

October 2022



Report: EP202210201607

**NAM**

**Nederlandse Aardolie Maatschappij**

# **Overkoepelende Analyse Ondergrondse Risico's Waterinjectie Schoonebeek Zechstein**

This document is the property of Nederlandse Aardolie Maatschappij, and the copyright therein is vested in Nederlandse Aardolie Maatschappij. All rights reserved. Neither the whole nor any part of this document may be disclosed to others or reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form by any means (electronic, mechanical, reprographic recording or otherwise) without prior written consent of the copyright owner.

# Inhoudsopgave

---

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Introductie</b>	<b>5</b>
1.1 <i>Geschiedenis van risico analyse voor Zechstein waterinjectie</i>	5
1.2 <i>Rapport indeling</i>	5
1.3 <i>Methodiek</i>	6
1.4 <i>Borging van de risico beheersmaatregelen</i>	6
<b>2 Invloed water-injectie op reservoir-integriteit</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Chemische reacties</i>	7
2.2 <i>Mechanische veranderingen</i>	8
2.3 <i>Temperatuur</i>	8
2.4 <i>Conclusies</i>	8
<b>3 Vrijkomen van injectiewater als gevolg van zoutoplossing</b>	<b>9</b>
3.1 <i>Top event</i>	9
3.2 <i>Bow-tie analyse</i>	9
3.3 <i>Mogelijke oorzaken en barrières</i>	9
3.4 <i>Mogelijke gevolgen en mitigerende maatregelen</i>	14
3.5 <i>Onafhankelijke expert reviews</i>	17
<b>4 Geïnduceerde bevingen als gevolg van waterinjectie</b>	<b>18</b>
4.1 <i>Top event</i>	18
4.2 <i>Bow-tie analyse</i>	18
4.3 <i>Mogelijke oorzaken en barrières</i>	18
4.4 <i>Mogelijke gevolgen en mitigerende maatregelen</i>	19
4.5 <i>Onafhankelijke expert reviews</i>	20
<b>5 Vrijkomen van water als gevolg van verminderde put-integriteit</b>	<b>21</b>
5.1 <i>Top event</i>	21
5.2 <i>Bow-tie analyse</i>	21
5.3 <i>Mogelijke oorzaken en barrières</i>	21
5.4 <i>Mogelijke gevolgen en mitigerende maatregelen</i>	24
<b>6 Conclusies</b>	<b>26</b>
<b>7 Referenties</b>	<b>27</b>
<b>8 Appendices</b>	<b>28</b>

## DOCUMENT GESCHIEDENIS

<b>Datum</b>	<b>Revisie</b>	<b>Reden</b>
October 2022	0	concept

## Samenvatting

---

In dit rapport wordt een analyse gepresenteerd van de belangrijkste ondergrondse risico's die geassocieerd zijn met injectie van het water dat wordt meegeproduceerd uit het Schoonebeek olieveld in het gedepleteerde Schoonebeek gasveld. Het betreft hier het risico op het vrijkomen van injectiewater en het risico voor bodembewegingen/-trillingen.

Het Schoonebeek gasveld is gelegen in de Zechstein formatie, net zoals bij NAM's waterinjectie in Twente. Hierdoor kan de kennis van 10 jaar waterinjectie in Twente worden gebruikt in deze analyse.

Ten behoeve van de herontwikkeling van het Schoonebeek olieveld is in 2009 een risicoanalyse als onderdeel van de Milieu Effect Rapportage (MER) uitgevoerd. In de MER is aandacht besteed aan het mogelijk oplossen van de afdekkende steenzoutlaag indien deze laag in aanraking zou komen met het injectiewater wat zou kunnen leiden tot het vrijkomen van injectie water en/of bodemdaling. Ook is aandacht besteed aan effecten van bodembewegingen (daling en trillingen) indien water geïnjecteerd wordt.

Om hierover aanvullend inzicht te verkrijgen is op verzoek van het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) in 2015 een uitgebreidere set onderzoeken gedaan. SodM heeft vervolgens de onderzoeksrapporten laten beoordelen door internationale experts van de US Geological Survey en de universiteiten van Clausthal en Parijs (ParisTech). Deze hebben de conclusies van NAM bevestigd. SodM stelt dat er een groot aantal aanwijzingen is dat waterinjectie in de ondergrond van Twente veilig en verantwoord kan gebeuren.

Daarnaast heeft TNO in 2016 op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken een additionele verificatie uitgevoerd met betrekking tot het risico op zoutoplossing en aardbevingen. TNO kan zich vinden in de onderzoeksresultaten van NAM.

Latere gebeurtenissen bij Twente putten ROW-2 (gebroken buitenbuis) en ROW-4 (meet onregelmatigheid die mogelijk wijst op beperkte aantasting van Halië) hebben niet geleid tot verspreiding van stoffen in de biosfeer of tot enig gevaar voor mens en milieu. Echter, de voorvallen hebben wel geleid tot een actualisatie van deze overkoepelende risico analyse en tot verbeteringen in het monitoring systeem vastgelegd in het Water Injectie Management Plan. Het SodM concludeert in 2022 dat waterinjectie binnen deze randvoorwaarden veilig kan plaatsvinden.

Resumerend laat de risicoanalyse zien dat de beheersmaatregelen zoals vastgelegd voor Twente in de vergunning en in het Waterinjectie Management Plan (update 2021) goed werken en dat alle waarborgen voor een veilig en verantwoord opereren van de waterinjectieputten aanwezig zijn.

Op basis van voorgenoemde ervaring in Twente kan preventie van grondwatervervuiling door het in de ondergrond ongecontroleerd vrijkomen van injectiewater alsmede lokale/regionale bodemdaling als gevolg van zoutoplossing op een goede manier preventief geborgd worden. Er zijn verschillende beheersmaatregelen die vroegtijdige detectie van eventuele problemen ten doel hebben en de mogelijkheid van verdere escalatie beogen te minimaliseren.

Ook de risicoanalyse rond de effecten van een door waterinjectie geïnduceerde aardbeving laat zien dat de waarborgen voor een veilig en verantwoord opereren van de waterinjectie aanwezig zijn. Een uitgebreide analyse van de belangrijkste parameters die zouden kunnen leiden tot een verhoogd bevingsrisico hebben aangetoond dat dit risico als laag ingeschat wordt. Gedurende de 10 jaar van waterinjectie in Twente is geen enkele beving is geregistreerd. In zuidoost Drenthe zijn voelbare aardbevingen geweest als gevolg van gasproductie. Echter, gedurende meer dan 10 jaar water injectie in de velden Schoonebeek, Coevorden en Dalen zijn geen aardbevingen geregistreerd die gerelateerd kunnen worden aan water injectie. Mocht zich onverhoopt toch een beving voordoen dan zal deze gedetecteerd worden door het seismische monitoring netwerk. Het seismische risicobeheersplan beschrijft de acties die genomen zullen worden in het onwaarschijnlijke geval van een beving met het doel om effecten te minimaliseren.

# 1 Introductie

---

Het productiewater dat vrijkomt bij de oliewinning in Schoonebeek en bij de gaswinning in Oost Nederland is geïnjecteerd in de diepe ondergrond in leeg geproduceerde gasvelden in Twente (Tubbergen-Mander, Tubbergen, Rossum-Weerselo) en in zuidoost Drenthe (Coevorden<sup>1</sup>, Dalen<sup>2</sup>, Schoonebeek<sup>3</sup>).

## 1.1 Geschiedenis van risico analyse voor Zechstein waterinjectie

De waterinjectie volumes die geassocieerd gaan met de olieproductie liggen significant hoger dan de gasproductie gerelateerde waterinjectievolumes. Ten behoeve van de herontwikkeling van het Schoonebeek olieveld is een risicoanalyse als onderdeel van de Milieu Effect Rapportage (MER) uitgevoerd. In de MER is aandacht besteed aan twee hoofdrisico's die betrekking hebben op waterinjectie in de diepe ondergrond:

1. Het mogelijk oplossen van de afdekkende steenzoutlaag indien deze laag in aanraking zou komen met het injectiewater wat zou kunnen leiden tot het vrijkomen van injectie water en/of bodemdaling. Dit wordt behandeld in Hoofdstuk 3.
2. Effecten van bodembewegingen (daling en trillingen) indien water geïnjecteerd wordt. Dit wordt behandeld in Hoofdstuk 4.

Om aanvullend inzicht te verkrijgen voor de hoofdrisico's in de Twente velden is op verzoek van het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) een uitgebreidere set onderzoeken gedaan voor de waterinjectie. Deze onderzoeken zijn in 2015 afgerond (Ref 1-4). SodM heeft vervolgens de rapporten laten beoordelen door internationale experts van de US Geological Survey en de universiteiten van Clausthal en Parijs (ParisTech). Deze hebben de conclusies van NAM bevestigd (Ref 10). SodM stelt dat er een groot aantal aanwijzingen is dat waterinjectie in de ondergrond van Twente veilig en verantwoord kan gebeuren. Voorts heeft NAM nog 2 studies laten uitvoeren door TNO (Ref 23-24) alsmede in-house studies (Ref 25-26) en is sinds 2018 het Kennisprogramma over de Effecten van Mijnbouw ingesteld door de Minister van Economische Zaken. Het seismische risico wordt vooral bepaald door de depletiefase en niet door de injectiefase.

Tegelijk met de publicatie van de expert review heeft SodM aan NAM verzocht om een overzicht te maken, met een integrale risicoanalyse voor de verspreiding van stoffen (Ref 10). Dit heeft in 2015 geleid tot de eerste versie van een overkoepelende analyse van de ondergrondse risico's geassocieerd met waterinjectie in gedepleteerde Zechstein gasreservoirs. Hierin zijn de resultaten en conclusies van de verschillende onderzoeken samengevat en gecombineerd. Sindsdien is de risicoanalyse meerdere malen geactualiseerd. De kennis die op deze manier is vastgelegd op basis van 10 jaar waterinjectie ervaring in Twente vormt de basis voor de voorliggende risico analyse voor waterinjectie in Schoonebeek Zechstein.

## 1.2 Rapport indeling

De verschillende risico's worden hoofdstuksgewijs behandeld in dit rapport. Hoofdstuk 2 beschrijft de invloed van water-injectie op de reservoir-integriteit. Dit hoofdstuk behandelt de integriteit van het Zechstein reservoir en de afdekkende anhydriet laag. In Hoofdstuk 3 wordt het risico beschreven van het vrijkomen van injectiewater als gevolg van oplossing van de steenzoutlaag die het reservoir aan de bovenkant afdicht. Hoofdstuk 4 behandelt geïnduceerde bevingen als gevolg van waterinjectie. En in Hoofdstuk 5 wordt het vrijkomen van water als gevolg van verminderde put-integriteit geaddresserd.

---

<sup>1</sup> Tot 1994 werd geassocieerd water van de gas productie in Oost-Nederland geïnjecteerd in het Coevorden Zechstein reservoir.

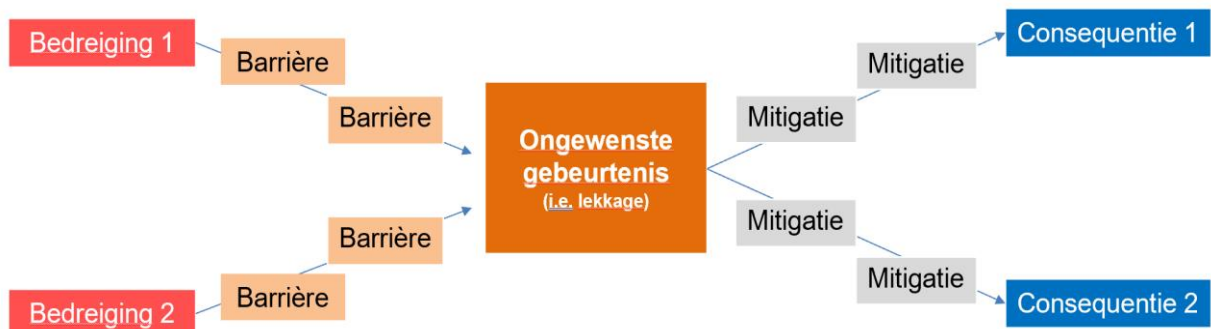
<sup>2</sup> Van 1996 tot 2012 werd geassocieerd water van de gas productie in Oost-Nederland geïnjecteerd in het Dalen Zechstein reservoir.

<sup>3</sup> Sinds 2010 wordt geassocieerd water van de gas productie in Oost-Nederland geïnjecteerd in het Schoonebeek Zechstein reservoir.

### 1.3 Methodiek

Om op een overzichtelijke wijze de risico-analyse te presenteren is gebruik gemaakt van de “bow-tie” methodiek (Figuur 1). Hierbij is een **ongewenste gebeurtenis** geïdentificeerd (midden), met de mogelijke **bedreigingen** die de gebeurtenissen kunnen veroorzaken (links) en de mogelijke **consequenties** van de gebeurtenissen (rechts). De **barrières** moeten voorkomen dat een bedreiging leidt tot een ongewenste gebeurtenis door middel van preventieve maatregelen (links), en dat de gevolgen van een gebeurtenis zoveel mogelijk beperkt worden door middel van reactieve **mitigatie** maatregelen (rechts).

De bow-tie analyse is in eerste instantie ontwikkeld voor Rossum-Weerselo, Tubbergen en Tubbergen-Mander, maar is evenzogoed toepasbaar op het Schoonebeek gasveld. Daar waar er verschillen zijn tussen de situatie in Twente en bij Schoonebeek is dat aangegeven.



Figuur 1: Bow tie methodiek voor risico analyse

### 1.4 Borging van de risico beheersmaatregelen

Voor risicobeheersing zijn monitoring en inspectie activiteiten van essentieel belang. In het Water Injectie Management Plan worden deze activiteiten vastgelegd en vervolgens geoperationaliseerd.

Naar aanleiding van zorgen van omwonenden, berichten in de media en vragen vanuit de politiek, heeft de Minister van Economische Zaken een brief aan de Tweede Kamer gestuurd over de waterinjectie activiteiten in Twente (Ref 6). Daarin bevestigt hij dat zowel op het vlak van injectiewaterlekkage, bevingen en bodemdaling er een uitgebreid en afdoende monitoringsprogramma is geïmplementeerd dat door toezicht van SodM binnen het vergunningskader voldoende waarborgen geeft voor Veiligheid en Milieu.

In 2021-2022 heeft NAM de risico's opnieuw in kaart gebracht, naar aanleiding van de onderzoeken en metingen als gevolg van een scheur in een buitenbuis van een injectieput, en de pekkel die achter een buitenbuis is gemeten bij een andere injectieput. Op 26 september 2022 concludeert het SodM (Ref 28) dat er in beide gevallen geen sprake was van schade voor mens en milieu, en dat de NAM de risicobeheersing van de injectie van productiewater in Twente op orde heeft op basis van het aangescherpte monitoringsplan voor Twente en de overkoepelende risico-analyse. Laatsgenoemde analyse vormt het startpunt voor de voorliggende overkoepelende risico analyse voor Schoonebeek.

## 2 Invloed water-injectie op reservoir-integriteit

---

Dit hoofdstuk behandelt de manier waarop, en mate waarin water-injectie kan leiden tot veranderingen in het reservoirgesteente en de mogelijke gevolgen van deze veranderingen (invloed op hoofd risico's). Hieronder wordt verstaan aantasting door:

- Chemische reacties
- Mechanische veranderingen
- Temperatuur

Het Zechstein reservoir bestaat hoofdzakelijk uit kalksteen maar bevat ook dunne laagjes anhydriet. Dit hoofdstuk heeft betrekking op de integriteit van het Zechstein reservoir en de afdekkende anhydriet laag. De integriteit van de afdekkende zout lagen ("reservoir containment") en het risico op verspreiding van stoffen wordt behandeld in hoofdstuk 3.

### 2.1 Chemische reacties

Wanneer het injectiewater of de mijnbouwhulpstoffen daarin, chemisch niet compatibel zijn met het reservoirgesteente of het daarin aanwezige formatiewater, dan kunnen er ongewenste chemische reacties optreden. Dit kan leiden tot het verstopt raken van het reservoir waardoor injectie bemoeilijkt wordt, of –in theorie– tot het oplossen van mineralen waaruit het reservoirgesteente is opgebouwd. In dit hoofdstuk worden de oorzaken en gevolgen van mogelijke geochemische incompatibiliteit weergegeven. Verder wordt er ingegaan op preventieve maatregelen om de kans op incompatibiliteit te verkleinen, alsmede reactieve maatregelen om de mogelijke gevolgen te beperken.

NAM heeft een lange ervaring met het injecteren van water in zowel zandsteen als kalksteenformaties en eventuele daarmee geassocieerde geochemische reacties. Tot dusver is het bij de NAM (en de olie-industrie wereldwijd) nog niet voorgekomen dat een reservoir "oplost". De mineralen waaruit de reservoirs bestaan (kalksteen en anhydriet), zijn niet of nauwelijks oplosbaar in het te injecteren water. Aanslagvorming wat kan leiden tot verstopping komt wel voor, en daar richt de risico analyse zich dan ook meestal op (Ref 12).

Het productiewater uit het Schoonebeek olie-veld dat wordt geïnjecteerd in de Zechstein reservoirs heeft een met het Zechstein formatiewater overeenkomstige samenstelling, waardoor er geen gevaar bestaat voor reacties met het Zechstein reservoirgesteente (Ref 12). Ook de pH van het injectiewater is dusdanig hoog dat het Zechstein reservoirgesteente niet zal oplossen.

Incompatibiliteit van productiewater met het Zechstein formatiewater zou kunnen leiden tot het neerslaan van onoplosbare zouten. Dit verschijnsel kan plaatsvinden wanneer twee waterstromen worden gemengd en/of verandering van condities zoals bijvoorbeeld pH, druk en/of temperatuur optreedt. Mogelijk gevormde neerslag kan leiden tot verminderde injectiviteit doordat gesteenteporiën verstopt kunnen raken. Doordat deze neerslagvorming gebaseerd is op fysische en chemische eigenschappen, kunnen deze door thermodynamische modellen worden voorspeld. Deze laten zien dat het risico van neerslagvorming in het Zechstein reservoir laag is (Ref 12). Mogelijkerwijs kunnen kleine hoeveelheden bariumsulfaat neergeslagen worden. Dit is te voorkomen door een antibarium-sulfaataanslagvloeistof toe te voegen.

Verder zijn de in het injectiewater voorkomende mijnbouwhulpstoffen onderzocht met betrekking tot chemische interactie met het Zechstein reservoirgesteente en formatiewater (Ref 12). De mijnbouwhulpstoffen zijn commercieel ontwikkeld, waarbij alleen de leverancier de precieze samenstelling kent. Hoewel NAM de precieze samenstelling niet kent zijn in het algemeen de werkzame bestanddelen wel bekend en deze verschillen vaak weinig tussen de producten van verschillende leveranciers. Aan de hand van risico-kaarten beschrijft de leverancier verder de veiligheidsaspecten. Dit is volgens wettelijke voorschriften, waarbij SodM toezicht en controle houdt. Daarbij krijgt SodM inzage in additionele gegevens van de leverancier. Het is zodoende niet mogelijk voor de NAM om de precieze samenstelling van de mijnbouwhulpstoffen te benoemen, maar wel de mate waarin de stoffen gevaarlijk of schadelijk kunnen zijn.

De mijnbouwhulpstoffen zijn in de toegepaste concentraties compatibel met het Zechstein reservoirgesteente en formatiewater. De meeste mijnbouwhulpstoffen zijn niet reactief. Ze hechten zich bijvoorbeeld aan materialen en zorgen zodoende voor een beschermende laag. De H<sub>2</sub>S binder is wel

reactief met H<sub>2</sub>S, maar de reactie producten die in het injectiewater voorkomen zijn niet reactief. De zuurstof binder kan aanslag vormen met componenten in het formatiewater, maar de hoeveelheden zijn dusdanig klein dat het verwachte effect verwaarloosbaar is. De mijnbouwhulpstoffen hebben geen impact op het Zechstein reservoirgesteente zoals oplossing of chemische reacties met mineralen. Degradatie van mijnbouwhulpstoffen wordt niet verwacht, want dat zou tevens de functionaliteit van de stoffen verminderen, wat aan het licht zou zijn gekomen in het chemicaliën selectieproces.

Mochten er toch onverwachte reacties plaatsvinden, dan zal dat merkbaar zijn door veranderingen in de injectiviteit. Het verstopt raken van poriën zal gepaard gaan met toenemende injectiedruk. Injectiedrukken moeten regelmatig geëvalueerd worden, conform het waterinjectie management plan (sectie 1.4). Op basis daarvan kan de dosering van aanslagremmer aangepast worden. Indien de injectie druk onverwacht zo hoog oploopt dat de mechanische integriteit van de afdekkende lagen in het geding komt, dan zal vanuit de controlekamer de injectie stopgezet worden. In het onwaarschijnlijke geval dat er niet ingegrepen wordt, zal een beveiliging in het pompsysteem ervoor zorgen dat de pomp automatisch afslaat mocht de maximale injectiedruk overschreden worden (zie ook hoofdstuk 3, 4, en 5).

## 2.2 Mechanische veranderingen

Bij waterinjectie kan de injectiviteit van een reservoir worden verbeterd door een hogere injectiedruk toe te passen, waarmee scheuren in het reservoir ontstaan. Dankzij de scheuren kan het water beter het reservoir instromen. Deze manier van werken wordt aangeduid als injectie onder “fracture conditions”. In de Schoonebeek waterinjectie-vergunningaanvraag wordt voorzien in de mogelijkheid om met deze methode water te injecteren. Echter, de ervaring in Twente leert dat op die plekken waar in het verleden een hoge gasproductie capaciteit is gezien, het reservoir ook snel water kan opnemen door de scheuren die van nature al aanwezig zijn in het Zechstein kalksteen reservoir (Ref 7). Het is de verwachting dat injectie onder fracture-conditions in de Zechstein kalksteen reservoirs niet nodig zal zijn.

Mocht injectie onder fracture conditions toch plaatsvinden, dan moet de scheurvorming beperkt blijven tot de kalksteen. De onder- en bovenliggende anhydriet en zoutlagen hebben een hogere minimale horizontale spanning, waardoor scheurvorming daar alleen kan optreden bij een nog hogere druk. Om de integriteit van de afsluitende lagen te garanderen is daarom een druklimiet gesteld op de injectiepompen (zie hoofdstuk 3 en 5). Tevens wordt niet geïnjecteerd in of dichtbij breuken om het risico op aardbevingen te minimaliseren (zie hoofdstuk 4).

## 2.3 Temperatuur

Het is een bekend gegeven in de literatuur, dat injecteren van koud water in warme reservoirs kan leiden tot thermische scheuren van het reservoirgesteente. Injectie onder “fracture-conditions” zoals hierboven beschreven kan mogelijk plaatsvinden op een lagere injectiedruk dan normaal verwacht zou worden.

Zoals boven beschreven wordt in de Schoonebeek waterinjectie vergunningaanvraag voorzien in de mogelijkheid om met deze methode water te injecteren. De bijbehorende beheersmaatregelen zoals die in Twente geïmplementeerd zijn worden ook bij Schoonebeek geïmplementeerd.

## 2.4 Conclusies

Aantasting van het reservoir en afdichtende anhydriet door chemische reacties wordt niet verwacht. Mogelijk kunnen er (thermische) scheuren in het reservoirgesteente ontstaan tijdens injectie (injectie onder fracture conditions). In de waterinjectie-vergunningen wordt voorzien in deze mogelijkheid. Mechanische veranderingen in de afdichtende anhydriet lagen worden voorkomen door het opleggen van een injectiedruk limiet.



## 3 Vrijkomen van injectiewater als gevolg van zoutoplossing

### 3.1 Top event

Het injectie reservoir bestaat uit kalksteen. Daar overheen ligt een laag ondoordringbaar anhydriet, gevolgd door een pakket ondoordringbaar steenzout (haliet). Daarna volgt nog zo'n 3000 meter aan klei en zandsteen pakketten. De anhydriet laag en het steenzout vormen de afdichtende laag die gedurende miljoenen jaren het gas tegengehouden hebben. Deze afdichtende lagen zorgen er ook voor dat het injectiewater goed opgeborgen blijft en niet naar boven kan komen.

#### LOSS OF CONTAINMENT due to salt dissolution

Het oplossen van de afdichtende steenzout laag is een risico dat zou kunnen leiden tot de verspreiding van het injectiewater, in het uiterste geval tot in het grondwater binnen de biosfeer (zone tot maximaal 500 meter diepte). Daarnaast bestaat de zorg dat het oplossen van zout zou kunnen leiden tot cavernes, welke uit zouten kunnen groeien tot sinkholes aan het oppervlak. Dergelijke cavernes zouden ook een ontsnappingsroute bieden voor het nog in het reservoir aanwezige gas.

#### Zout-concentratie

Het injectiewater is zout, maar niet verzadigd met zout. Volledig met zout verzadigd water heeft een zoutgehalte van ongeveer 300 g/l. Het zoutgehalte van het injectiewater is veel lager. Het injectiewater is afkomstig uit Schoonebeek waar het als productiewater vrijkomt bij de oliewinning. In Schoonebeek wordt stoom geïnjecteerd om de stroperige olie te verwarmen en zo de winning te bevorderen. De stoom condenseert in het olie reservoir waar het zich mengt met het aanwezige zoute formatiewater. Dit watermengsel komt mee naar boven met de oliewinning als productiewater. Doordat er steeds meer gecondenseerd stoom bij komt, neemt het zoutgehalte van het productiewater in de loop der tijd af. Het zoutgehalte was bij aanvang ongeveer 90 g/l. In 2015 was het water ongeveer even zout als zeewater (ongeveer 34 g/l). De verwachting is dat het zoutgehalte verder zal afnemen naar ongeveer 10 g/l. Het Schoonebeek productiewater wordt in de kalksteen reservoirs geïnjecteerd. Het zoutgehalte van het injectiewater is bepalend voor het vermogen van het water om zout op te lossen. In de modelleringen (Ref 1) is de conservatieve aanname gedaan dat het injectiewater altijd een zoutgehalte heeft van 1 g/l. Derhalve is de afname van het zoutgehalte en de toenemende capaciteit van het injectiewater om zout op te lossen al meegenomen in de analyse.

### 3.2 Bow-tie analyse

Appendix 1 laat een bow-tie analyse zien van de mogelijke oorzaken en gevolgen die op zouden kunnen treden mocht oplossing van steenzout plaatsvinden. Daarnaast zijn de barrières en beschermende maatregelen genoemd die zowel in het voortraject (voor aanvang van waterinjectie) als ook naderhand genomen zijn dan wel uitgevoerd zouden kunnen worden mocht lekkage geconstateerd worden. De mogelijke dreigingen linksboven in de bow-tie analyse zijn geassocieerd met mogelijke oplossing van zout ter hoogte van het reservoir, direct bij de injectieputten. De mogelijke dreigingen linksonder zijn geassocieerd met mogelijke oplossing van zout in het reservoir ver bij de injectieput vandaan.

De bow-tie analyse is primair ontwikkeld voor de velden in Twente (Rossum-Weerselo, Tubbergen en Tubbergen-Mander) maar is evenzogoed van toepassing op het Schoonebeek gasveld. Daar waar er verschillen zijn tussen de situatie in Twente en in Schoonebeek is dat aangegeven.

### 3.3 Mogelijke oorzaken en barrières

Op basis van uitgebreide modelleringen is aangetoond dat zoutoplossing alleen waarschijnlijk is als tegelijkertijd aan twee zeer specifieke condities voldaan wordt (Ref 1):

1. het injectiewater moet in direct contact kunnen komen met het steenzout
2. het injectiewater moet in voldoende mate langs het steenzout kunnen doorstromen om steeds weer "vers" (niet zout verzadigd) water aan te voeren.

Uit een beschouwing van de putten, waarin het water wordt geïnjecteerd, in samenhang met de geologie van de injectiereservoirs (carbonaatlagen) en afdichtende lagen (anhydriet en steenzout lagen) in de

diepe ondergrond (Ref 1, 2), zijn slechts een paar scenario's geïdentificeerd, waarbij in theorie injectiewater langs het zout zou kunnen stromen:

1. Langs de put
2. Dichtbij de put
3. In het veld

Deze scenario's zijn in de onderstaande paragrafen uitgewerkt.

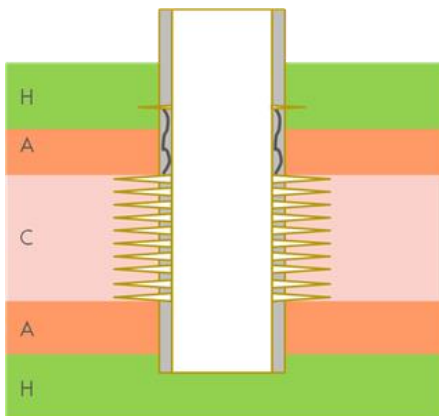
### 3.3.1 Risico van zoutoplossing langs de put

Dit risico is te vinden linksboven in de bow-tie ('at the wellbore') in Appendix 1.

Threat: fresh water can contact Halite via hole in the liner below the production packer

Threat: from perforations fresh water can reach Halite via a flowpath (i.e. crack in cement) behind production liner

Direct rondom een put zou injectiewater dat op diepte van de carbonaatlaag (C) wordt geïnjecteerd via mogelijke scheurtjes in het cement (als deze van een slechte kwaliteit is) rondom de verbuizing naar de onder- of bovenliggende steenzoutlaag (H) kunnen stromen. Daarnaast kan het injectiewater ook in contact komen met het zout als er een lek in de ondergrondse verbuizing is ontstaan (zie Figuur 2). Elk afzonderlijk kunnen deze situaties niet tot grootschalige zoutoplossing leiden, omdat het niet verzadigde injectiewater niet rond kan stromen. Het water raakt daardoor snel verzadigd en kan niet nog meer zout oplossen. Slechts een combinatie van deze twee situaties kan een continu stromingspad opleveren wat mogelijk wel tot aantasting van de zoutlaag zou kunnen leiden.



*Figuur 2: Schematische weergave van een theoretisch scenario waarbij dichtbij de put injectie water in contact zou kunnen komen met het Steenzout of Haliet (H): via injectie in het Carbonaat (C), waarna het via mogelijke scheurtjes (blauwe lijntjes) in slechte kwaliteit cement rondom de verbuizing langs de Anhydrietlaag (A) en het Haliet stroomt, dan wel via een lek in de verbuizing op diepte van het Haliet (rode spitse punten in laag H), waarna het weglekt naar het Carbonaat*

Barrier: CO<sub>2</sub> corrosion is prevented by using corrosion inhibitor. Oxygen corrosion can be prevented by avoiding the introduction of oxygen upstream and (if required) using oxygen scavenger and injection valves.

De putverbuizing onder de productiepacker wordt beschermd tegen corrosie door toediening van anti corrosiemiddelen zoals corrosion inhibitor (tegen CO<sub>2</sub> corrosie) en indien noodzakelijk zuurstofbinder.

Barrier: Water will follow the path of least resistance. As long as the perforations are open and accessible (injection pressure monitoring), it is unlikely that water will choose a path through/along the halite

Zelfs in het slechts denkbare geval waarin er een lek in de verbuizing is, gecombineerd met scheurtjes in het cement, dan zal het water het pad van de minste weerstand kiezen: de perforaties. Zolang deze toegankelijk zijn zal nagenoeg al het water via de perforaties stromen, waardoor eventuele zout oplossing beperkt wordt.

Barrier: perform regular inspection logging to verify appropriate integrity status of production liner and cement

Barrier: good cement bonding across entire reservoir will prevent flow-past scenario. Water will stop at Halite

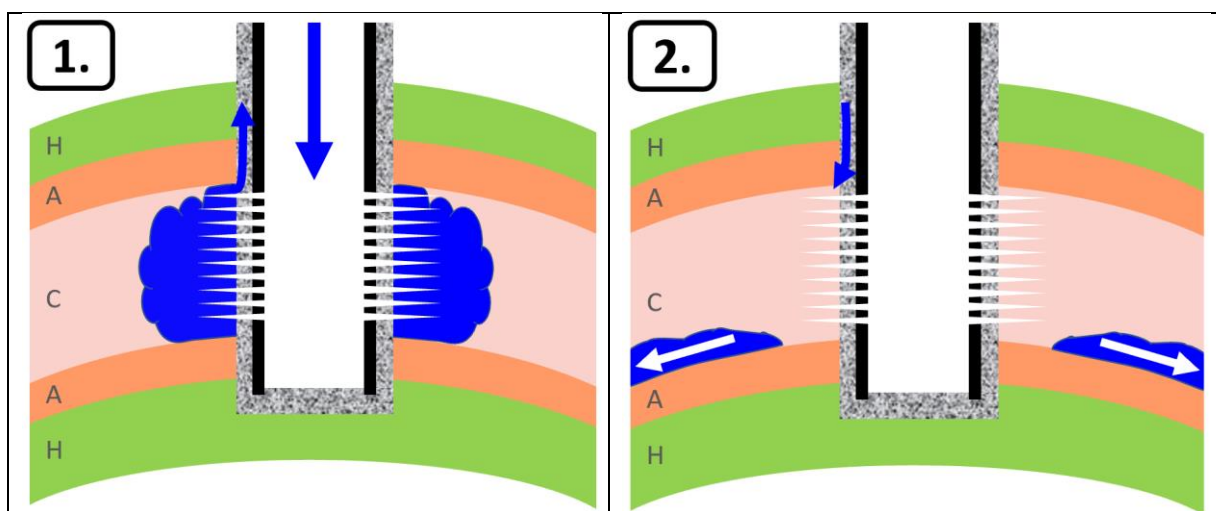
Aanvullende beschermende maatregelen zijn een goede en regelmatige inspectie van de injectieputten zelf. Deze inspectie is gericht op zowel de kwaliteit van de verbuizingen in de put, als ook de kwaliteit van de cementlaag waarmee de verbuizing is vastgezet in het gesteente. In Twente zijn dergelijke inspecties (calliper, PNL en eventueel temperatuur, PLT en CBL logs) een integraal onderdeel van het Waterinjectie Management Plan voor de injectievelden (Ref 14). De resultaten van de inspectieprogramma's moeten op 6-jaarlijkse basis gedeeld worden met het bevoegd gezag en de toezichthouder SodM (Ref 16). In geval van bijzonderheden dienen deze onverwijld gemeld te worden en worden deze ook weergegeven in de jaarlijkse waterinjectie rapportage. Voor de waterinjectie bij Schoonebeek zal een soortgelijk Waterinjectie Management Plan geïmplementeerd worden.

De ROW-2 en ROW-4 gebeurtenissen hebben geleid tot een intensivering van het logging programma met betere tools en een hogere logging frequentie. Voortaan zal NAM jaarlijks een PNL log runnen conform het geactualiseerde Water Injectie Management Plan.

In 2021 heeft NAM een aantal extra metingen in de operationele putten (ROW-4, 5 en 7) laten uitvoeren. Om een beeld te krijgen van de gesteentelagen zijn bij wijze van experiment Pulse Neutron Logs (PNL) gebruikt. Deze meettechniek wordt doorgaans gebruikt om olie- of gas-saturatie te meten in een reservoir. Het idee was om deze te testen voor de detectie van eventuele waterhoudende ruimtes in het haliet achter de casing.

In de putten ROW-5 en ROW-7A is geen indicatie gevonden van waterhoudende ruimtes in het haliet. Echter, bij put ROW-4 is in de Zechstein 2 Haliet over een lengte van ca 3 meter een afwijkende uitslag aangetroffen. Ook wijkt de CBL log van 2021 bij dit interval af van de CBL log uit 2013. Deze observaties worden gerelateerd aan het ontstaan van een waterhoudende ruimte achter de casing (Ref 27, ter beoordeling ingediend bij de toezichthouder). ROW-4 is uit voorzorg buiten gebruik genomen.

Een mogelijke oorzaak voor de aantasting van haliet die is aangetroffen achter de verbuizing bij ROW-4 kan liggen in het starten/stoppen van injectie (door bijvoorbeeld onderhoudswerkzaamheden). Hierdoor ondergaat een put thermische cycli: afkoeling door het koude injectiewater, opwarming tijdens stops. Hoewel dit kleine effecten zijn is het op termijn niet uit te sluiten dat de cement bond wordt aangetast, of dat er barstjes in het cement ontstaan. Hierdoor kan een micro-annulus ontstaan achter de casing, waardoor er injectiewater (laag zout gehalte) in aanraking kan komen met de haliet. Zie Figuur 3. Tijdens injectie wordt het injectiewater een micro-annulus ingeperst (1). Bij een injectie stop zakt het water onder invloed van zwaartekracht weg uit de near-wellbore area, naar lager gelegen delen van het reservoir (2). Het water draineert uit de micro-annulus. Omdat het onverzadigde injectiewater niet continue rond kan stromen leidt dit mechanisme niet tot grootschalige zoutoplossing.



Figuur 3: Tijdens injectie wordt het injectiewater een micro-annulus ingeperst (1). Bij een injectie stop zakt het water onder invloed van zwaartekracht weg uit de near-wellbore area, naar lager gelegen delen van het reservoir (2). Het water draineert uit de micro-annulus.

Door het vergelijken van periodieke PNL logs kan worden geobserveerd of er veranderingen optreden in het haliet achter de casing. Bij het vaststellen van integriteitsverlies is de put niet langer geschikt voor injectie en kan deze worden geabandonneerd. Deze PNL monitoring is inmiddels opgenomen in het geactualiseerde Water Injectie Management Plan (Ref 14).

Er is ook een alternatieve verklaring voor de observaties in ROW-4. Mogelijk vindt cross-flow plaats tussen de twee injectie reservoirs via een micro-annulus als gevolg van een dynamisch drukverschil tijdens injectie. Het bestaan van een dergelijke micro annulus is niet uit te sluiten. Het debiet zal echter zeer laag zijn waardoor eventuele zout oplossing beperkt wordt (de observaties zijn te verklaren met minder dan 1 liter per dag). Ook dit mechanisme kan bijtijds gedetecteerd worden door het vergelijken van periodieke PNL logs. Dit mechanisme is minder relevant voor waterinjectie in het Schoonebeek gasveld. In het Schoonebeek gasveld bevindt zich namelijk slechts één injectie reservoir waardoor er geen sprake kan zijn van cross flow tussen twee injectie reservoirs.

<b>Threat: fresh water reaches Halite via induced fracture near wellbore</b>
Barrier: strong Anhydrite layer is present between Halite and ZeZ-Carbonates that is well correlatable across the injection reservoirs (Ref 2)
Barrier: surface injection pressure limit prevents that fracture pressure in Anhydrite is reached
Barrier: Carbonate is naturally fractured and due to depletion these fractures are filled with water at relative low pressure compared to fracturing pressure of Anhydrite (Ref 2)
Barrier: Carbonate contains a natural fracture network that results in a high leak-off rate when a fracture in the carbonate reaches the Anhydrite preventing frac growth into it (Ref 7)

De vorming van hydraulisch geïnduceerde fractures in het Anhydriet is bijzonder onwaarschijnlijk omdat het natuurlijke fracture netwerk in het carbonaat reservoir onder een relatief lage druk staat en zeer gemakkelijk water opneemt en afvoert. Continue monitoring van de injectiedruk is daarom van belang om zeker te stellen dat de perforaties open zijn. De injectiedruk wordt continu gemonitord op de injectiepompen (Ref 5). Deze zijn uitgerust met een druk begrenzing, waardoor de druk niet hoger kan worden dan scheurvormingsdruk in de afdichtende lagen. Hierdoor wordt de kans op mogelijke scheurvorming in de onder en bovenliggende afdichtende anhydrietlagen sterk gereduceerd. Bovendien wordt ervoor gezorgd dat de gemiddelde druk in het reservoir niet boven de oorspronkelijke reservoirdruk uitkomt (Ref 5, 7 en 16). Indien de druk sterk afwijkt van de verwachte druk zullen de modellen geëvalueerd worden, met name m.b.t. de validiteit van onderliggende gegevens en aannames over put configuratie, reservoir eigenschappen en reservoir dimensies.

### 3.3.2 Risico van zoutoplossing dicht bij de put

Dit risico is verder uitgewerkt links midden in de bow-tie in Appendix 1.

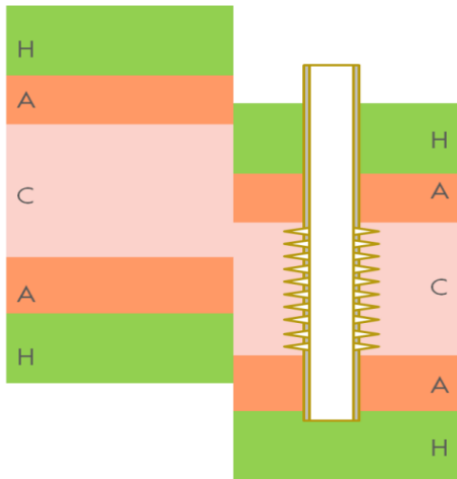
<b>Threat: fresh water reaches Halite via natural fracture network in ZeZ's</b>
Barrier: above and below each ZeZ-Carbonate an 2-38 m thick unfracted Anhydrite layer is present that prevents contact between the Halite and the Carbonate

Aan de boven- en onderkant van het carbonaat reservoir kan het injectiewater niet in contact komen met het haliet. Op basis van vele boorputgegevens kan worden aangetoond dat de lege carbonaat gasreservoirs in Twente overal zowel aan de boven- als onderzijde gescheiden worden van het steenzout door een onoplosbare anhydrietlaag (Ref 2). In zuidoost Drenthe zijn deze anhydrietlagen ook overal aanwezig, maar er bevindt zich geen steenzout onder het reservoir. De bovenste anhydrietlaag vormt een perfecte afsluiting (barrière) die er ook gedurende vele miljoenen jaren voor gezorgd heeft dat het gas in deze reservoirs opgesloten is gebleven. Als er in het gesteente geen breuken aanwezig zijn, dan kan op afstand van de put door de aanwezigheid van onoplosbare anhydrietlagen tussen het carbonaat en het steenzout geen contact ontstaan tussen het injectiewater en het steenzout.

<b>Threat: fresh water flows via natural fracture network into juxtaposed Halite and flows away from it via another fracture network</b>
Barrier: the further away from the well, the lower the water velocity and, hence, speed of salt dissolution

Alleen in de buurt van breuken is een situatie mogelijk waarbij het injectiewater in contact zou kunnen komen met het steenzout (zie Figuur 4) doordat de verschillende lagen aan weerszijde van en langs de breuk in diepte zijn verschoven. Om stroming van injectiewater langs breuken te beperken dient er voldoende afstand te zijn tussen injectieputten en breuken. Gedetailleerde simulatie modellen (Ref 1) laten zien dat met een injectiesnelheid van 2500 m<sup>3</sup>/d gedurende 20 jaar (cumulatief geïnjecteerd volume van 15 mln m<sup>3</sup>) een afstand van 140 meter tussen put en breuk voldoende is om het risico van zout oplossing langs breuken te beperken.

Wanneer het injectiewater in het reservoir komt, mengt het zich met het reeds aanwezige zeer zoute formatiewater. Hoe verder bij de put vandaan, hoe hoger het zout gehalte en hoe lager het vermogen van het water om zout op te lossen. Wanneer het water bij de put wegstroomt, neemt tevens de stromingsnelheid af. Dit leidt ook tot een afname van de snelheid waarmee zout langs een breuk eventueel op zou kunnen lossen.



*Figuur 4: Als de carbonaat laag (C) op afstand van de put door verschuiving langs de breuk in diepte overlapt met het haliet (H) zou injectiewater in direct contact met het Haliet kunnen komen  
NB: in zuidoost Drenthe bevindt er zich geen haliet onder het reservoir*

Barrier: near the halite, the natural fractures are filled with salt, delaying contact with the juxtaposed halite

In de buurt van breuken zijn de natuurlijk voorkomende scheuren in het kalksteen reservoir gevuld met zout (Ref 2). Hierdoor wordt het contact van het injectiewater met de Zechstein haliet formatie sterk vertraagd.

Barrier: Each well is connected to extensive ZeZ-Carbonate fractured network. Resulting pressure build-up when water reaches a juxtaposed Halite will cause the water to disappear into another connected network

Zelfs wanneer er direct contact zou zijn tussen het injectiewater in het zout, dan nog zou het water het pad van de minste weerstand kiezen: de van nature voorkomende open scheuren in het kalksteen reservoir.

Barrier in Twente: low kv/kh inside ZeZ-Carbonate slows salt dissolution as salt saturated water can only move away from juxtaposed Halite in a horizontal direction (Ref 1 and 2)

Door de lagere effectieve verticale permeabiliteit in het Twente carbonaat reservoir kan water dat in contact is geweest met haliet alleen in horizontale richting wegstromen. Deze additionele factor zorgt voor een verdere reductie van de snelheid waarmee zout opgelost kan worden.

Barrier Drenthe: as there is no halite below the reservoir this mechanism does not play a role in downthrown fault juxtapositions (Ref 11 Ch 11.1)

In het Schoonebeek gasveld bevindt het zout zich uitsluitend boven het reservoir en niet onder het reservoir. Daarmee is het risico op zout oplossing bij breuken lager dan in Twente.

### 3.3.3 Risico van zoutoplossing in het veld

Dit risico is verder uitgewerkt linksonder in de bow-tie van Appendix 1.

Threat: cross-flow ZeZ2C/ZeZ3C allows fresh water to run past ZeZ2H

Barrier in Drenthe: As there is no ZeZ3C there is no risk of cross flow from ZeZ2C to ZeZ3C (Ref 11 Ch 11.1)

In het Schoonebeek gasveld speelt het cross flow scenario geen rol omdat er slechts één injectie reservoir aanwezig is.

Threat: fresh water flows via fracture network across bottom of ZeZ-carbonate into juxtaposed ZeZ-carbonate and flows away from it via same fracture network

Barrier in Drenthe: As there is no ZeZ3C there is no risk of cross flow from ZeZ2C to ZeZ3C (Ref 11 Ch 11.1)

In het Schoonebeek gasveld geldt dit scenario niet voor het Schoonebeek gasveld omdat zich daar geen haliet onder het carbonaat reservoir bevindt.

Threat: water assembles in flanks of reservoir where over time a convection cell is set up dissolving overlying juxtaposed Halite. Consequently, saline water flows downward and fresh water rises

Barrier: convection can only start when sufficient juxtaposed halite has dissolved through diffusion, which is a very slow process (tens of thousands of years)

Na verloop van tijd is het injectie reservoir vol. Dit kan enkele jaren tot enkele tientallen jaren duren. Daarna worden de putten opgeruimd en stopt de stroming in het reservoir. De primaire barrière tussen het opgeslagen injectiewater en het haliet is de tussenliggende onoplosbare anhydriet laag. Indien er toch ergens contact is tussen het stilstaande injectiewater en het haliet (bijvoorbeeld bij een breuk), dan kan dit haliet in eerste instantie alleen oplossen door diffusie, wat een zeer traag proces is. Model berekeningen laten zien dat het tienduizenden jaren duurt voordat er voldoende haliet opgelost kan zijn om een convectie stroom op gang te brengen (Ref 1) die tot verdere oplossing zou kunnen leiden.

Barrier Twente: low kv/kh in rock matrix and in faults significantly slows convection

In Twente zijn de eigenschappen van het reservoir zodanig dat water makkelijk horizontaal door de lagen kan stromen, maar slechts heel moeilijk en langzaam verticaal kan stromen. Dit komt primair door de aanwezigheid van afdichtende horizontale anhydriet laagjes in het kalksteen reservoir zelf (Ref 2). De beperkte verticale stroming maakt dat verdere oplossing door convectie, als het al op zou kunnen treden, ook zeer langzaam verloopt, in de orde van duizenden tot tienduizenden jaren (Ref 1).

Barrier: if present, the remaining reservoir gas will accumulate at top reservoir preventing contact of fresh water with Halite

Na injectie zal het nog in het reservoir aanwezige gas migreren naar de top van het reservoir terwijl het water naar beneden zakt. Mocht er toch lokaal contact zijn tussen het reservoir en het haliet daar boven, dan kan het gas een barrière vormen tussen het injectiewater en het haliet. Hierdoor wordt zout oplossing op de hoger gelegen delen van het injectie reservoir bemoeilijkt. Dit mechanisme zorgt er tevens voor dat ontsnapping van gas naar hoger gelegen lagen als gevolg van zout oplossing fysisch onrealistisch wordt geacht.

Barrier: Injected water will be distributed effectively across the fractured Carbonate such that only a small amount of water is present to form a convection cell

Als convectie toch op gang zou komen, dan wordt verwacht dat het een lokaal fenomeen is, bijvoorbeeld bij een breuk. In de directe omgeving van zo'n breuk is de hoeveelheid water beperkt. Het is zeer onwaarschijnlijk dat een significante hoeveelheid zout zal oplossen binnen een relevante tijdschaal ten gevolge van waterinjectie in de Zechstein kalksteen reservoirs.

### 3.4 Mogelijke gevolgen en mitigerende maatregelen

Verschillende risicoscenario's zijn beschreven, waaronder het scenario dat tijdens de waterinjectie lekkage plaatsvindt vanuit de injectieput (zie ook hoofdstuk 5) of vanuit het reservoir in de directe omgeving van de injectieput (dit hoofdstuk). De conclusie daarbij is dat migratie van injectiewater via of nabij de put als scenario niet geheel ondenkbaar is. In de navolgende paragrafen is dit verder uitgewerkt. Hierbij is gekeken naar een drietal mogelijke gevolgen:

1. Verspreiding van stoffen resulterend in grondwatervervuiling
2. Ontsnapping van gas naar het maaiveld
3. Sterke lokale bodemdaling in de vorm van sinkholes

Daarnaast zijn scenario's bekeken waarbij zoutoplossing plaats zou kunnen vinden in het veld ver bij de injectieputten vandaan. Het is zeer onwaarschijnlijk dat daar een grote hoeveelheid zout zal oplossen binnen een relevante tijdschaal. Om de mogelijke gevolgen in het geval van extreme zoutoplossing te testen zijn modelberekeningen verricht aan een van de Twente reservoirs (Tubbergen) waarbij aangenomen is dat overal het Carbonaat reservoir direct in contact staat met het steenzout zodat een maximale (niet realistische) zoutoplossings situatie nagebootst wordt (Ref 3). Die studies laten zien dat in het meest extreme geval op een termijn van duizenden jaren zoutoplossing zou kunnen optreden. Hierbij wordt minder dan 1% van het totale volume van de zoutlaag boven het reservoir opgelost, wat inhoudt dat zelfs in dit extreme scenario de integriteit van de afdekkende zoutlaag gegarandeerd blijft. De studie laat ook zien dat deze bodemdaling zich zal manifesteren aan het oppervlak als een geleidelijke komvormige verzakking met een diameter van ongeveer 5 kilometer die op zijn diepste punt een diepte heeft van ca. 12-14 cm. Er is geen sprake van lokale verzakkingen. Gezien de zeer lange tijdsduur (duizenden jaren) en de relatief beperkte effecten is dit scenario niet verder uitgewerkt.

### 3.4.1 Verspreiding van stoffen

Mitigation: small cavities formed by salt dissolution are quickly filled by salt creep. Salt is derived from a wider area, so that the halite seal remains intact

Op de diepte van de injectiereservoirs is het steenzout plastisch. De druk in het plastische zout is altijd hoger dan de druk in het injectiewater. Indien er ondanks alles toch holten in het zout ontstaan bij of nabij een injectieput, dan zullen deze weer gevuld worden door zout kruip, waarbij zout toestroomt vanuit de wijde omgeving. De eventueel gevormde holte wordt dus weer 'dichtgedrukt', waardoor zich geen grote holte kan vormen. De vorming van cavernes of sinkholes aan het oppervlak wordt door dit verschijnsel fysisch onrealistisch geacht (Ref 15). Hierdoor worden geen lokale verzakkingen verwacht en blijft de afdekkende werking van het zout intact. Dit effect is relatief sterk in het Schoonebeek gasveld omdat de snelheid van zout kruip hoger is op grotere diepte (en gerelateerde hogere temperatuur).

Mitigation: Perform PNL logging to establish whether salt dissolution behind liner is occurring. Straddle poor liner sections and/or perform cement squeezes. If required, shut in and abandon the well

Door regelmatige inspectie van de putten kan zout oplossing langs een put gedetecteerd worden, en kan bijtijds ingegrepen worden. Bijvoorbeeld door reparatie of abandonering van de injectieput. Voor de detectie van zout-oplossing op enige afstand van putten is geen directe monitoring methode beschikbaar. Sampling van formatiewater ter kalibratie van zout-oplossing modellen is soms gesuggereerd als mogelijkheid. Echter, het mengproces van het relatief zoete injectiewater met het zoute formatiewater en de resulterende drie dimensionale verdeling van zoutconcentraties is bijzonder complex en moeilijk voorspelbaar. Derhalve kunnen aan een beperkt aantal metingen van de actuele zout-concentratie in het reservoir geen conclusies verbonden worden over de validiteit van scenario's en modellen.

Mitigation: average reservoir pressure is kept below hydrostatic during most of the injection period. In case the halite seal is breached, leakage will be in the opposite direction. i.e. from the overburden into the reservoir.

De gemiddelde druk in het reservoir blijft ten alle tijden onder de oorspronkelijke druk en gedurende bijna de gehele injectieperiode ook beneden de hydrostatische druk. In het onwaarschijnlijke geval dat de afdekkende haliet-laag toch doorbroken wordt, zal in de meeste gevallen lekkage in omgekeerde richting plaatsvinden: van de hoger gelegen hydrostatische zandsteen lagen naar het onder lagere druk staande kalksteen injectie reservoir.

Mitigation: a thick package of claystones in the Lower Triassic/Bunter formation above the Zechstein halite formation is secondary seal that prevents upward migration into the biosphere

Indien de druk in het gelekte injectiewater toch hydrostatisch of hoger zou zijn, dan vormen de hoger gelegen kleisteen lagen van het onder Trias (Bunter formatie) een bewezen afdekkende laag van duizenden meters tussen het injectiewater (~3000m diep) en de biosfeer (<500m diep). Deze en de hierop volgende barrières gelden ook voor eventuele lekkage door de verbuizing van putten (zie hoofdstuk 5).

Mitigation: laterally extensive sandstone layers between the Lower Triassic/Bunter claystone will accommodate water, thereby relieving overpressure and removing the mechanism behind further upward migration.

Mitigation: additional claystone layers in the Triassic, Jurassic, and Cretaceous provide barriers against injection water migration into fresh groundwater bearing layers

Zelfs als een of enkele van deze kleilagen door onverwacht hoge druk doorbroken zouden worden, dan kan het water opgevangen worden in de lateraal uitgestrekte zandsteen lagen in de Bunter formation, waarmee de druk afneemt en de kans op verdere doorbraak naar hoger gelegen lagen ook afneemt. Ook in de bovenste 500 meter (biosfeer) komen veel afdekkende klei/kleisteelagen voor.

Consequence: loss of containment resulting in widespread contamination of groundwater or drinkwater

Mocht er ondank alles toch injectiewater in het grondwater terecht komen dan moet met het volgende rekening worden gehouden:

- Het productiewater komt vanuit een hogere druk in een gebied met lagere druk, waardoor stoffen in de gasfase kunnen vrijkomen en een emissie veroorzaken van mogelijk brandbare gassen en ook van broeikasgassen
- Er zitten afbreekbare componenten in, zoals aromatische koolwaterstoffen en minerale olie. Dit afbreken zal niet plaatsvinden op grote diepte, door het ontbreken van zuurstof en nutriënten, maar wel als het productiewater naar de oppervlakte komt waar het grondwater zuurstofrijker is. Het kan ook worden gestimuleerd door middel van het toedienen van nutriënten en zuurstof.
- De stoffen zoals aromatische koolwaterstoffen en minerale olie zijn gevaarlijk voor mens, dier en plant. Zout heeft invloed op micro-organismen en planten.
- Tevens kunnen in het productiewater toegevoegde stoffen aanwezig zijn die niet of nauwelijks afbreken, zoals inhibitors. Voor deze stoffen dient een specifieke inventarisatie te worden uitgevoerd.

Mitigation: Groundwater velocity is very low, usually a few meters per year

Mitigation: groundwater monitoring is performed around all well locations so that contamination is detected in a timely manner

De verontreiniging kan zich zowel horizontaal als verticaal verplaatsen. Dit is mede afhankelijk van eventuele onttrekkingen in de omgeving en het volume water dat vrijkomt. Grondwaterstroming is relatief traag, in de regel een paar meter per jaar. Lokaal zijn hogere snelheden wel mogelijk. De verspreiding zal zodoende pas na een aantal jaren wat grotere afmetingen hebben. Hoe sneller de verontreiniging wordt ontdekt, des te effectiever kan de verontreiniging worden gesaneerd. In de omgeving van iedere putlocatie staan peilbuizen waar het grondwater gemonitord wordt. Indien een verontreiniging gevonden wordt, kan sanering plaatsvinden.

Mitigation: Remediation can take place by extracting groundwater and reinjection after treatment

Sanering van een diepe grondwaterverontreiniging bestaat er over het algemeen uit dat het water uit de omgeving wordt onttrokken. Afhankelijk van de kwetsbaarheid van de omgeving voor verlaging van stijghoogten, kan dit in combinatie met retourbemaling worden uitgevoerd.

### 3.4.2 Ontsnapping van gas en bodemdaling

Consequence: loss of containment resulting in gas release to surface

Consequence: significant localized subsidence due to sinkholes, leading to damage to buildings, infrastructure or environment

Naast het risico op verontreiniging van grondwater bestaat de zorg dat het oplossen van zout zou kunnen leiden tot cavernes, welke uit zouden kunnen groeien tot sinkholes aan het oppervlak. Dergelijke cavernes zouden ook een ontsnappingsroute bieden voor het nog in het reservoir aanwezige gas. De vorming van cavernes of sinkholes aan het oppervlak is bijzonder onwaarschijnlijk en wordt door TNO fysisch onrealistisch geacht (Ref 15). Desondanks is het scenario onder verder uitgewerkt.

Mitigation: gas has the tendency to migrate to the top, pushing water downward, thereby inhibiting upward salt dissolution

Gas zal door de lagere dichtheid naar boven te stijgen, waarbij het water naar beneden geduwd wordt. Daarmee wordt opwaartse zout oplossing bemoeilijkt. Zodoende wordt ook de kans op gas-migratie naar hoger gelegen lagen sterk gereduceerd. Bovendien gelden de bovengenoemde barrières voor injectie water (relatief lage drukken en afdichtende kleisteelagen) tevens voor gas.



Mitigation: In the unrealistic case that a salt cavern is formed, upward growth will stop at the top of the Zechstein salt. This is overlain by a package of >1000m claystones and sandstones. In case of collapse and upward cavern migration, the cavern size will reduce significantly.

In een hypothetische situatie dat er toch een zout caverne zou ontstaan, dan kan deze niet verder groeien dan de top van de Zechstein haliet formatie op een diepte van zo'n 3000 meter in Schoonebeek. Indien een dergelijke caverne in zou storten, dan migreert de caverne naar boven. Tijdens deze migratie zal het volume sterk afnemen.

Mitigation: perform satellite (InSar) measurements to detect and measure subsidence in time

Mitigation: reduce or stop injection rate in wells/fields where unacceptable subsidence is measured

Door middel van Insar monitoring is het mogelijk om vroegtijdig kleine bodembewegingen te detecteren. Zodoende zou het hypothetische ontstaan van een sinkhole vroegtijdig opgemerkt kunnen worden zodat maatregelen getroffen kunnen worden zoals het stoppen van waterinjectie.

### 3.5 Onafhankelijke expert reviews

De NAM rapporten over zout oplossing risico (Ref 1-3) zijn door SodM onderworpen aan onafhankelijke reviews door de universiteiten van Clausthal en Parijs (ParisTech) (Ref 10):

Conclusie review prof. Hou, Clausthal m.b.t. de zoutrapporten:

*“Based on my review of all three reports, it can be concluded that the study assumptions are conservative or even too conservative; modelling approaches and conclusions are logic, realistic and acceptable; the long term stability of the halite seal (e.g. cavern development, breach of confinement) due to the halite dissolution in the low salt-saturated injection water is confirmed; and the reported large scale volumes of fresh water injection in the Zechstein carbonate reservoirs (ZEZ2C & ZEZ3C) can be a sustainable safe operation in the long-term (more than 1,000 years).”*

Conclusies review team Dr Bruel, Parijs m.b.t. de zoutrapporten:

*“Our feeling is that the safety of the long-term storage is not questioned”*

*“A common survey consisting in (of) water wells monitoring combined with time series of satellite-based measurements of the surface deformation will be sufficient in the early phase to ensure that the storage behaves as expected.”*

Daarnaast heeft TNO op verzoek van het ministerie van economische zaken een additionele verificatie uitgevoerd (Ref 15). Conclusies van TNO m.b.t. zoutoplossing:

*“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”*

## 4 Geïnduceerde bevingen als gevolg van waterinjectie

### 4.1 Top event

#### UNWANTED SEISMIC EVENT due to water injection

Aardbevingen of trillingen kunnen ontstaan door spanningsveranderingen door productie of injectie in de diepe ondergrond. Vooral injectie nabij bestaande breukzones kan leiden tot beweging van deze breuken, wat wordt aangeduid als re-activatie van de breukzone. De bewegende gesteentelagen kunnen trillingen en aardbevingen veroorzaken.

#### Aardbeving studies

In de MER in 2006 is al aandacht besteed aan de effecten van bodembewegingen (daling en trillingen) indien water geïnjecteerd wordt. De MER concludeerde dat de injectiereservoirs in Twente niet eerder seismisch actief zijn geweest en dat, zolang de gemiddelde reservoir druk beneden de oorspronkelijke reservoirdruk blijft, er dan ook geen trillingen als gevolg van waterinjectie worden verwacht. Het feit dat 11 jaar waterinjectie in Twente niet tot aardbevingen heeft geleid is in overeenstemming met de conclusies uit de MER.

In 2015 is een meer uitgebreide risicoanalyse uitgevoerd (Ref 4). Deze gaat in op de belangrijkste factoren in de ondergrond die mogelijkerwijs zouden kunnen leiden tot het optreden van bodemtrillingen (aardbevingen) als gevolg van waterinjectie. Daarna wordt de relevantie van deze factoren getoetst aan de ondergrondse condities zoals bekend in Twente. Op basis van een systematische kwalitatieve inschatting van factoren die het optreden van aardbevingen zouden kunnen beïnvloeden en de conditie van de ondergrond bevestigt deze nadere analyse dat de kans klein is dat aardbevingen zich in Twente in de toekomst zullen voordoen.

Als onderdeel van het Tussenrapport van de 2016 Herevaluatie water injectie (Ref 11) is een kwalitatieve analyse gemaakt van de seismische dreiging in verschillende velden in zuidoost Drenthe (Ref 17). In zuidoost Drenthe is de seismische dreiging iets hoger dan in Twente omdat er voelbare aardbevingen geweest zijn tijdens gasproductie, het temperatuurverschil tussen het reservoirgesteente en het injectiewater hoger is en de breuken in de Drenthe velden groter zijn. Echter, vanwege de diepere ligging van de velden in Drenthe zal daar de impact van mogelijke bevingen op de bovengrond kleiner zijn.

Tenslotte is in 2021 en 2022 een studie uitgevoerd naar de seismische risico's door injectie in het Schoonebeek gasveld. De hoofdconclusie is dat het seismisch risico bij waterinjectie lager wordt ingeschat dan tijdens de gasproductiefase (Ref 19).

### 4.2 Bow-tie analyse

Appendix 2 laat een bow-tie analyse zien van de mogelijke oorzaken en gevolgen die ten grondslag liggen aan een onverwachte beving als gevolg van waterinjectie. De meest extreme uitkomst zou kunnen zijn dat er schade aan gebouwen en infrastructuur op zou kunnen treden.

### 4.3 Mogelijke oorzaken en barrières

#### Threat: pressure increase leads to seismicity

Wereldwijd is gebleken dat waterinjectie slechts in incidentele gevallen aardbevingen veroorzaakt. Uit een door TNO uitgevoerde vergelijking van velden waar door waterinjectie wel bodemtrillingen zijn voorgekomen, blijkt dat in nagenoeg al deze gevallen de druk in het reservoir gedurende de injectie was toegenomen tot niveaus die boven de oorspronkelijke druk van het veld liggen (Ref 8).

Barrier: Carry-out static pressure measurements (SPTG's) annually in each well to measure actual local reservoir pressure avoiding that initial reservoir pressure is not exceeded.

Barrier: wells are shut-in or injection is reduced in case reservoir pressure appears to increase to rapidly or is close to initial reservoir pressure

Bij de waterinjectie in Nederland schrijven de verleende vergunningen voor dat de gemiddelde reservoirdruk onder de oorspronkelijke reservoirdruk dient te blijven. Deze vergunningsvoorwaarde en

de monitoring die op basis hiervan plaatsvindt (Ref 5) zijn belangrijke voorzorgsmaatregelen om dit risico te beperken en te monitoren. Indien een situatie met onverwacht hoge injectiedrukken ontstaat, zullen de modellen geëvalueerd worden, met name m.b.t. de validiteit van onderliggende gegevens en aannames over put configuratie, reservoir eigenschappen en reservoir-dimensies. Op basis hiervan wordt de injectiesnelheid teruggenomen of wordt de put ingesloten.

Zolang de druk beneden de initiële druk blijft is de kans op aardbevingen laag. Echter, ook bij lagere drukken is het “triggeren” van aardbevingen niet geheel uit te sluiten. De kans daarop hangt af van de spanningstoestand van het reservoirgesteente. Om een aardbeving te genereren moet een breukvlak in de diepe ondergrond in een kritieke spanningstoestand komen. Echter gedurende de 55 jaar van gasproductie en de eerste 11 jaar van waterinjectie zijn geen trillingen geregistreerd in de regio Twente. In zuidoost Drenthe zijn voelbare aardbevingen geweest als gevolg van gasproductie, Echter, gedurende meer dan 10 jaar water injectie in de velden Schoonebeek, Coevorden en Dalen waarbij ca 10 mln m3 water is geïnjecteerd (vergelijkbaar met Twente) zijn geen aardbevingen geregistreerd die gerelateerd kunnen worden aan water injectie (Ref 19).

**Threat: direct injection of water into faults leads to seismicity.**

Een andere factor die bijdraagt aan het risico voor aardbevingen is als direct in of in de directe nabijheid van grote en tektonisch actieve breuken geïnjecteerd wordt. In de wijde omgeving van Zuidoost Drenthe is nog nooit een natuurlijke aardbeving geregistreerd. Breuken in de diepe ondergrond zijn niet herkenbaar in de topografie aan het maaiveld. Omgekeerd zijn duidelijke langgerekte hoogteverschillen zoals de Hondsrug niet gerelateerd aan breuken (Ref 18).

**Barrier: avoid that injection occurs directly into a fault. Improve accuracy of hypocentre location**

De kans op aardbevingen wordt verder teruggedrongen door uitsluitend gebruik te maken van putten die niet in of nabij (gekarteerde geologische) breuken staan. In 2020 werd een mechanische breuk geconstateerd in de casing van waterinjectieput ROW-2 (Ref 21). Mogelijk is deze veroorzaakt door beweging langs een kleine geologische breuk die op de 3D seismische interpretatie op een afstand van ca 50 meter ligt (Ref 2). Deze put is definitief buiten gebruik genomen.

**Threat: cold water leading to thermal stresses and inducing seismicity**

**Barrier: legacy shows no seismicity related to cold water injection in the Netherlands**

Een derde factor die mogelijk van belang is, is het temperatuurverschil tussen het injectiewater en de reservoirtemperatuur. Als dit temperatuurverschil groot is, zou het koude water mogelijk tot spanningssituaties in het reservoir kunnen leiden, wat breuken instabiel zou kunnen maken. Vanwege de diepere ligging van het Schoonebeek Zechstein reservoir is het temperatuurverschil daar groter dan in Twente. In Ref 19 is daarom verder gekeken naar het effect van temperatuur op de mogelijke verklaring van bevingen in het verleden door waterinjectie. Uit de studie blijkt dat de zone van afkoeling beperkt blijft en dat de kleine bevingen die zijn waargenomen in zuidoost Drenthe verklaard kunnen worden door de gasproductie en niet door de waterinjectie.

**Threat: poor understanding of physics and input parameters**

**Barrier: install improved seismic and accelerometer network**

**Barrier: calibrate model with best available information and actual data measured when an event occurred (Ref 9)**

Het begrip van de bovengenoemde bedreigingen en de effectiviteit van de genoemde barrières is afhankelijk van de voorspelende waarde van modellen. Daarom is rond Schoonebeek een uitgebreid seismisch monitoring netwerk geïnstalleerd door de installatie van 7 additionele seismometers. De minimale sterkte van de bevingen die door dit netwerk kan worden geregistreerd ligt tussen de  $M=0,5$  en  $M=1,0$ .

Eventuele lichte trillingen die niet tot schade leiden kunnen wel gebruik worden om modellen te kalibreren. Met betere modellen kunnen de andere barrières verder versterkt worden zodat de kans op een top even met een hogere magnitude verder gereduceerd wordt.

## 4.4 Mogelijke gevolgen en mitigerende maatregelen

**Consequence: damage to buildings and environment; safety**

**Mitigation: Maintain protocol ('traffic light'-system) defining actions to be taken in time when event with a certain magnitude is detected.**

Mitigation: adjust injection volume into wells/reservoirs that show high reservoir pressure or reservoir pressure increase. In case an event with  $M > 3$  is measured, water injection will be stopped in the most near-by well(s) and way forward will be discussed and agreed with Authorities

Eventuele metingen met het geofonnetwerk zijn gekoppeld aan het seismisch risico beheers systeem. Dit risico management plan koppelt mogelijke observaties (lees: geregistreerde bevingen) aan beschermende maatregelen. Afhankelijk van de sterkte van de aardbeving zullen modellen worden geactualiseerd, kan injectiesnelheid worden teruggenomen, of kunnen injectieputten stilgelegd worden. Voor de waterinjectie in Schoonebeek is een seismisch risicobeheersplan geschreven (Ref 20). Mogelijke schade wordt afgehandeld via de onafhankelijke commissie mijnbouwschade<sup>4</sup>.

## 4.5 Onafhankelijke expert reviews

Het NAM rapport over aardbevingsrisico (Ref 4) is door SodM onderworpen aan een onafhankelijke review van de US Geological survey (Ref 10).

Conclusie review Dr William L. Ellsworth, U. S. Geological Survey m.b.t. het aardbevingsrapport:

*"It should be possible to safely dispose of wastewater in the depleted gas fields of the Twente, but this must be done with monitoring and safeguards in place"*

Dr. Ellsworth doet ook een observatie:

*"Should even such small earthquakes occur (ML 0.5-1.0), they would be a clear indication that conditions in the reservoir were not what was assumed..."*

Daarnaast heeft TNO op verzoek van het ministerie van economische zaken een additionele verificatie uitgevoerd (Ref 15). Conclusies van TNO m.b.t. aardbevingen:

*"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"*

NAM heeft deze aanbevelingen overgenomen in de seismische risicobeheersplannen die gelden voor Schoonebeek en Twente.

<sup>4</sup> <https://www.commissiemijnbouwschade.nl/>

## 5 Vrijkomen van water als gevolg van verminderde put-integriteit

### 5.1 Top event

Putlekkage Tijdens water injectie

### 5.2 Bow-tie analyse

Bij waterinjectie van productiewater wordt gebruik gemaakt van bestaande putten, en NAM is voornemens nieuwe waterinjectie putten te gaan boren. Om het risico van putlekkage in kaart te brengen is er een bow-tie analyse gedaan. Appendix 3 laat de bow-tie analyse zien van de mogelijke oorzaken en gevolgen die van toepassing kunnen zijn bij een scenario met put-lekkage tijdens waterinjectie. De oorzaken en gevolgen die specifiek betrekking hebben op het oplossen van steenzout ten gevolge van een put-lekkage zijn in deze analyse buiten beschouwing gelaten omdat deze risico's in een aparte analyse beschouwd zijn (Hoofdstuk 3 en Appendix 1). Naast de mogelijke oorzaken en gevolgen zijn de barrières en beschermende maatregelen beschreven waardoor de risico's van put-lekkage tijdens waterinjectie geminimaliseerd worden. In deze risico analyse wordt uitgegaan van een generieke put configuratie.

### 5.3 Mogelijke oorzaken en barrières

Barrière: Lekkage naar de ondergrond wordt voorkomen door een of meerdere metalen buiswanden van de vaste putconstructie.

Waterinjectie geschiedt via putten die zijn opgebouwd uit meerdere metalen buizen die door cement op hun plaats worden gehouden. Binnen deze vaste put-constructie bevindt zich een vervangbare injectiebuis waardoor het water daadwerkelijk geïnjecteerd wordt. Aan de onderkant van de injectiebuis verzorgt de productiepacker een afdichting tussen de injectiebuis en de vaste putconstructie. De productiepacker bevindt zich vlak boven het injectiereservoir. Door het injectiereservoir zit typisch 1 metalen buis die eveneens door cement op zijn plaats wordt gehouden. In deze buis zijn gaten geschoten (perforaties) om verbinding met het injectiereservoir te krijgen. Door de putconstructie zoals hierboven beschreven wordt het grondwater in de ondiepe ondergrond door 3 of 4 metalen buiswanden gescheiden van het injectiewater. Figuur 5 toont een schematische weergave van een typische putconfiguratie voor een kandidaat put voor waterinjectie.

Lekkende afsluiter

Lekkende wellhead

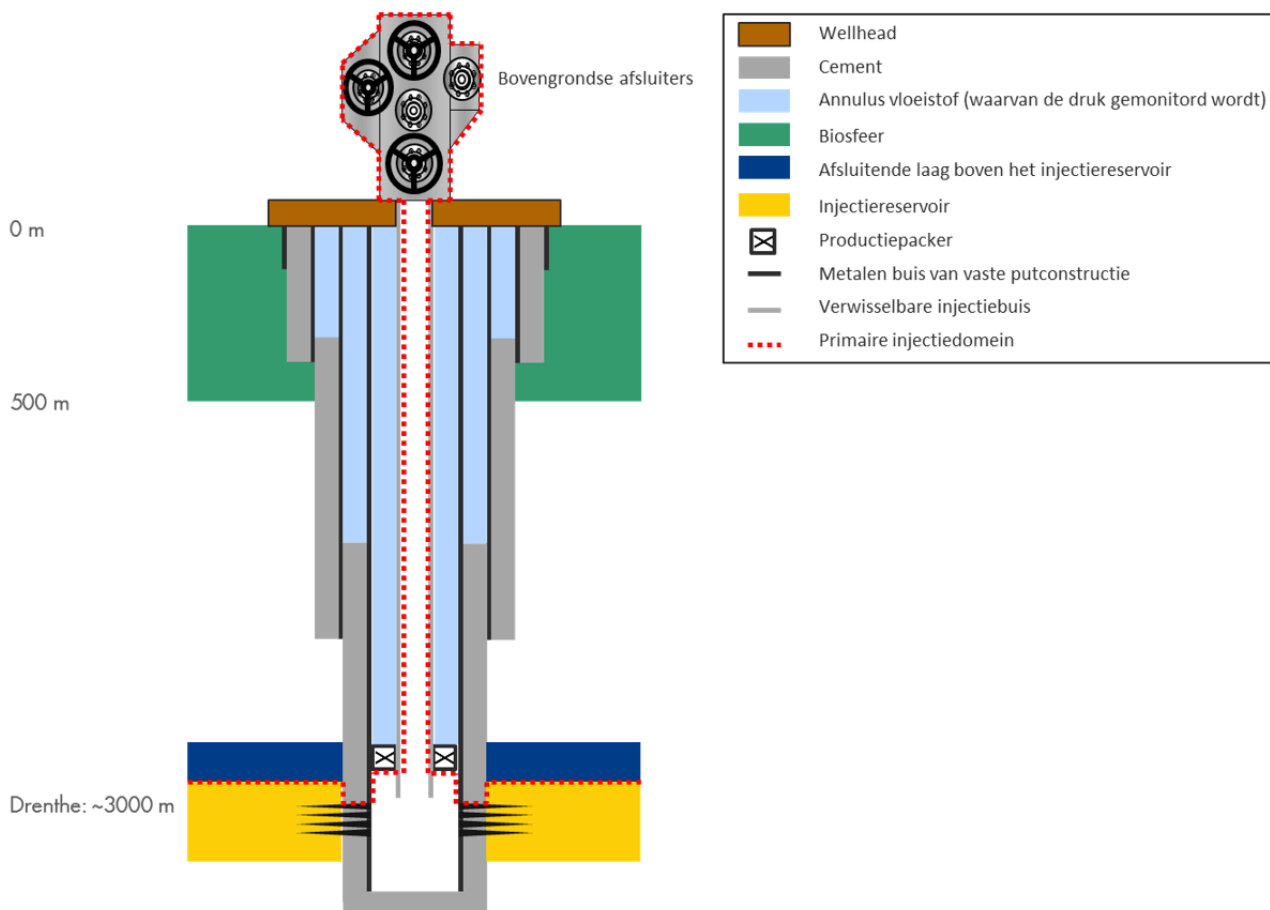
Lekkende injectiebuis door corrosive

Lekkende productiepacker, SPM of SSD

Casing lekkage (i.e. squeezing salt of tectonische breuk activiteit)

Liner/casing lekkage onder de productie packer door corrosie

In de bow-tie analyse zijn de initiële dreigingen gedefinieerd als een lekkage van een van de onderdelen in het primaire injectiedomein (rode stippellijn in Figuur 5). Van boven tot onder wordt er onderscheid gemaakt in lekkages van afsluiters, de wellhead, de productiebuis, de productiepacker, de vaste putconstructie onder de productiepacker en de afsluitende laag van het injectiereservoir. Deze dreigingen zijn beschreven in de linkerkant van de bow-tie.



Figuur 5: Schematische weergave van een typische putconstructie

Het converteren van een gasproductieput naar een waterinjectieput heeft geen grote invloed op het soort risico's en daaraan verbonden beheersmaatregelen. De beheersingsmaatregelen voor deze risico's zijn daarom veelal hetzelfde als voor NAM's bestaande productie- en injectieputten. Alle (waterinjectie)putten zijn geconstrueerd volgens interne standaarden en worden zodanig geopereerd dat de putintegriteit gewaarborgd wordt. De door NAM gehanteerde standaarden zijn consistent met en in vele gevallen zelfs strenger dan de geldende wettelijke voorschriften en richtlijnen.

Barrière: Jaarlijkse inspectie en onderhoud (WIT)

Barrière: 2 Jaarlijkse inspectie en onderhoud (SIT)

Barrière: In de X-mastree en wellhead worden meerdere barrières gehanteerd, waardoor het falen van een barriere niet leidt tot een externe lekkage

Bovengrondse lekkages bij de put worden voorkomen door regelmatige inspecties en onderhoud aan de afsluiters en aan de wellhead. Daarbij is het ontwerp zodanig dat er altijd meerdere barrières bestaan (bijvoorbeeld dubbele afdichtingen) zodat het falen van 1 afdichting niet kan leiden tot een externe lekkage.

Barrière: Het binnentreden van zuurstof kan worden voorkomen door gebruik van bijvoorbeeld injectiekleppen

Barrière: Gebruik van corrosie inhibitie

Bij het boren van een nieuwe injectieput kan de materiaalkeuze worden afgestemd op corrosie. De conversie van gasproductieput naar waterinjectieput houdt in dat de materialen blootgesteld worden aan andere vloeistoffen en operationele condities. Dit heeft met name consequenties voor risico's die gerelateerd zijn aan corrosie. Om de kans op corrosie te minimaliseren zullen maatregelen getroffen moeten worden om de hoeveelheid opgeloste zuurstof in het injectiewater te minimaliseren en het intreden van zuurstof in de put zo veel mogelijk te voorkomen (zoals bijvoorbeeld het gebruik van injectiekleppen). Daarnaast is het monitoren van corrosie een belangrijke maatregel die helpt om de risico's op putlekkage verder te beperken.

Barrière: Gebruik van corrosie inhibitie
Barrière: Frequent monitoren van corrosie voordat een lekkage optreed (calliper)

Ondergrondse putlekkage wordt voorkomen door het minimaliseren van de kans op corrosie (bijvoorbeeld door het beperken van het binnendringen van zuurstof). Ook door regelmatige inspecties van de injectiebuis en de productie casing onder de productie packer wordt de kans op een ondergrondse lekkage geminimaliseerd. Als er onverhoopt toch een lekkage van de injectiebuis optreedt, dan wordt een lekkage van productiewater naar de ondergrond voorkomen door de eerdergenoemde meerwandige constructie van de put. Pas als er meerdere barrières tegelijkertijd falen kan dit leiden tot een externe putlekkage.

Lekkage door scheurvorming in het afsluitende gesteente van het injectiereservoir.
<b>Zie linkerzijde bow-tie "loss of containment due to salt dissolution"</b>

Lekkage door scheurvorming in het afsluitende gesteente van het injectiereservoir wordt voorkomen door met een gecontroleerde dynamische injectiedruk rond de put in het reservoir te werken. De druk waarbij mogelijke scheurvorming in de afsluitende laag boven het reservoir kan optreden wordt berekend aan de hand van geomechanische eigenschappen van het gesteente. Op basis daarvan wordt de maximale dynamische injectiedruk berekend. Om veilige operaties te garanderen wordt een lagere maximaal toegestane druk bepaald door een ruime veiligheidsmarge aan te nemen. Deze maximale ondergrondse injectiedruk wordt vervolgens vertaald naar een maximale bovengrondse injectiedruk. Een beveiliging in het pompsysteem zal ervoor zorgen dat de pomp automatisch afslaat mocht deze maximale injectiedruk overschreden worden. Indien er onverwacht toch een scheur door het afsluitende anhydriet ontstaat komt het injectiewater in contact met het Zechstein haliet, wat kan leiden tot het oplossen van zout. Dit scenario is verder uitgewerkt in hoofdstuk 3 en de bijbehorende bow-tie in appendix 1.

Liner/casing lekkage onder de productie packer (i.e. squeezing salts, interbed slip)
<b>Zie linkerzijde bow-tie "loss of containment due to salt dissolution"</b>

Tijdens reparatiewerkzaamheden aan put ROW-2 in 2021 is geconstateerd dat de buitenbuis ter hoogte van het bovenste van de twee injectiereservoirs is gescheurd. Hierbij is de binnenbuis intact gebleven en is er geen injectiewater gelekt. Er is geen gevaar geweest voor mens en milieu. Wel is gebleken dat het monitoring systeem onvoldoende was toegerust om het defect te detecteren. Daarom is het monitoring systeem verder aangescherpt om sneller en nauwkeuriger interventies te kunnen doen na afwijkingen in metingen. Dit behelst het continu handhaven van positieve druk op de ringruimte tussen binnen- en buitenverbuizing. Verlies van deze druk initieert een alarm en onderzoek naar oorzaak. Tevens wordt jaarlijks het vloeistofniveau in annulaire ruimte tussen binnen- en buitenbuis gemeten. Deze verbeteringen zijn vastgelegd in het water injectie management plan (Ref 14).

Casing lekkage (interne corrosie)
Barrière: Lage pH annulus vloeistof (thermodynamische bescherming)

Wintershall-DEA opereert het Emlichheim olieveld, de zuidelijke extensie van het Schoonebeek veld in Duitsland. Medio 2019 werd bekend dat Wintershall-DEA via één van hun water injectie putten (EMLH 132), in het ergste geval tot zo'n 220.000 m3 injectiewater had verloren in de ondiepe biosfeer. Deze lekkage werd veroorzaakt door gaten in de binnen- en buitenverbuizing die langere tijd onopgemerkt zijn gebleven. NAM houdt zich aan de beheersmaatregelen van de water injectie putten die zijn overeengekomen met SodM en zijn vastgelegd in Ref. 14. Vergeleken met het beheer van Wintershall-DEA ten tijde van voor de 2019 lekkage hanteert NAM een aantal maatregelen die een lekkage in de ondiepe ondergrond in NAM injectieputten zeer onwaarschijnlijk maken. Zo wordt een annulus vloeistof met een lage Ph gebruikt om corrosie te voorkomen, worden jaarlijks metingen verricht aan de integriteit van de binnenbuis, en worden putten uit voorzorg buiten gebruik genomen wanneer een onregelmatigheid aangetroffen wordt in de metingen.

Casing lekkage (i.e. squeezing salt of tectonische breuk activiteit)
Barrière: Materiaal keuze (i.e. MUST casing standaard sinds 1979)

Tijdens abandonment werkzaamheden op de Schoonebeek-447 put (SCH-447) in maart 2021 bleken zowel de casing (buitenste buis) als ook de tubing (binnenste buis; opvoer serie van olie) in de put dermate vervormd te zijn dat er geen diepere toegang in de put mogelijk was. Schoonebeek-447 is sinds 2012 uit productie. NAM heeft een onderzoek naar de oorzaak uitgevoerd middels een zogenaamde

'Root Cause Analysis (RCA)' (Ref 21). Algemeen kan worden geconcludeerd dat het bij SCH-447 gaat om vervorming van de casing en tubing ter hoogte van het geologisch aanwezige natuurlijke zout in de bodem ('Röt-zoutpakket') op een diepte van circa 2km. Deze vervorming is hoogst-waarschijnlijk op die diepte ontstaan door zoutvloeï. Zoutvloeï is een langzaam proces onder invloed van temperatuur en geologische drukverschillen. Door vloeï van het zout tegen de buitenkant van de casing heeft het de buitenbuis van SCH-447 plaatselijk ingedrukt en uiteindelijk ook de tubing. De krachten tengevolge van deze beweging zijn in later geboorde putten gemitigeerd door de toepassing van dubbele en/of zwaardere verbuizing; alle putten in de nabijheid van SCH-447 dateren van na 1974 en zijn met een dubbele buitenbuis uitgevoerd en sinds 1979 voorzien van extra versterkte casing ('Must casing') ter hoogte van het Röt-zoutpakket.

## 5.4 Mogelijke gevolgen en mitigerende maatregelen

### Consequentie: Verontreiniging van grondwater en oppervlakte water

Als er een externe putlekkage optreedt, dat wil zeggen een lekkage door de buitenste barrière, kan er injectiewater in de ondergrond komen of op de injectielocatie. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen verontreiniging van oppervlaktewater, verontreiniging van de biosfeer (<500 meter diep) en lekkage in de diepe ondergrond.

Mitigatie: Kleine lekkages worden opgevangen op locatie (putkelder en hoekbak) zodat oppervlakte water niet direct wordt verontreinigd. Door locatie bezoeken van operators kunnen lekkages tijdig worden opgemerkt.

Verontreiniging van oppervlaktewater kan optreden door een lekkage aan het oppervlak. Zoals eerder beschreven, wordt een bovengrondse lekkage bij de put door meerdere barrières voorkomen. Mocht er onverhoopt toch een lekkage ontstaan, dan word deze in eerste instantie opgevangen door de putkelder, en vervolgens in een gesloten systeem van afwateringsgoten die uitkomen op een verzamel reservoir (de hoekbak) op locatie. De locatie vloer is vloeïstofkerend wat lekkage door de vloer heen voorkomt. Door frequente locatie-bezoeken van operators kunnen bovengrondse lekkages tijdig worden opgemerkt, voordat verontreiniging van de omgeving buiten de locatie kan optreden.

Mitigatie: Grondwaterstroming is relatief traag. In de omgeving van iedere putlocatie staan peilbuizen waar het grondwater gemonitord wordt. Indien een verontreiniging gevonden wordt, kan sanering plaatsvinden.

Voor het geval dat er onverhoopt toch injectiewater buiten de locatie terecht komt wordt het grondwater gemonitord met peilbuizen. Grondwaterstroming is relatief traag, in de regel een paar meter per jaar. Lokaal zijn hogere snelheden wel mogelijk. De verspreiding zal zodoende pas na een aantal jaren wat grotere afmetingen hebben. Hoe sneller de verontreiniging wordt ontdekt, des te effectiever kan de verontreiniging worden gesaneerd. In de omgeving van iedere putlocatie bevinden zich peilbuizen waar het grondwater gemonitord wordt. Indien een verontreiniging gevonden wordt, kan sanering plaatsvinden.

Mitigatie: Annulaire drukken worden actief gemonitord zodat een eventuele lekkage wordt geïdentificeerd. Als een onacceptabele putintegriteit wordt geobserveerd wordt de put ingesloten en gerepareerd of zelfs vroegtijdig verlaten.

Voor ondergrondse lekkages geldt dat door de dubbelwandige constructie van de put, waarbij de druk tussen de verschillende verbuizingen (de annuli) gemonitord wordt, interne lekkages vroegtijdig opgemerkt kunnen worden. Alle annulaire drukken worden gemonitord. Als een interne lekkage opgemerkt wordt zal de waterinjectie van de betreffende put tijdelijk of permanent gestopt worden. Indien er ondanks alles toch een externe lekkage boven de productiepacker ontstaat, dan kan het water uiteindelijk in de biosfeer terecht komen. Dit scenario is verder uitgewerkt in hoofdstuk 3 en de bijbehorende bow-tie in appendix 1.

### Zie rechterzijde bow-tie "loss of containment due to salt dissolution"

Mogelijke lekkages beneden de productiepacker kunnen niet opgemerkt worden door middel van veranderende annulaire drukken. Daarom worden voor alle putten inspectieprogramma's vastgesteld die er in voorzien dat de conditie van de ondergrondse verbuizingen regelmatig gecontroleerd worden. Hierdoor wordt de mogelijke afname van de kwaliteit en conditie van de diepe verbuizingen vroegtijdig vastgesteld en kunnen lekkages voorkomen worden. Indien er onverwacht toch een lekkage beneden de productiepacker ontstaat, dan komt het injectiewater in contact met het Zechstein haliet, wat kan leiden tot het oplossen van zout. Ook dit scenario is verder uitgewerkt in hoofdstuk 3 en de bijbehorende bow-tie in appendix 1.



**Monitoring**

De frequentie van monitoring activiteiten is opgenomen in het Water Injectie Management Plan.

**Selectie van putten en materialen**

Bij het gebruik van bestaande gasproductieputten die worden geconverteerd voor waterinjectie in Schoonebeek zal putintegriteit meegenomen worden als selectie criterium. De integriteit wordt gecontroleerd door middel van metingen en analyse. Vervangbare onderdelen kunnen worden aangepast voor waterinjectie, echter de bestaande casing/liner kan niet worden vervangen. Voor de start van waterinjectie zal de operating envelope van de put opnieuw bepaald worden voor de nieuwe injectiecondities. Als een put een (beheerst) integriteitsprobleem heeft, zal het risico onder de nieuwe omstandigheden (injectie) opnieuw in kaart gebracht moeten worden, voordat de waterinjectie gestart wordt.

Voor nieuw te boren waterinjectie putten kan het ontwerp worden geoptimaliseerd voor de gebruiksperiode (i.e. cement, materiaalkeuze).

## 6 Conclusies

---

Ten behoeve van de herontwikkeling van het Schoonebeek olieveld is in 2009 een risicoanalyse als onderdeel van de Milieu Effect Rapportage (MER) uitgevoerd. In de MER is aandacht besteed aan het mogelijk oplossen van de afdekkende steenzoutlaag indien deze laag in aanraking zou komen met het injectiewater wat zou kunnen leiden tot het vrijkomen van injectie water en/of bodemdaling. Ook is aandacht besteed aan effecten van bodembewegingen (daling en trillingen) indien water geïnjecteerd wordt. De MER concludeert dat deze zoutlagen niet of nauwelijks zullen oplossen in het injectiewater en dat er geen bodemdaling of trillingen als gevolg van waterinjectie worden verwacht, zolang de gemiddelde reservoir druk beneden de oorspronkelijke reservoirdruk blijft.

Om hierover aanvullend inzicht te verkrijgen is op verzoek van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) in 2015 een uitgebreidere set onderzoeken gedaan. SodM heeft vervolgens de onderzoeksrapporten laten beoordelen door internationale experts van de US Geological Survey en de universiteiten van Clausthal en Parijs (ParisTech). Deze hebben de conclusies van NAM bevestigd. SodM stelt dat er een groot aantal aanwijzingen is dat waterinjectie in de ondergrond van Twente veilig en verantwoord kan gebeuren.

Daarnaast heeft TNO in 2016 op verzoek van het ministerie van economische zaken een additionele verificatie uitgevoerd m.b.t. het risico op zoutoplossing en aardbevingen. TNO kan zich vinden in de onderzoeksresultaten van NAM.

Latere gebeurtenissen bij put ROW-2 (gebroken buitenbuis) en ROW-4 (meet onregelmatigheid die wijst op beperkte aantasting van Halië) hebben niet geleid tot verspreiding van stoffen in de biosfeer of tot enig gevaar voor mens en milieu. Echter, de voorvallen hebben wel geleid tot een actualisatie van deze overkoepelende risico analyse en tot verbeteringen in het monitoring systeem vastgelegd in het Water Injectie Management Plan.

Resumerend laat de risicoanalyse zien dat de beheersmaatregelen vastgelegd in de vergunning en in het Waterinjectie Management Plan (update 2022) goed werken en dat alle waarborgen voor een veilig en verantwoord opereren van de waterinjectieputten aanwezig zijn.

Dit houdt in dat preventie van grondwatervervuiling door het in de ondergrond ongecontroleerd vrijkomen van injectiewater alsmede lokale/regionale bodemdaling als gevolg van zoutoplossing op een goede manier preventief geborgd worden. Er zijn verschillende beheersmaatregelen geïmplementeerd die vroegtijdige detectie van eventuele problemen ten doel hebben en de mogelijkheid van verdere escalatie beogen te minimaliseren.

Ook de risicoanalyse rond de effecten van een door waterinjectie geïnduceerde aardbeving laat zien dat de waarborgen voor een veilig en verantwoord opereren van de waterinjectie aanwezig zijn. Een uitgebreide analyse van de belangrijkste parameters die zouden kunnen leiden tot een verhoogd bevingrisico hebben aangetoond dat dit risico als laag ingeschat wordt. Dit is in lijn is met de observatie dat gedurende de 10 jaar van waterinjectie in Twente geen enkele beving is geregistreerd. In zuidoost Drenthe zijn voelbare aardbevingen geweest als gevolg van gasproductie, Echter, gedurende meer dan 10 jaar water injectie in de velden Schoonebeek, Coevorden en Dalen zijn geen aardbevingen geregistreerd die gerelateerd kunnen worden aan water injectie. Mocht zich onverhoopt toch een beving voordoen dan zal deze gedetecteerd worden door het seismische monitoring netwerk. Het seismische risicobeheersplan beschrijft de acties die genomen zullen worden in het onwaarschijnlijke geval van een beving met het doel om effecten te minimaliseren.

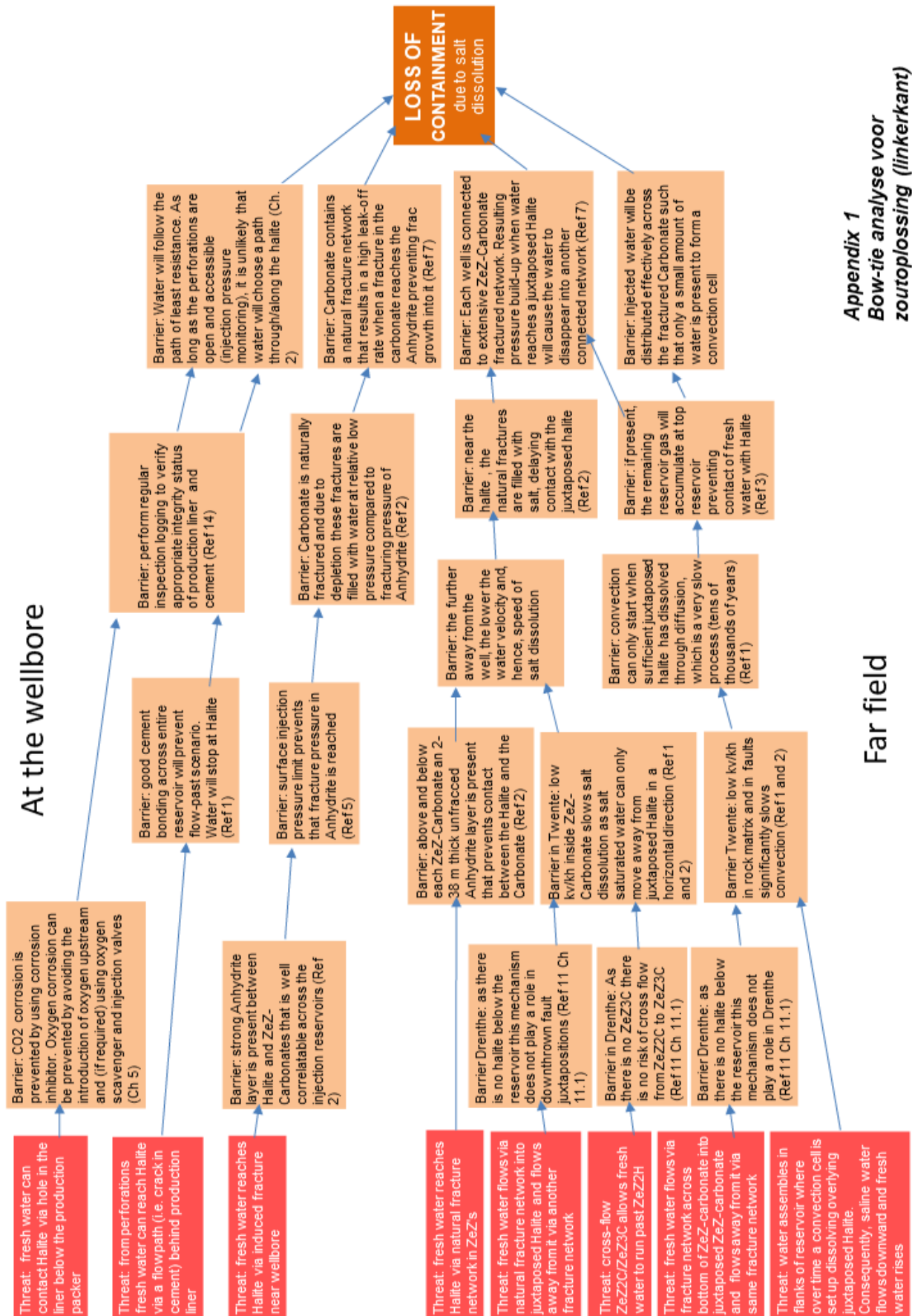
## 7 Referenties

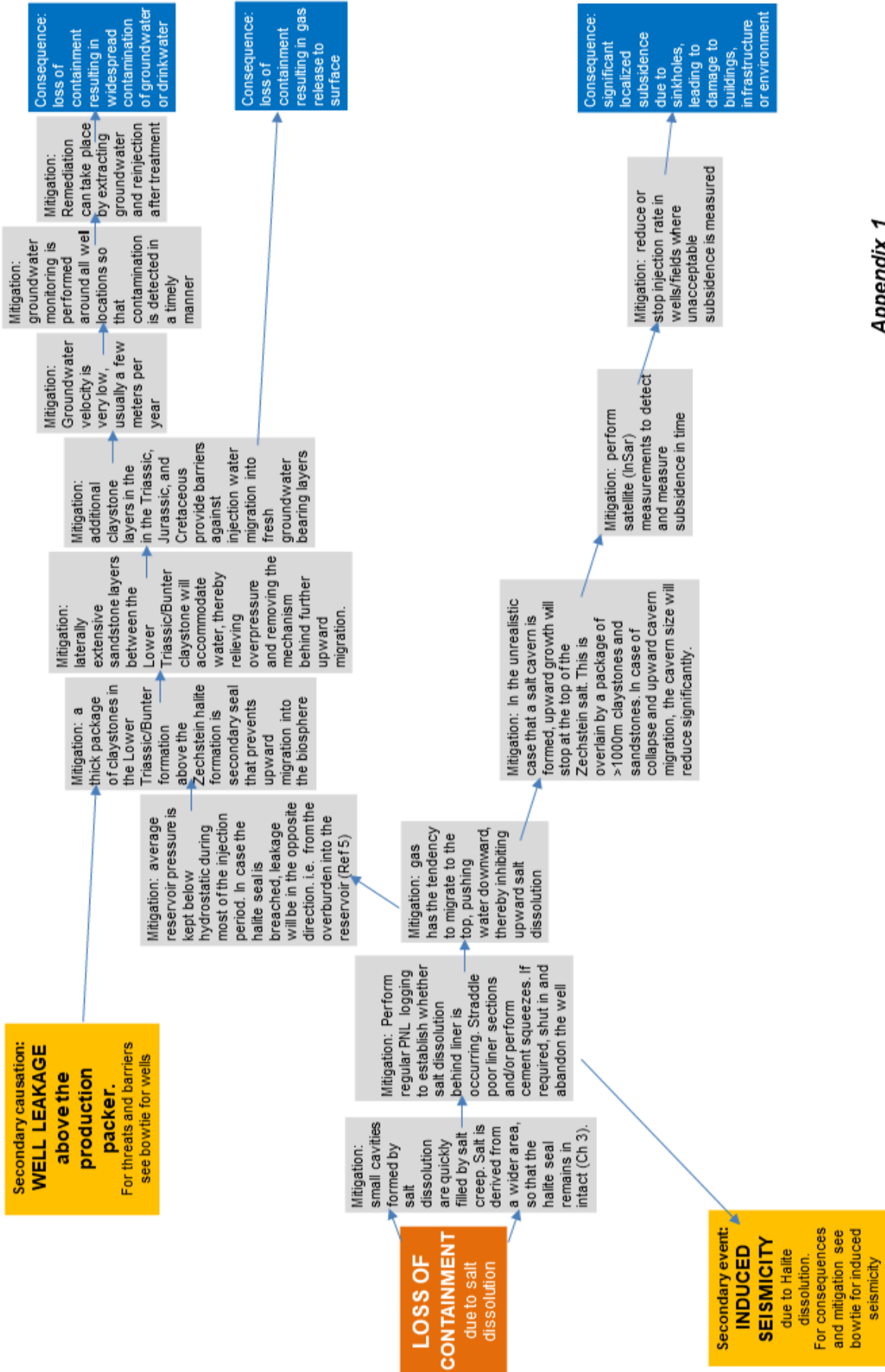
---

1. Halite dissolution modelling of water injection into Carbonate gas reservoirs with a Halite seal. Report EP201310203080, NAM 2014 (2016 revisie).
2. Geology description of Twente Gas Fields: Tubbergen, Tubbergen-Mander and Rossum-Weerselo. Report EP201310201845, NAM 2014 (2016 revisie).
3. Subsidence caused by Halite dissolution due to water injection into depleted Carbonate gas reservoirs encased in Halite. Report: EP201310204177, NAM 2014 (2016 revisie).
4. Threat assessment for induced seismicity in the Twente water disposal fields, Report: EP201502207168, NAM 2015 (2016 revisie).
5. Waterinjectie Management Plan, Report: EP201308203212, NAM
6. Injectie van productiewater bij olie- en gaswinning, Kamerbrief Minister van Economische Zaken, DGETM-EM / 15020314, Maart 27 2015
7. Technical evaluation of Twente water injection wells ROW3, ROW4, ROW7, ROW9, TUB7 and TUB10 3 years after start of injection EP201410210164, NAM 2015
8. Literature review on Injection-Related Induced Seismicity and its relevance to Nitrogen Injection. Report TNO 2014 R11761. TNO 2014
9. Seismisch risicobeheersplan - Waterinjectie Twente velden. NAM rapport EP202009204124, NAM 2021.
10. Reviews NAM rapporten m.b.t. 'Risico's zoutoplossing' en 'Seismic threat analysis'. SodM, juni 2016. <https://www.sodm.nl/documenten/publicaties/2016/06/23/7-evaluatie-reviews-waterinjectie>
11. Herafweging verwerking productiewater Schoonebeek, Tussenrapport alternatievenafweging. Royal Haskoning DHV. Juni 2016. Referentie: I&BBD9591-100-100R001F02. <http://www.nam.nl/techniek-en-innovatie/waterinjectie-in-twente/evaluatie-onderzoek.html>
12. Geochemical compatibility Of Schoonebeek oil field production water with Zechstein reservoirs. NAM, Dec 2016. EP201611200959
13. Zoback, M.D. (2012) Managing the Seismic Risk Posed by Wastewater Disposal. ARMA e-NEWSLETTER SPRING 2012, Volume 1, Issue 2 Spring 2012.
14. Waterinjectie Management Plan - Waterinjectie Twente. EP202205201100 May 2022.
15. Waterinjectie in Twentse gasvelden. Report AGE 16-10.104. TNO AGE 2016
16. Technical evaluation of Twente water injection wells TUM1, TUM2, TUM3, ROW2, ROW3, ROW4 and ROW5 6 years after start of injection. EP201701214429 NAM 2017
17. Note for file: seismic threat assessment for the potential injection and storage of produced water in the Drenthe Zechstein Carbonate reservoirs. NAM, November 2016. EP201611202382
18. Balen, R.T. van, Houtgast, R.F. & Cloetingh, S.A.P.L. (2005). Neotectonics of the Netherlands. Quaternary Science Reviews, 24, 439-454. doi: 10.1016/j.quascirev.2004.01.011
19. NAM (2022) seismic threat assessment for schoonebeek-zechstein water injection. NAM rapport EP202204200931
20. NAM (2022) Seismisch risicobeheersplan - Waterinjectie Schoonebeek-Zechstein. NAM rapport EP202204200929
21. Subsurface Scenarios for ROW-2 Casing Shear. NAM rapport EP202111204310
22. Onderzoek SCH-447 Incident - Root Cause Analysis. NAM rapport EP202204201376
23. Description and analysis of field cases of injection in The Netherlands, TNO-rapport 2015 R10906, 5 november 2015
24. Geomechanical modelling of the effects of (nitrogen) injection on fault stability in a reservoir, representative for a typical Rotliegend reservoir in the northern part of The Netherlands, TNO-rapport 2015 R11259, 11 November 2015
25. Norg UGS fault reactivation study and implications for seismic threat, NAM rapport EP201610208045, October 2016.
26. Groningen Pressure Maintenance Study - Progress Report, February 2016.
27. ROW-4 onderzoek, NAM Report EP202207200487, Juli 2022
28. Beoordeling aanvullend onderzoek ROW-4 en overkoepelende risicoanalyse waterinjectie Twente, SodM brief aan NAM, 22192785, 26 september 2022

# 8 Appendices

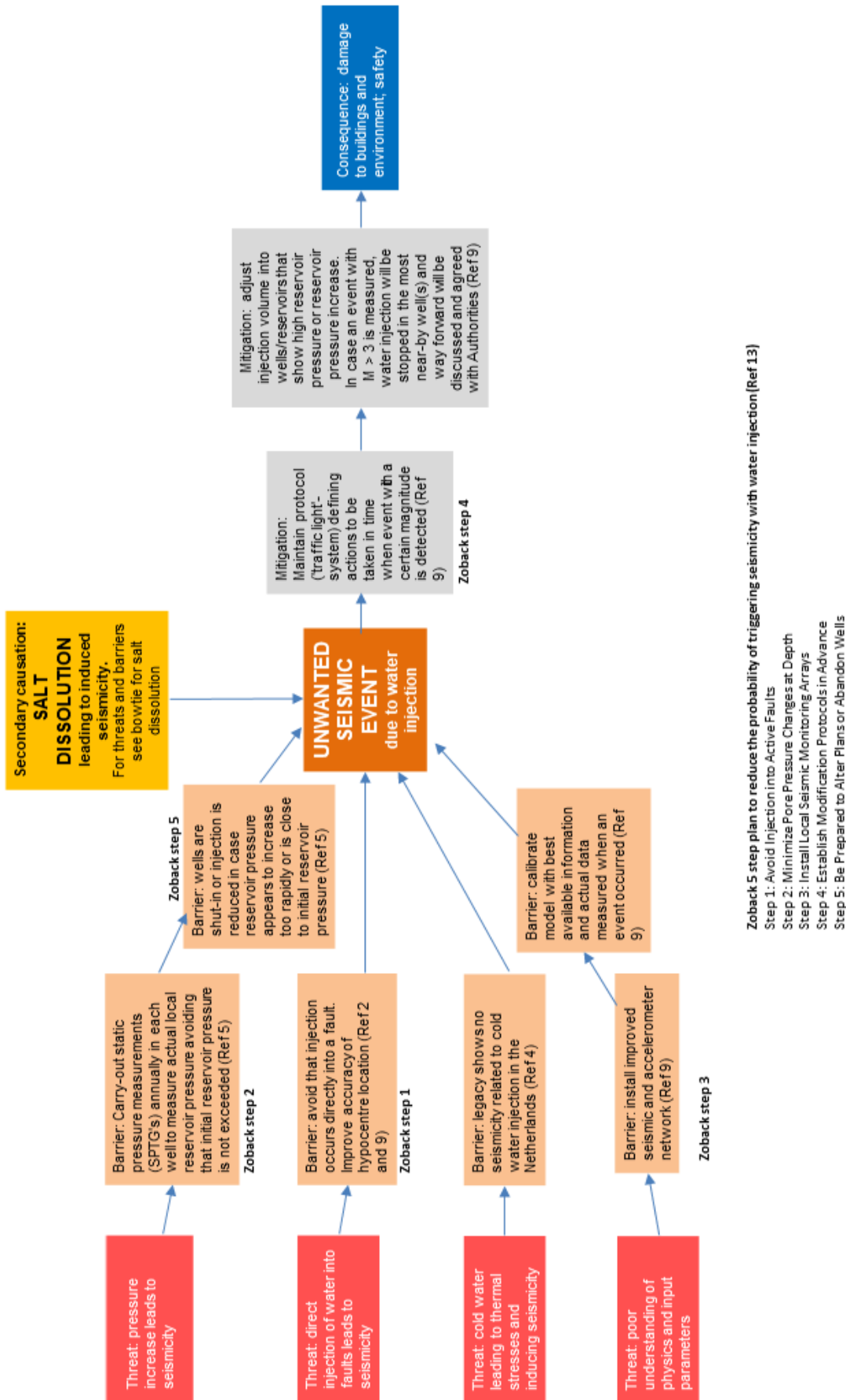
## Appendix 1 Bow-tie analyse voor zoutoplossing





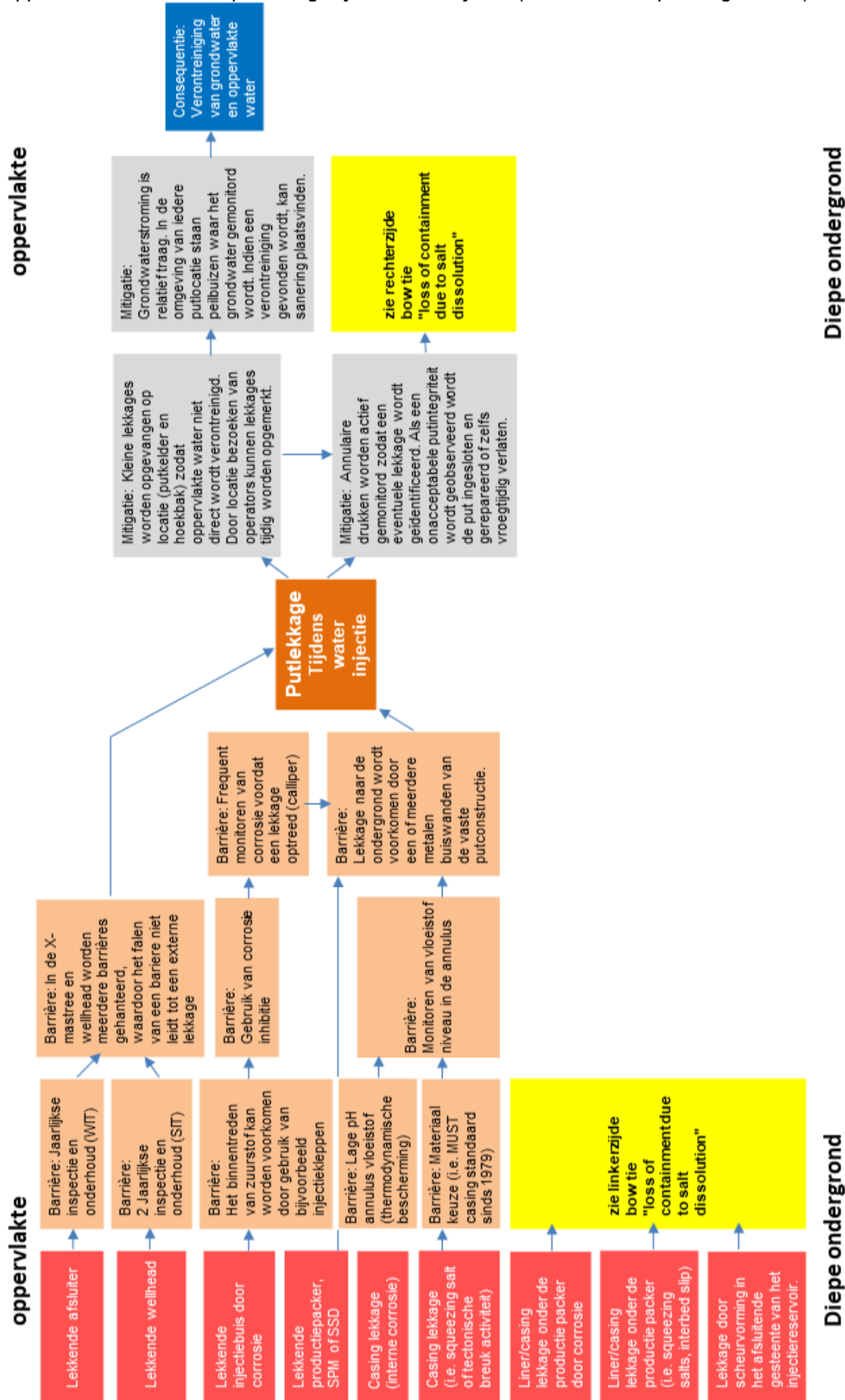
**Appendix 1**  
**Bow-tie analyse voor**  
**zoutoplossing (rechterkant)**

Appendix 2. Bow-tie voor geïnduceerde seismiek



Appendix 2  
Bow-tie analyse voor  
geïnduceerde seismiek

**Bow-Tie risico analyse voor putlekkage (exclusief zoutoplossingsrisico's onder de productie packer)**



Appendix 3. Bow-tie voor putlekkage tijdens waterinjectie (exclusief zoutoplossingsrisico's)