has happened at the Location or more than once per year in the Organisation	Has happened more than once per year at the Location
0	No injury or health effect	No damage	No effect	No effect					
1	Slight injury or health effect	Slight damage	Slight effect	Slight effect					
2	Minor injury or health effect	Minor damage	Minor effect	Minor effect					
3	Major injury or health effect	Moderate damage	Moderate effect	Moderate effect					
4	PTD or up to 3 fatalities	Major damage	Major effect	Major effect					
5	More than 3 fatalities	Massive damage	Massive effect	Massive effect					

**Figure A.G.1: Risk Assessment Matrix (RAM)**



## **Severity**

The Consequence Severity (0-5) scales in the P, A, C, E categories - people, assets, community and environment - are defined in Appendix 1.

The Consequence Severity (0-5) scales for each P, A, C, E category are not to be inferred as equal. In particular, they are not to be used to infer the value of a life.

## **Likelihood**

The Likelihood levels A to E are defined in Appendix 2, which also includes guidelines on how to apply them to varying size and complexity of Organisations.

## Referenties

---

- [1] Killplan Groningen Revisie 11 - PLAN VOOR EMERGENCY KILLS VOOR PRODUKTIEPUTTEN VAN DE ASSET GRONINGEN. Doc Nr: EP201604263199
- [2] Norg UGS completion plan, July 1993, BUG number 233, NAM nummer 23.910, Section 3.10.2
- [3] Cementing Manual, WS38.80.31-38 (May 2016, Restricted)
- [4] Cement Bond Logging Planning, Execution, Evaluation and Audit Trail, Assurance Guideline, SR.12.11130 (August 2012, Restricted).
- [5] Internal document NAM-TL-201003312903-000-0001
- [6] NAM / ONEgas West Well Integrity Management Standard Document nummer EP201610203118. Issued 15 dec 2016
- [7] Internal document NAM-TL-201003312903-000-0001
- [8] Norg UGS fault reactivation study and implications for seismic threat, van den Bogert et al. 2016, EP201610208045
- [9] Managing Risk Guide – Shell HSE & SP Management System (MS), version July 2016
- [10] Shell (2008) Cyclic Compaction Experiments on Samples from Norg-5. EP 2008-5189
- [11] Static modeling report