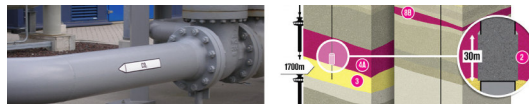


MER Ondergrondse opslag van CO₂ in Barendrecht

Deelrapport 3: Ondergrondse opslag
(locatiekeuze, risicoanalyse en lekkagescenario's ondergrond,
monitoring)



Initiatiefnemer

Shell CO₂ Storage B.V.
Den Haag
Geregistreerd in Den Haag, NL – Handelsregisternummer 27002688

Correspondentieadres

Shell CO₂ Storage B.V.
t.a.v. Barendrecht Ondergrondse CO₂ Opslag (BRT-OCO)
Postbus 28000, 9400 HH Assen, NL

Datum

December 2008

Projectleiding

mw. ir. M. Kuijper
Tel: 0592 – 364268
E-mail: margriet.kuijper@shell.com

Vergunningen

mw. J. Hadderingh
Tel: 0592- 364030
E-mail: jeannet.hadderingh@shell.com

Mediazaken

dhr. W. van de Wiel
Tel: 070 – 3778750
E-mail: wim.vandewiel@shell.com

Dit Milieueffectrapport is opgesteld door Haskoning Nederland B.V. in opdracht en onder verantwoordelijkheid van Shell CO₂ Storage B.V.

Inhoudelijke bijdragen zijn geleverd door onder meer de volgende bedrijven en instituten:

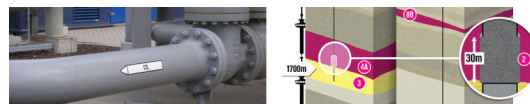
- Maatschappijen van de Shell Groep
- Maatschappijen behorende bij OCAP
- TNO, Utrecht
- Buisleidingenstraat Nederland, Roosendaal
- RAAP Archeologisch Adviesburo B.V., Amsterdam
- Noordelijk Akoestisch Adviesbureau B.V., Assen
- Haskoning Nederland B.V., Groningen
- Tebodin B.V., Den Haag
- Oranjewoud B.V., Heerenveen

Uitgave: Shell CO₂ Storage B.V., Den Haag

Rapportnummer: EP200809225671

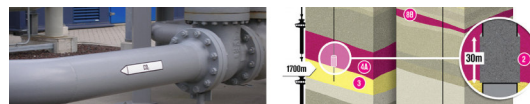
The copyright of this document is vested in Shell CO₂ Storage Company B.V. The Netherlands. All rights reserved. Neither the whole, nor any part of this document may be reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner.

© SHELL CO₂ STORAGE COMPANY B.V., THE NETHERLANDS

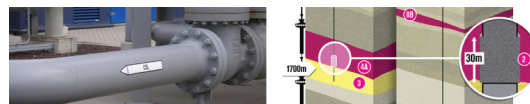


Inhoudsopgave

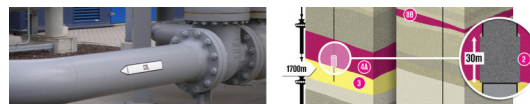
1.	Afweging en toetsing ondergrondse CO₂-opslag	8
1.1	Biosfeer en diepe ondergrond	8
1.2	Leeggeproduceerde gasvelden	11
1.3	Bijzonder, maar toch ook weer niet	13
1.4	Deelrapport 3: Ondergrond leeswijzer	13
2.	Locatiekeuze	16
2.1	Inleiding	16
2.2	Selectie van geschikte reservoirs	18
2.2.1.	Beschrijving mogelijkheden offshore, Noord-Nederland en West-Nederland	20
2.2.2.	Toetsing van de doelstellingen	24
2.2.3.	Conclusie selectie regio's en locaties	28
2.3	Beschrijving reservoirs	29
2.3.1.	Beschrijving Barendrecht veld	30
2.3.2.	Toetsing veldkarakteristieken Barendrecht veld	33
2.3.3.	Beschrijving Barendrecht-Ziedewij veld	40
2.3.4.	Toetsing veldkarakteristieken Barendrecht-Ziedewij veld	43
2.3.5.	Samenvattende tabel	47
2.4	Resultaat van de locatiekeuze	49
3.	Risicomanagement methodiek	50
3.1	Inleiding	50
3.2	Stappenplan risicomanagement	53
3.2.1.	Classificaties risicoscenario's en acceptatiecriteria	58
4.	Risico Analyse	62
4.1	Inleiding	62
4.2	Ervaringen projecten en onderzoeken	62
4.3	Toetsing met behulp van het stappenplan	64



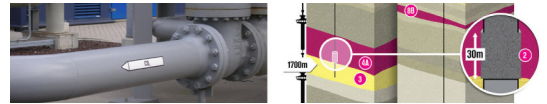
5.	Scenario's	74
5.1	Inleiding.....	74
5.2	Opslag van CO ₂	76
5.2.1.	Samenstelling te injecteren gas.....	76
5.2.2.	Opbouw van de druk in de reservoirs.....	77
5.2.3.	CO ₂ -stroming in reservoir.....	81
5.2.4.	Put afsluiten, de pannenkoekplug	84
5.3	Scenario Lekkage door afdekkende laag (caprock).....	86
5.3.1.	Beschrijving scenario	86
5.3.2.	Beschrijving van bedreigingen en consequenties.....	86
5.3.3.	Onderzoeken en studies.....	87
5.3.4.	Risico-inschatting.....	95
5.3.5.	Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan.....	96
5.3.6.	Resterend risico voor lekkage door afdekkende laag	97
5.3.7.	Sijpelen van CO ₂	97
5.4	Lekkage langs overstromingspunt (spill-point)	97
5.4.1.	Beschrijving scenario	97
5.4.2.	Beschrijving bedreigingen en consequenties	98
5.4.3.	Onderzoeken en studies.....	99
5.4.4.	Risico-inschatting.....	101
5.4.5.	Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan.....	101
5.4.6.	Resterende risico voor lekkage via overstromingspunt.....	102
5.5	Lekkage langs breukzones	102
5.5.1.	Beschrijving scenario	102
5.5.2.	Beschrijving van bedreigingen en consequenties.....	102
5.5.3.	Onderzoeken en studies.....	104
5.5.4.	Risico-inschatting.....	108
5.5.5.	Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan.....	108
5.5.6.	Resterend risico voor lekkage via breukzones	108



5.6	Lekkage langs de putwand.....	108
5.6.1.	Beschrijving scenario lekkage langs de putwand.....	108
5.6.2.	Beschrijving van bedreigingen en consequenties.....	109
5.6.3.	Onderzoeken en studies.....	111
5.6.4.	Risico-inschatting.....	117
5.6.5.	Mitigerende maatregelen voor lekkage langs de putwand.....	118
5.6.6.	Resterende risico voor lekkage langs de putwand.....	120
5.7	Samenvatting onderzoek bedreigingen bodembeweging en trilling	120
5.8	Samenvatting onderzoek bedreigingen chemische reacties	121
6.	Lange termijn	122
6.1	Inleiding.....	122
6.2	Stabiele eindsituatie	122
6.3	Lange termijn effect bij opgeslagen CO ₂	123
6.4	Lange termijn effect bij putten	124
7.	Monitoring.....	128
7.1	Inleiding.....	128
7.2	Opzet monitoringsplan	128
7.2.1.	Deel 1: Traditionele monitoring van overgedragen procesemissies van bron tot injectieput.	129
7.2.2.	Deel 2: Monitoringsplan met betrekking tot veiligheid van de bovengrondse installaties en putten ten opzichte van de omgeving	130
7.2.3.	Deel 3: Risicogedreven monitoringsplan; Monitoring om 'containment' van CO ₂ in het opslagreservoir vast te stellen.	130
7.2.4.	Monitoringsgebieden	131
7.2.5.	Classificatie noodzaak van Monitoringsmaatregelen	131
7.2.6.	Fasen in de levensduur.....	132
7.2.7.	Afweging tussen acceptabele risico's en kosten.....	132
7.3	Beschrijving voorstel monitoringsplan	132
7.3.1.	Maatregelen bij afwijkende meetwaarden.....	135
7.3.2.	Technische haalbaarheid monitoringsplan.....	136



8. Bevindingen risico evaluatie	138
8.1 Inleiding.....	138
8.2 Varianten.....	138
8.3 Samenvatting risico-beoordeling Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij velden.....	139
8.4 Kernboodschappen Ondergrondse opslag van CO ₂ in Barendrecht.....	140
9. Referenties	142
Afkortingen en begrippen.....	146
Appendix 1 Overzicht ervaringen met CO₂ en CO₂-opslag.....	148
Appendix 2 Overzicht geologische opbouw	188
Appendix 3 Overzicht theoretische stroming CO₂	198



Bijlagen

Bijlage 1	Bemalingsrapport
Bijlage 2	Natuurtoets
Bijlage 3	Cultuurtechnisch rapport en bodemonderzoeken
Bijlage 4	Archeologie
Bijlage 5	Geluid
Bijlage 6	Externe veiligheid

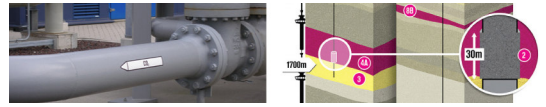
Kaarten

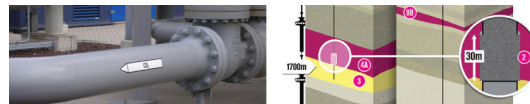
Kaarten met de ligging van projectonderdelen

Kaart 1a	Overzichtskaart west
Kaart 1b	Overzichtskaart oost
Kaart 1c	Plot 16
Kaart 1d	Locatie Barendrecht
Kaart 1e	Locatie Barendrecht-Ziedewij
Kaart 1f	Overzicht kwetsbare gebieden
Kaart 1g/h/i	Varianten nieuwe leiding

Kaarten met milieueffecten

Kaart 4a	Ecologie west
Kaart 4b	Ecologie oost
Kaart 5a	Landschap en natuurhistorie west
Kaart 5b	Landschap en natuurhistorie oost
Kaart 6a	Archeologie west
Kaart 6b	Archeologie oost
Kaart 7a	Geluid Barendrecht
Kaart 7b	Geluid Barendrecht
Kaart 7c	Geluid Barendrecht-Ziedewij
Kaart 9a	Externe veiligheid Plot 16
Kaart 9b	Externe veiligheid leidingtunnel Beneluxplein 14 inch leiding
Kaart 9c	Externe veiligheid leidingtunnel Beneluxplein 28 inch leiding
Kaart 9d	Externe veiligheid leidingtunnel Groene Kruisweg 14 inch leiding
Kaart 9e	Externe veiligheid leidingtunnel Groene Kruisweg 28 inch leiding
Kaart 9f	Externe veiligheid Barendrecht
Kaart 9g	Externe veiligheid Barendrecht-Ziedewij





1. Afweging en toetsing ondergrondse CO₂-opslag

Het MER Ondergrondse opslag van CO₂ in Barendrecht is opgebouwd uit drie deelrapporten. Het eerste deelrapport geeft een overzicht van alle aspecten van de voorgenomen activiteit en de mogelijke varianten, met daarbij een samenvattende beschrijving van de mogelijke effecten. Het tweede deelrapport beschrijft per milieuaspect het huidige beleid, de huidige lokale en regionale omstandigheden, de mogelijke effecten en een classificatie van de effecten.

Dit deelrapport vormt het derde deelrapport van het MER. Het gaat in detail in op de ondergrondse opslag, waarbij de diepe ondergrond uitgebreid in beeld wordt gebracht, met daarbij de mogelijke gevolgen voor de biosfeer. De biosfeer beschrijft het gedeelte waar leven mogelijk is, inclusief de atmosfeer. Voorafgaand aan de inhoudelijke beschrijvingen wordt het in dit MER aangehouden verschil tussen biosfeer en diepe ondergrond toegelicht.

1.1 Biosfeer en diepe ondergrond

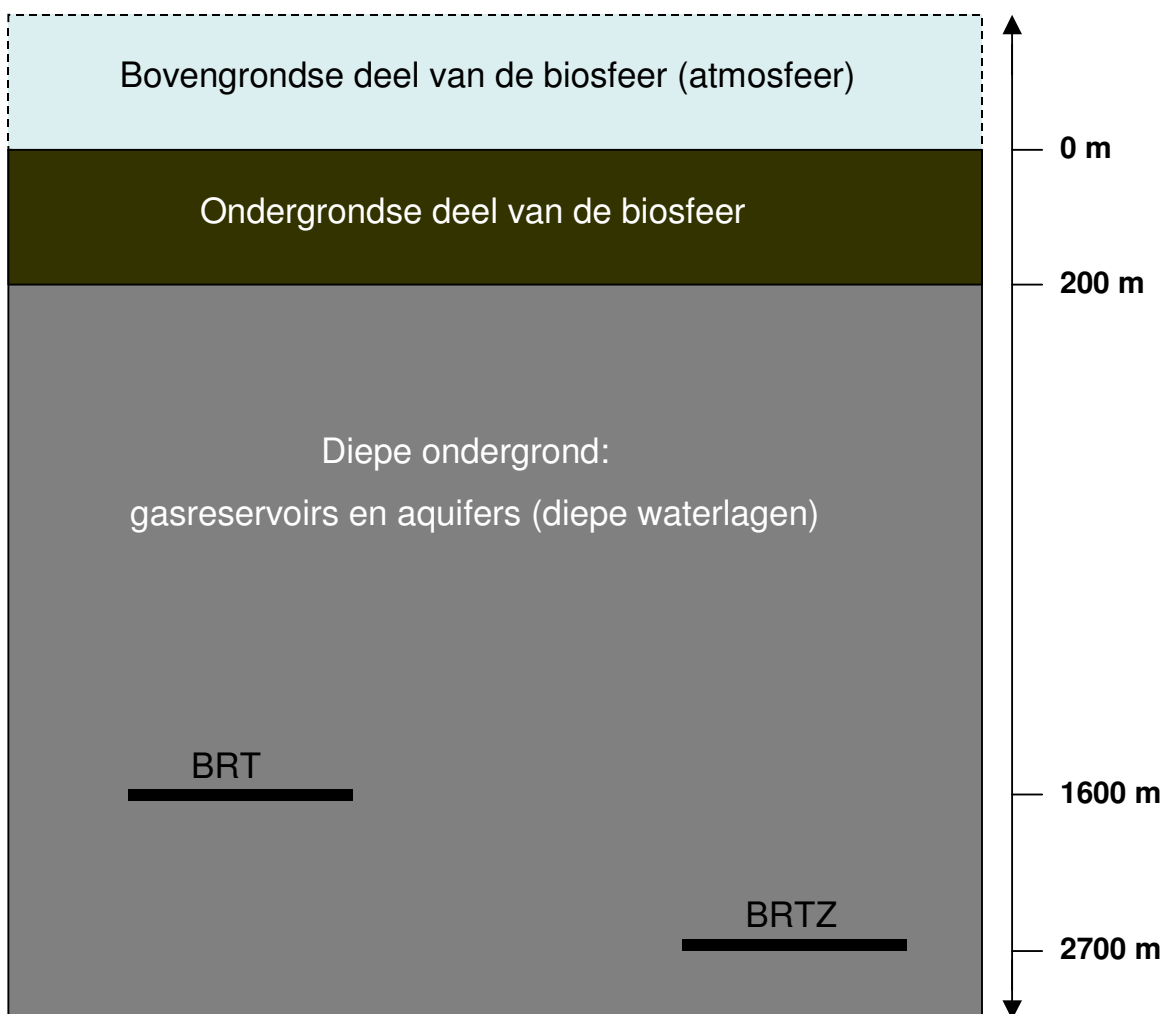
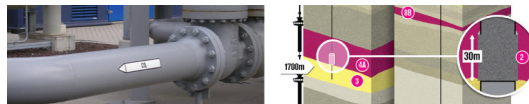
Voor de begripsvorming is het belangrijk eerst duidelijk te maken wat wordt verstaan onder diepe ondergrond. De term diepe ondergrond wordt gebruikt in tegenstelling tot de ondiepe ondergrond en atmosfeer, wat hier als biosfeer wordt aangeduid.

Afbakening biosfeer

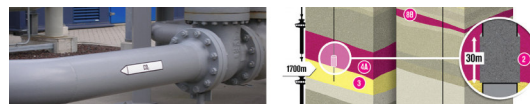
Met de biosfeer wordt in dit MER het gedeelte van de aarde aangeduid, waar leven mogelijk is. Dat wil zeggen de lucht of atmosfeer, het water en de bodem. Met de bodem wordt de eerste paar meter onder het maaiveld aangeduid. Dit kan zich echter verder uitstrekken tot tientallen of zelfs honderd meter diepte, zodra effecten op het (diepe) grondwater een rol kunnen spelen. De zone waarin milieueffecten optreden is over het algemeen in Nederland beperkt tot circa 200 meter onder maaiveld, aangezien in deze zone biologische activiteiten voorkomen. Binnen dit MER wordt de ondergrond tot circa 200 meter diepte aangeduid met de biosfeer (zie figuur 1.1).

Diepe ondergrond

Winning van olie en gas komt voor op veel grotere diepte, evenals de voorziene opslag van CO₂. Ter onderscheid met de biosfeer worden in dit MER de lagen onder 200 m diepte aangeduid met de diepe ondergrond. De belangrijkste ondergrondse structuren in Barendrecht bevinden zich ruim onder de 200 meter, vanaf circa 1.500 meter diepte. Kenmerkend voor de diepe ondergrond is dat hiervoor het milieubeleid uit de biosfeer niet is toegesneden. Grote hoeveelheden olie in de biosfeer worden gezien als bodemverontreiniging, die moet worden gesaneerd. In de diepe ondergrond wordt olie gezien als een delfstof die van nature voorkomt en gewonnen zou kunnen worden. Voor de diepe ondergrond is onder meer de Mijnbouwwet van kracht, voor delfstoffen beneden de 100 meter en aardwarmte beneden de 500 meter diepte (zie figuur 1.1).



Figuur 1.1: Gehanteerde bodemindeling in dit MER met daarin de diepteligging van beide reservoirs



Kader gesteente ondergrond

Gesteentevorming op grote diepte

Er zijn belangrijke verschillen tussen de diepe ondergrond en de ondergrondse biosfeer. Bij dieptes beneden de 200-400 meter wordt alle bodemmateriaal compact (steen). Bijvoorbeeld los zand wordt zandsteen, klei en aarde wordt kleisteen of schalie. Dit gebeurt door het gewicht van de bovenliggende lagen, de met de diepte toenemende temperatuur en mineralisatieprocessen in het altijd aanwezige water, waardoor losse deeltjes als het ware aan elkaar gecementeerd worden.

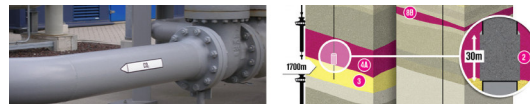
Er zijn ook andere steensoorten mogelijk zoals kalksteen, gips, anhydriet of zout. Dit is onder andere afhankelijk van de klimaatomstandigheden in het gebied tijdens het ontstaan van het gesteente. Dit proces waarbij dit soort gesteente ontstaat heet sedimentatie. Sedimentatie treedt op door afzetting in relatief lager gelegen gebieden, zoals de Noordzee en omgeving. Dit gebied wordt ook een sedimentair bekken genoemd. Het sedimentatieproces gaat in het algemeen gedurende (honderden) miljoenen jaren door, waardoor sedimentgesteente in bekkens tot op grote dieptes (duizenden meters) voorkomt.

Gesteente eigenschappen

Het merendeel van de gesteentes in de ondergrond van Nederland bestaat uit samengeperste zand- of kleikorreltjes. Het zand in rivieren en zeeën wordt in de loop der jaren begraven door nieuwe lagen zand en klei, en komt daardoor op steeds grotere dieptes terecht. Door de bovenliggende lagen wordt het gesteente geleidelijk samengedrukt. De open ruimte (aangeduid als poriën) tussen de korreltjes van dezelfde soort steen wordt steeds kleiner, naarmate het gesteente steeds dieper begraven wordt in de loop van miljoenen jaren. De hoeveelheid poriën ten opzichte van het totale volume gesteente, wordt de porositeit genoemd. In de ondergrond van Nederland is deze ruimte altijd gevuld met water, gas of olie. De permeabiliteit (of doorlatendheid) is een maat voor de stromingsnelheid van een vloeistof of gas door het gesteente. In een zandsteen bestaat er meestal een correlatie tussen de porositeit en permeabiliteit. Een goed reservoir heeft zowel een hoge porositeit als ook een hoge permeabiliteit. Een goed voorbeeld van een dergelijk gesteente is de Bentheim zandsteen. De Schoonebeek-olie wordt uit dit gesteente geproduceerd. Dat het gesteente ondanks de hoge porositeit toch erg sterk is, blijkt uit het feit dat het Paleis op de Dam ermee gebouwd is.

Stroming door gesteente

Alle poriën in de diepe ondergrond bevatten zout formatiewater. In sommige poriën is het water later deels verplaatst door gas of olie. Er blijft echter altijd water achter in een porie, omdat water aan steen hecht en gas en olie (of CO₂) worden afgestoten. Water zit ook in de samengeperste minuscule poriën van kleisteen. Gas en olie (of CO₂) kunnen niet zomaar bij een kleisteen binnendringen. Omdat water afstotend werkt (aangeduid met de oppervlaktespanning) zou er een extra druk nodig zijn om gas of CO₂ in kleisteen te persen (de zogenaamde capillaire inpersdruk). Zelfs als het lukt om gas of CO₂ in kleisteenachtig gesteente te persen, gaat het gas nauwelijks stromen (in minuscule hoeveelheden vanwege de microscopisch kleine doorlatendheid). Bij iedere vernauwing van een porie naar een volgende porie wordt het gas door het water tegengehouden. Als kleisteenlagen in de ondergrond een afsluitende structuur vormen en er olie- of gasmigratie optreedt langs een onderliggende laag met grotere poriën en doorlatendheid, dan kan een olie of gas reservoir worden gevormd in de poriën van bijvoorbeeld zandsteen. Metingen laten zien dat zich inderdaad geen gas of olie in de poriën van een afdekkende kleilaag bevindt. Gezien de enorme boven- en zijdruk in een sedimentair bekken zijn de kleilaag en het reservoir als het ware in beton gestort. Dit maakt het mogelijk dat gas en olie miljoenen jaren blijven vastzitten.



1.2 Leeggeproduceerde gasvelden

Het onderzoek naar effecten op de diepe ondergrond richt zich vooral op veiligheidsrisico's. Vragen als: is het waarschijnlijk dat het CO₂ ontsnapt, wat gebeurt er als CO₂ ontsnapt uit het reservoir en wat gebeurt er als chemische reacties in de ondergrond gaan optreden, komen aan de orde. En is het voorgaande mogelijk en zou dit kunnen leiden tot onveilige situaties. Ook milieueffecten (lokaal door lekkage) en de effectiviteit van de maatregel (emissiereductie) zijn belangrijke redenen voor een gedetailleerde risicoanalyse voor lekkagescenario's uit de ondergrond.

Centraal in de opzet van het demonstratieproject staat, dat vanuit veiligheidsoogpunt het CO₂ het beste kan worden opgeslagen in de zogenaamd leeggeproduceerde gasvelden. Dit zijn gasvelden waarbij de resterende gasdruk zodanig laag is, dat verdere productie van aardgas niet meer rendabel is. De argumenten om juist voor CO₂-opslag in leeggeproduceerde gasvelden te kiezen, worden onderstaand beschreven.

Bij opslag van CO₂ in de diepe ondergrond worden er internationaal vooral twee veilige opties genoemd:

- opslag in lege gas- of olievelden;
- opslag in zoutwater waterlagen (aquifers).

In Nederland richt het onderzoek zich nu eerst op het opslaan van CO₂ in lege gasvelden, vanwege een aantal extra veiligheidsbarrières die een bekend gasveld biedt.

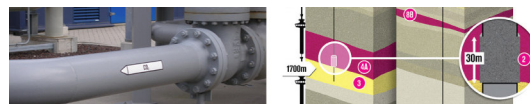
Bewezen gasdicht

De afdichting van de afdeklaag boven het gasreservoir heeft gedurende miljoenen jaren het aardgas in het reservoir gehouden. Dit geeft aan dat een gasveld ook geschikt kan zijn voor CO₂-opslag. De plaatsing van putten heeft tot gevolg dat hier de afdichtende werking van de deklaag is doorboord. De putten krijgen daarom extra aandacht bij het gasdicht houden van de opslagreservoirs.

Onderdruk in het reservoir ten opzichte van de omgeving

De druk in het leeggeproduceerde gasveld is veel lager dan de druk in het omringende gesteente op dezelfde diepte. Het is mogelijk het CO₂ in het reservoir op te slaan tot aan een druk, die iets lager is dan de druk van het omliggende gesteente. Dit in vergelijking met opslag in een aquifer waarbij het CO₂ wel met een bepaalde druk moet worden opgeslagen, die hoger kan zijn dan de druk in het omliggende gesteente. Een lagere gasdruk in het reservoir ten opzichte van de directe omgeving vormt een extra veiligheidsbarrière.

Door de hogere druk buiten het reservoir kunnen bij een open verbinding (bijvoorbeeld via de buitenkant van een put) van het opslagreservoir en het omliggende gesteente hooguit vloeistoffen (bijvoorbeeld water) van buiten naar het reservoir migreren. In dit geval zal afhankelijk van de mate van doorlatendheid van de verbinding het drukverschil langzaam afnemen, waardoor ook de



migratie van water afneemt. Dit zal een zeer langdurig proces zijn omdat het migratievolume zeer beperkt is in verhouding met het volume dat nodig is om de druk gelijkmatig te houden. In een leeg gasveld dat niet helemaal tot zijn oorspronkelijke druk met CO₂ wordt opgevuld en in evenwicht met de omgeving is, is dus geen sterke kracht aanwezig die een uitstromen van een grotere hoeveelheid CO₂ kan veroorzaken.

Mogelijk migratieproces door drijfkracht

Uiteindelijk is het hooguit mogelijk dat CO₂ belletjes door drijfkracht 'proberen' door een afdichtende breukzone of gesteente te migreren. Dit is echter alleen mogelijk als de drijfkracht hoger is dan de capillaire tegenkracht van de afdichtende breukzone of laag (een CO₂ belletje moet de oppervlaktespanning van water in het gesteente en in de breukzone overwinnen).

Oplossing CO₂ in bovenliggende waterlagen

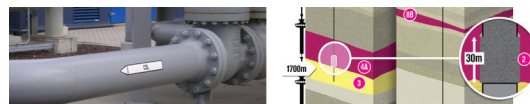
In het hypothetische geval dat CO₂ toch (heel langzaam) zou migreren, zal het CO₂ gedeeltelijk in het water van het omliggende gesteente oplossen of als immobiele CO₂ belletjes in de poriën van het omliggende gesteente achterblijven. Open scheuren of breuken door de afdekkende laag, waardoor CO₂ gemakkelijker uit het reservoir zou kunnen stromen, zijn niet aanwezig in de onderzochte reservoirs. In principe kan het geplande CO₂ volume vele malen in het bovenliggende watervoerende gesteente opgelost en ingevangen worden.

Veiligheidsbarrières bij opslag CO₂ in leeggeproduceerde gasreservoirs

In totaal bestaan er een aantal zeer sterke veiligheidsbarrières bij opslag in een leeg gasveld.

- 1) De dichtheid van afsluitende laag is bewezen omdat er gas voor miljoenen jaren opgeslagen was.
- 2) Behalve de directe afsluitende laag bestaan er nog meerdere lagen boven het gas veld die ook afsluitend zijn.
- 3) De druk van het CO₂ is lager dan de druk van het water in het omliggende gesteente. CO₂ heeft daardoor geen kracht om uit het reservoir te stromen.
- 4) Het CO₂ volume dat kan worden vastgelegd in het bovenliggend gesteente door oplossing en invanging door capillaire krachten is vele malen hoger dan het CO₂ volume dat aanwezig is in het opslag reservoir.
- 5) Bij het verlaten van de putten worden speciale cementpluggen geïnstalleerd. De blijvende integriteit van die pluggen wordt getest en geobserveerd.
- 6) Indien nodig is (zolang de putten nog niet zijn afgesloten) het mogelijk de druk van het CO₂ in het reservoir te laten dalen door het CO₂ gecontroleerd te laten uitstromen via een put en een hoge afblaaspijp.

Deze barrières en de mogelijke effecten van CO₂ in de ondergrond worden in de volgende secties in detail onderzocht.



1.3 Bijzonder, maar toch ook weer niet

Risico en risicoperceptie

Daar waar een buitenstaander zich afvraagt of het wel verantwoord is een CO₂-opslagproject nabij bewoond gebied te starten, wordt vanuit de olie- en gasindustrie de opslag van CO₂ als een nieuwe toepassing van bestaande technieken gezien. Daarmee is de perceptie van mogelijke risico's voor de buitenwereld anders dan voor de initiatiefnemer. Dit MER heeft als doel duidelijkheid te brengen over de huidige stand der techniek en over nieuwe componenten. De huidige stand der techniek hoeft in het MER niet opnieuw bewezen te worden, maar voor het goede begrip zal hier wel aandacht aan worden besteed. De nadruk zal echter liggen op de nieuwe componenten.

Nieuwe componenten

Het nieuwe karakter van dit project wordt enerzijds bepaald door het feit dat hier sprake is van opslag van CO₂ in plaats van aardgas en anderzijds dat het hier opslag betreft voor een zeer lange termijn, in plaats van tijdelijk als buffervoorziening. Met honderden CO₂-injectieputten wereldwijd is CO₂-injectie echter niet nieuw te noemen. De meeste van die putten zijn onshore, dus ook dat is niet nieuw. Nieuw is dat het CO₂ aantoonbaar in de ondergrond moet blijven zitten, zowel vanuit het aspect veiligheid als in verband met de emissierechten (monitoringseisen voor het verhandelen van emissierechten).

Voor de Nederlandse situatie kan dit bijzondere karakter worden geconcretiseerd door te kijken naar de verschillen tussen:

- opslag van CO₂ versus opslag van aardgas;
- permanente opslag versus korte termijn opslag voor buffering of injectie voor olieproductie verbetering;
- onshore versus offshore;
- Nederlandse geologische situatie versus ondergrond andere landen.

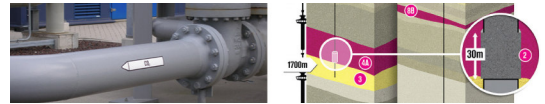
In hoofdstuk 8 worden de bevindingen op deze vier aspecten samengevat.

1.4 Deelrapport 3: Ondergrond leeswijzer

Dit derde deelrapport van het MER gaat dieper in op de ondergrondse aspecten van CO₂-opslag. Het deelrapport is onderverdeeld in vier blokken:

Locatiekeuze

In hoofdstuk 2 worden de verschillende afwegingen bij de locatiekeuze beschreven. De locatiekeuze is opgenomen in het deelrapport 3, aangezien primair gezocht is naar een geschikt reservoir, waar CO₂ veilig in kan worden opgeslagen. Hoofdstuk 2 beschrijft eerst de beschikbare reservoirs en locaties. Daarna is de geschiktheid van de geselecteerde reservoirs en locaties nader getoetst.



Risico analyse

Vervolgens wordt in drie hoofdstukken ingegaan op de risicoanalyse. Centraal in de risico analyse staan de mogelijke gevolgen van een lekkage van CO₂. De nadruk ligt op de periode van CO₂-injectie en de daaropvolgende periode tot een stabiele eindsituatie is bereikt en de locatie kan worden overgedragen aan het bevoegd gezag. Eerst wordt in hoofdstuk 3 de risicomanagementmethodiek toegelicht. De methodiek bestaat uit tien stappen, die worden toegelicht in hoofdstuk 3 en op vooral kwalitatieve basis toegepast in hoofdstuk 4. Uit de risicoanalyse komen een aantal aspecten naar voren, waarvoor een meer kwantitatieve benadering wenselijk is. Dit wordt in hoofdstuk 5 nader uitgewerkt in de risicoscenario's.

Lange termijn situatie

Aangezien CO₂ permanent opgeslagen blijft, is het van belang eveneens de lange termijn situatie, nadat de locaties overgedragen zijn aan de overheid, in beeld te brengen. Dit vindt plaats in hoofdstuk 6. De nadruk ligt in dit hoofdstuk op datgene, wat kan worden verwacht nadat het reservoir is afgesloten.

Monitoring

In hoofdstuk 7 wordt het monitoringsprogramma beschreven. Dit bestaat uit twee onderdelen: het technische monitoringsprogramma voor het verkrijgen van operationele informatie en een gedeelte om aan te tonen dat geen of beperkte CO₂-migratie plaatsvindt.

In hoofdstuk 8 komen de bevindingen samen en wordt beschreven welke alternatieven en varianten denkbaar zijn voor het operationele deel van de ondergrond.

Appendices

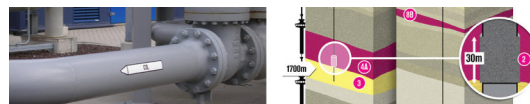
Als appendix bij dit derde deelrapport 'Ondergrond' zijn drie overzichten opgenomen.

Appendix 1

Het eerste overzicht geeft (vrijwel) alle huidige CO₂-opslag projecten weer, wereldwijd. De projecten zijn gegroepeerd naar land en geven kort de situatie per land weer. In het verlengde hiervan is een overzicht gemaakt van de natuurlijke CO₂ bronnen wereldwijd, hoe hiermee wordt omgegaan en onder welke omstandigheden deze kunnen leiden tot risico's.

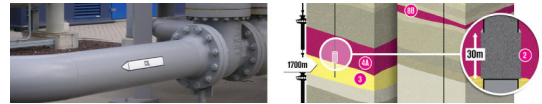
Appendix 2

Het tweede overzicht beschrijft de geologische opbouw van de diepe ondergrond in West-Nederland en vooral nabij de geselecteerde reservoirs. Deze informatie kan gezien worden als achtergrondinformatie bij de beschrijvingen in het rapport.



Appendix 3

Het derde overzicht geeft de resultaten weer van een onderzoek naar mogelijk migratie van CO₂ buiten de reservoirs. Daarbij is aangenomen dat boven de reservoirs geen afdichtende laag voorkomt en er een oneindige stroom CO₂ beschikbaar is. Beide aannames zijn niet realistisch, zodat dit een **puur hypothetisch** scenario betreft, uitgevoerd om inzicht te krijgen in mogelijke migratieroutes in de diepe ondergrond.



2. Locatiekeuze

2.1 Inleiding

Het MER voor CO₂-opslag in Barendrecht betreft specifiek de opslag van CO₂ in de reservoirs Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. In het volgende hoofdstuk wordt een onderbouwing gegeven van de keuze voor deze reservoirs.

De Commissie voor de m.e.r. heeft naar aanleiding van de studie AMESCO het volgende geadviseerd voor een toekomstig specifiek CO₂-opslagproject [Commissie voor de m.e.r., 2007]:

De Commissie adviseert de locatiekeuze voor een specifiek project goed te onderbouwen in een besluit-MER. Besteed daarbij ook aandacht aan de milieuelementen. Dit geldt temeer als er geen plan-MER wordt opgesteld waarin een afweging van de verschillende locaties voor CO₂-opslag plaatsvindt.

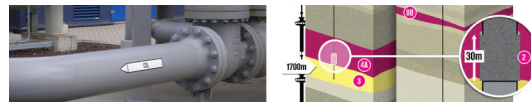
De Commissie refereert in haar advies aan een besluit-MER en een plan-MER. Een Besluit-MER heeft in dit geval betrekking op een specifiek CO₂-injectieproject, waarvoor een MER wordt opgesteld. Het plan-MER is voortgekomen uit de strategische milieubeoordeling (SMB) en heeft tot doel de milieueffecten van overheidsplannen en -programma's inzichtelijk te maken.

Een plan-MER kan beschrijven welke ondergrondse benutting mogelijk en wenselijk is in de regio Barendrecht. In een plan-MER kan tevens een afweging worden gemaakt tussen verschillende hergebruikmogelijkheden van de bovengrondse infrastructuur. Hergebruik van reservoirs is aan de orde in de besluitvorming binnen de Mijnbouwwet.

De overheid heeft voor het gebruik van de diepe ondergrond voor de regio Barendrecht nog geen beleid opgesteld of een plan-MER uitgevoerd. Wel is de provincie begonnen met een verkennende studie naar mogelijkheden voor de winning van thermische energie via aardwarmte [Provincie Zuid-Holland, 2008]. Hier zijn echter nog geen conclusies aan verbonden.

Het ontbreken van beleid en daarmee een toetsingskader is onderkend in de richtlijnen van dit MER. Hierin is aangegeven dat de initiatiefnemer binnen het besluit-MER gevraagd wordt zoveel mogelijk aspecten en afwegingen te belichten, die onderdeel uitmaken van een plan-MER. Als relevant onderwerp is hierbij naar voren gekomen de beschrijving van de locatiekeuze. Het bevoegd gezag heeft in de richtlijnen met betrekking tot dit aspect opgenomen als essentiële informatie:

Een onderbouwing van de locatiekeuze voor de twee gasvelden, met specifiek aandacht voor milieugerelateerde argumenten.



Dit hoofdstuk geeft de onderbouwing van de locatiekeuze. Daarbij worden onderstaand eerst de gehanteerde criteria benoemd en het selectieproces beschreven.

Selectiecriteria

Voor de initiatiefnemer geldt voor dit project bij het zoeken naar de geschikte locatie drie hoofddoelstellingen:

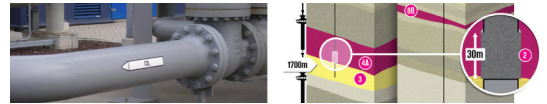
- de opslag moet veilig plaatsvinden;
- het project dient kosteneffectief uitgevoerd te worden, en
- er moet worden voldaan aan de uitgangspunten van de overheidstender.

Bebouwing nabij de opslaglocatie

Als een aanvullende randvoorwaarde kan de afwezigheid van bebouwing nabij de locaties en boven de reservoirs worden toegevoegd. De achterliggende gedachte daarbij is gebaseerd op mogelijke effecten op de bevolking, indien zich een calamiteit zou voordoen en eventuele gebruiksbeperkingen. Als gevolg is daarom gesteld dat de opslag veilig moet plaatsvinden, onafhankelijk of er bebouwing in de directe omgeving aanwezig is. Dit stelt daarmee hoge eisen aan de veiligheid van de opslag, voor de directe toekomst en voor de lange termijn. Voor de directe toekomst, tijdens de aanlegfase en injectiefase dient rekening gehouden te worden met de huidige aanwezige bebouwing. Voor de lange termijn veilige opslag geldt dat de bovenliggende grond herbruikbaar moet zijn voor alle mogelijke functies, waaronder toekomstige bebouwing. Daarmee komt voor de lange termijn de geschetste randvoorwaarde voor de afwezigheid van bebouwing te vervallen en wordt dit gezien als onderdeel van de hoofddoelstelling dat de opslag veilig moet plaatsvinden.

Selectieproces

Het selectieproces bestaat uit twee fasen. Eerst worden alle mogelijke locaties in beeld gebracht en vindt een selectie plaats op basis van tijdige beschikbaarheid van de reservoirs en aanwezigheid van CO₂-bronnen nabij de locaties (paragraaf 2.2). Vervolgens worden de geschikte locaties en reservoirs getoetst aan meer specifieke criteria. Daarvoor wordt eerst een beschrijving gegeven van het reservoir en de aanwezige putten, gevolgd door de meer specifieke toetsing (paragraaf 2.3).



- Selectiecriteria locatie**
(meer globaal par. 2.2)
- veilig
 - kosteneffectief
 - conform tender

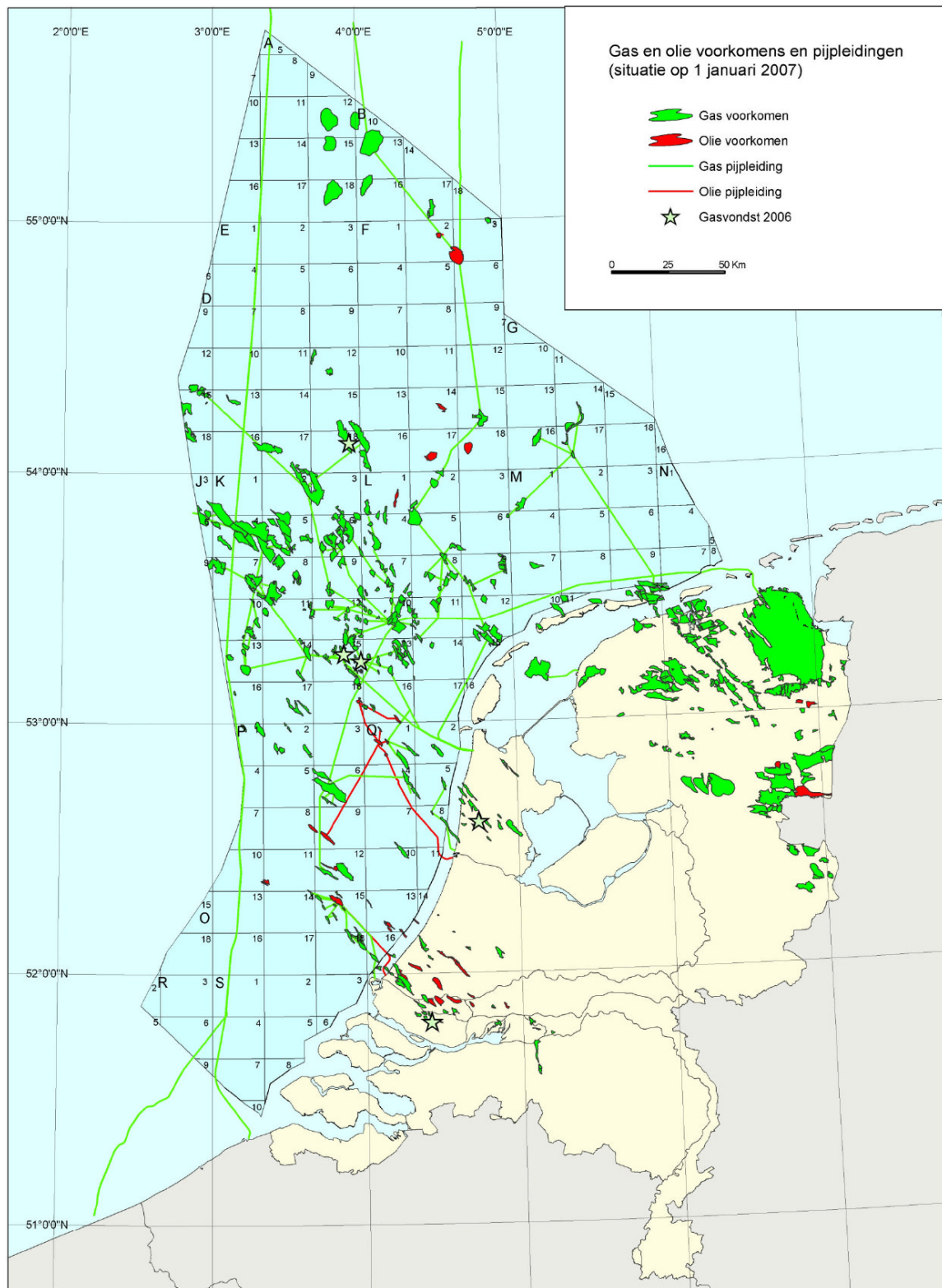
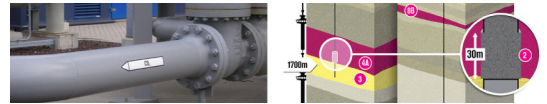


- Toetsingcriteria reservoir en putten**
(meer detail par. 2.3)
- Geschiktheid ondergrond
 - Beweging ondergrond tijdens gasproductie
 - Toepasbaarheid reservoir
 - Gaskarakteristieken van het reservoir
 - Putten
 - Situatie op maaiveld
 - Randvoorwaarden beleid, wet- en regelgeving

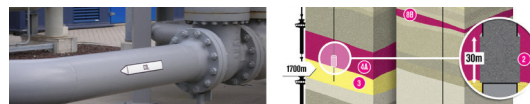
Schema van de toepassing van selectiecriteria voor de locatiekeuze gevolgd door de toetsing van de geschiktheid van de geselecteerde reservoirs (in het verlengde van de AMESCO-toetsingstabel).

2.2 Selectie van geschikte reservoirs

Nederland beschikt over gasvelden onder het vaste land (zogenaamde onshore velden) en gasvelden onder de Noordzee (zogenaamde offshore velden). Figuur 2.1 geeft een overzicht van de ligging van de bekende Nederlandse gasvelden.



Figuur 2.1. Overzicht van de ligging van de Nederlandse gasvelden, aangegeven in het groen (rood geeft de olievelden weer).



De gasvelden kunnen bestaan uit één of meerdere reservoirs. De gasvelden worden ontwikkeld vanaf een winlocatie aan maaiveld. Zodoende zijn de winlocaties gekoppeld aan gasvelden en reservoirs. De naam van een winlocatie is veelal gerelateerd aan de geografische ligging van de winlocatie. De naamgeving van velden en reservoir is veelal gekoppeld aan de gesteentelaag, of formatie, waarin zich het gas of de olie bevindt.

De locatiekeuze is vooral een reservoirkeuze, aangezien eigenschappen van een reservoir in belangrijke mate bepalen of het reservoir als een veilige opslag voor CO₂ kan worden gezien. Dat geldt voor het reservoir zelf, maar ook voor de aanwezige putten. In het verlengde daarvan is de resterende hoeveelheid aardgas in het reservoir bepalend of het reservoir op korte termijn van enkele jaren beschikbaar is voor CO₂-opslag. De bovengrondse situatie is vooral van belang bij het bepalen van een geschikte CO₂-bron in de nabijheid van een reservoir.

De locatiekeuze, gebaseerd op geschikte reservoirs en de nabijheid van een CO₂-bron, is op drie niveaus uitgevoerd:

- de afweging van het gebruik van een reservoir onshore versus offshore, oftewel de afweging tussen een reservoir onder de Noordzee of onder het vaste land;
- op landelijk niveau: de afweging tussen de reservoirs in Noord-Nederland en in West-Nederland;
- op regionaal niveau: de keuze uit reservoirs in de regio, waaronder de afweging voor het tweede reservoir nadat het reservoir van de locatie Barendrecht vol is.

Onderstaand worden de mogelijkheden beschreven voor offshore, Noord-Nederland en West-Nederland. Nadat een overzicht is gegeven van mogelijkheden worden de drie hoofddoelstellingen getoetst: veiligheid, kosteneffectiviteit en overheidstender. Dit leidt tot de uiteindelijke locatiekeuze.

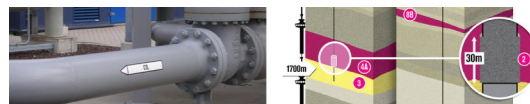
2.2.1. Beschrijving mogelijkheden offshore, Noord-Nederland en West-Nederland

Figuur 2.1 toont een overzicht van de bekende Nederlandse gasvelden, zowel onshore (onder land) als offshore (onder zee).

Offshore

Zoals blijkt uit figuur 2.1 bevinden zich op de Noordzee verschillende gasvelden, die mogelijk in aanmerking komen voor de opslag van CO₂. Daarbij zijn twee concepten denkbaar:

- Herinjectie van CO₂ bij een productiebron.
Indien bij de productie van aardgas relatief veel CO₂ wordt meegeproduceerd, kan het CO₂ gescheiden worden van het aardgas nabij de productieput. Het geproduceerde CO₂ kan vervolgens weer worden geïnjecteerd in het reservoir.
Dit concept wordt al toegepast door het Gaz de France project op K12. Een vergelijkbaar reservoir is voor SCS op dit moment niet beschikbaar.



- Injectie offshore, bron onshore.

Een tweede optie is het gebruik van een onshore bron, waarbij met behulp van een nieuwe pijpleiding het CO₂ naar een leeggeproduceerd veld offshore wordt gebracht. Bij dit concept is het van belang in hoeverre een nieuwe transportleiding aangelegd moet worden. De bestaande transportleidingen vormen veelal een onderdeel van een netwerk waarin aardgas vanaf de Noordzee wordt afgevoerd naar land. Het mengen van aardgas met CO₂ is niet wenselijk, bovendien stroomt het aardgas naar land toe en zou CO₂ in tegengestelde richting moeten stromen. Een nieuwe transportleiding zal daarom noodzakelijk zijn. Er zal op land eveneens een transportleiding vanaf de bron naar de kust aangelegd moeten worden. Daarbij is het van belang dat bij het veld een platform beschikbaar is, aangezien anders de toegankelijkheid beperkt is.

Het gasveld Q16 zou zich eventueel kunnen lenen voor deze optie. Dit bevindt zich nabij Rijnmond en daarbij in de buurt van mogelijk bruikbare CO₂-bronnen. Dit is echter een zogenaamd "subsea" gasveld, waarop geen platform staat. Dit beperkt de mogelijkheden van onder meer monitoring in de directe omgeving.

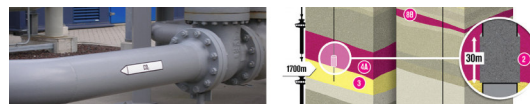
Noord-Nederland

De onshore velden bevinden zich in Noord-Nederland, het IJsselmeergebied en West Nederland. De capaciteit in het IJsselmeergebied is beperkt, zoals uit figuur 2.1 blijkt. De grootste capaciteit bevindt zich in Noord-Nederland. Hierbij valt direct het Slochterenveld op in Groningen. Doordat hier nog voor circa 40 jaar gas geproduceerd wordt, waarbij menging met CO₂ niet gewenst is, wordt veelal de beschikbare capaciteit exclusief Slochteren in beeld gebracht.

In Noord-Nederland bevinden zich meerdere gasvelden, waarvan een aantal vrijwel leeggeproduceerd zijn. Een deel van de leeggeproduceerde gasvelden wordt gebruikt voor de opslag van productiewater, dat bij winning van olie of gas uit de diepe ondergrond mee omhoog komt. Daarnaast worden reservoirs gebruikt voor de tijdelijke opslag van aardgas. In perioden van grote vraag naar aardgas kan vanuit deze velden extra geleverd worden.

Daar waar relatief veel gasvelden voorkomen in Noord-Nederland, bevinden zich hier wat weinig CO₂-bronnen. Voor het effectief benutten van de beschikbare gasreservoirs betekent dit dat CO₂ aangevoerd moet worden via transportleidingen. De huidige situatie met betrekking tot mogelijke bronnen in Noord-Nederland is als volgt:

- Er zijn geen zuivere of geconcentreerde (bijvoorbeeld meer dan 50%) CO₂-bronnen in Noord-Nederland. CO₂ wordt in andere samenstellingen geproduceerd bij het chemiepark Eemshaven, VAM Wijster en op kleinere schaal bij de lokale industrie.
- Zowel Nuon als RWE zijn van plan in de Eemshaven een energiecentrale te bouwen. Dit zal aanvullende CO₂-emissies opleveren, die mogelijk in leeggeproduceerde gasreservoirs opgeslagen kunnen worden.
- Als alternatief kan aan een Zero Emission Power Plant (ZEPP) gedacht worden, waarbij ter plaatse van een gasveld een energiecentrale wordt geplaatst. De geproduceerde CO₂ wordt geherinjecteerd. Dit concept is onderzocht voor een locatie nabij Drachten.



Aangezien er op korte termijn – deels ook door de afwezigheid van een afvanginstallatie (capture) – geen CO₂ bron in Noord-Nederland beschikbaar is, zal voor de huidige vergelijking moeten worden uitgegaan van een CO₂-bron met een relatief lang transportleidingtracé.

West-Nederland

In West-Nederland zijn zowel geschikte CO₂-bronnen als leeggeproduceerde gasreservoirs beschikbaar. Bij Pernis bevindt zich een raffinaderij waar vrijwel pure CO₂ beschikbaar is. Het CO₂ wordt al afgevangen en voor een gedeelte hergebruikt.

In de omgeving van Pernis bevinden zich gasvelden, waarvan een aantal leeggeproduceerd of vrijwel leeggeproduceerd is. Tabel 2.1 geeft voor West-Nederland een overzicht van de mogelijk geschikte gasvelden.

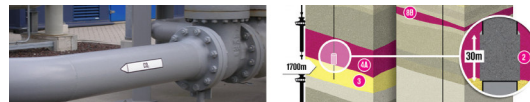
Tabel 2.1. Overzicht van gasvelden in West-Nederland met karakteristieken.

Gaswinlocaties	Verwachte einddatum productie	Oude of verlaten putten aanwezig?	Verwacht volume CO ₂ -opslag (Mton)	Geschiktheid voor huidig project
Barendrecht	2010	N	0,8	J
Barendrecht-Ziedewij	2014	N	9,5	J
Botlek	2022	N	29,2	N
De Lier	1993	J	5,9	N
Hekelingen	2020	N	2,2	N
Oud-Beijerland Zuid	2015	N	1,9	N
Pernis	2022	J	4,6	N
Pernis-West	2022	N	13,8	N
Reedijk	2014	N	2,7	N
Spijkenisse Oost	2017	N	2,2	N
Spijkenisse West	2017	N	2,2	N
's Gravenzande	2016	J	10,8	N
Gaag	2022	N	20,2	N

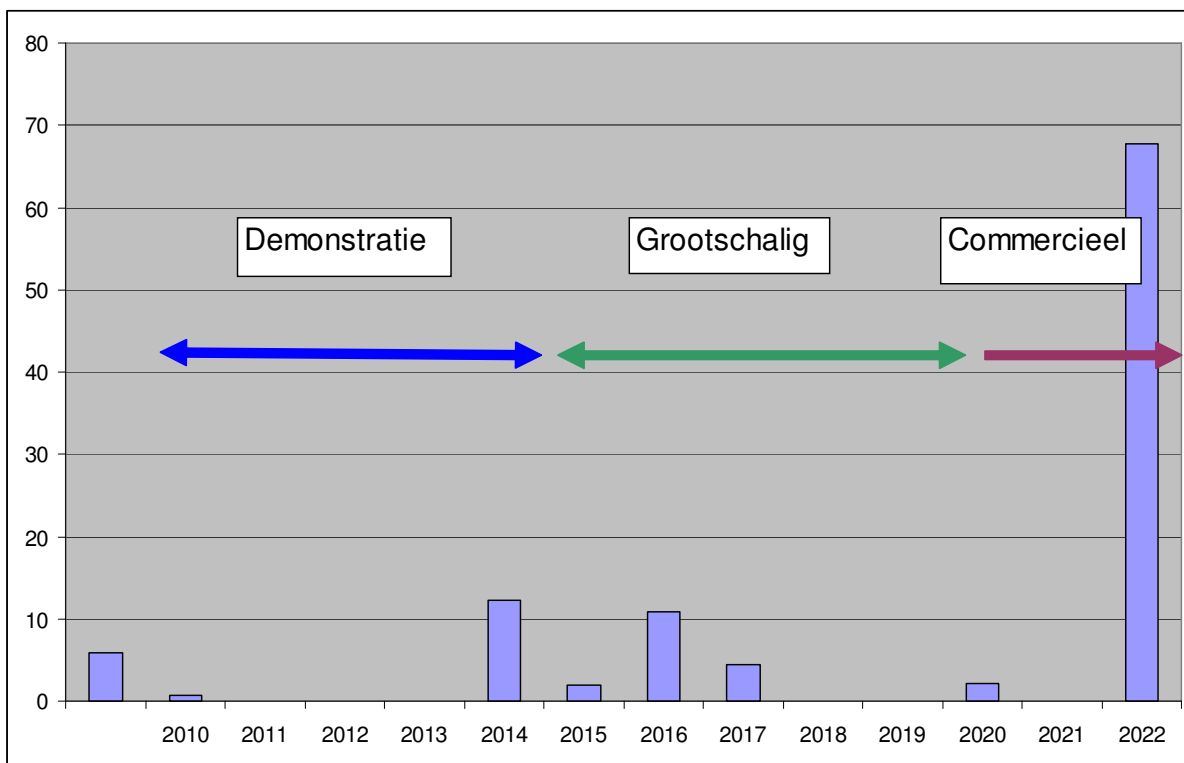
Doordat in West-Nederland zowel een CO₂-bron met afvang beschikbaar is, als meerdere leeggeproduceerde gasvelden in aanmerking lijken te komen, worden de genoemde gasvelden nader getoetst op het tijdig beschikbaar komen voor dit demonstratieproject. Als onderdeel van de randvoorwaarden van de tender geldt dat minimaal 2 Mton in 10 jaar dient te worden opgeslagen. Oorspronkelijk is aangegeven dat het project dient te starten in 2009, later is dit bijgesteld tot 2011.

De tenderprocedure schrijft randvoorwaarden voor, zoals de start van injectie op korte termijn en minimaal opslagvolume. Indien de beschikbare velden beoordeeld worden los van deze criteria, blijkt het volgende.

Onderstaande figuur geeft aan dat in de nabije toekomst in West Nederland meer velden in aanmerking als opslaglocaties. In de figuur zijn drie perioden opgenomen, waarin nieuwe projecten starten vanaf 2010 tot 2015 voor eerste demonstratieprojecten, van 2015 tot 2020 voor grootschalige demonstratieprojecten en vanaf 2020 voor commerciële toepassing (vrijwel geen overheidsinvloed meer). Deze perioden en de ontwikkelingsstappen die hierin zijn opgenomen, zijn afkomstig van het nationaal beleid uit onder meer Energierapport 2008.



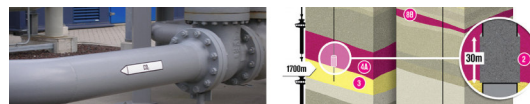
Naast deze inventarisatie is een vergelijkbaar overzicht opgesteld voor alle velden onshore en door Nogepe voor de offshore velden. Dit geeft een overzicht van mogelijk beschikbare velden en de beschikbaarheidsdatum. Van de zijde van de initiatiefnemer kunnen overigens geen uitspraken worden gedaan over velden op land of zee die niet in haar beheer zijn, dit in verband met de noodzakelijke toegang tot de (geologische) veldgegevens. Beperkende factoren blijven wel de beschikbaarheid van een 'zuivere' bron, de afstand tussen bron en opslaglocatie en de (veiligheids)karakteristieken van een veld.



Figuur met beschikbaarheid van velden in West Nederland, waarin aangegeven de door de overheid benoemde perioden (twee demonstratieprojecten vanaf 2010; tussen 2015 en 2020 twee grootschalige demonstratieprojecten en vanaf 2020 volledige CCS benutting).

Referenties:

- Potential for CO₂ storage in depleted gas fields on the Dutch Continental Shelf, Phase 1: Technical assessment, Nogepe, juni 2008
- Energierapport 2008, EZ, juni 2008, waarin onder meer is aangegeven dat tot 2012 tenminste vier afvang- en twee opslagprojecten tot stand komen en wordt de innovatie van CCS doorgezet. De resultaten van deze fase dienen ter ontwikkeling van de grootschalige demonstratieprojecten.



Uit tabel 2.1 blijkt dat het gasreservoir bij de locatie De Lier voldoet aan beide criteria. De productie is al afgerond en de capaciteit zou moeten volstaan voor maximaal 5,9 Mton. Tabel 2.1 maakt duidelijk dat ook locatie Barendrecht tijdig beschikbaar komt, maar met een te klein volume. Het is wel mogelijk deze locatie te combineren met een grotere locatie die enkele jaren later beschikbaar komt. Hiervoor komt de combinatie Barendrecht met Barendrecht-Ziedewij in beeld. Onderstaand wordt in de nadere afweging beide opties meegenomen.

De Lier

Het gasveld bij de winlocatie De Lier is sinds 1993 ingesloten. Alle (meer dan 40) putten zijn al afgesloten en bijna alle bovengrondse locaties zijn opgeruimd. De reden dat er zo veel putten zijn, is dat er ook een olieveld aanwezig is. Niet alle putten die door het gasreservoir gaan zijn dus ook aangesloten (geperforeerd) op dat reservoir. Nadat de putten zijn afgesloten met cement, is het bovenste gedeelte van iedere put tot enkele meters onder maaiveld verwijderd. Het gebied is daarna weer overgedragen aan de oorspronkelijke eigenaren. Inmiddels is er nieuwe bebouwing gekomen. Als gevolg van deze ontwikkelingen zijn de oorspronkelijke putten niet meer direct toegankelijk voor injectie en monitoring.

Combinatie Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij

De winning uit het gasveld bij de locatie Barendrecht wordt in 2010 afgesloten. Er zijn twee putten, die goed toegankelijk zijn. Gezien de grootte van het beschikbare reservoir, kan dit gedurende een periode van drie jaar gevuld worden. Daarna komt de locatie Barendrecht-Ziedewij in aanmerking om niet alleen tot 2 Mton in 10 jaar op te slaan, maar in de daarop volgende jaren tot ruim 9 Mton.

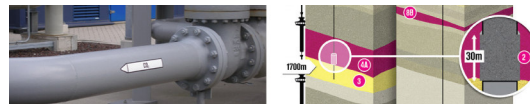
Bij de onderstaande afweging van mogelijkheden worden offshore, Noord-Nederland, De Lier en Barendrecht / Barendrecht-Ziedewij met elkaar vergeleken.

2.2.2. Toetsing van de doelstellingen

Zoals bovenstaand aangegeven zijn de drie hoofddoelstellingen veiligheid, kosteneffectiviteit en de tendervoorwaarden. Er zijn criteria benoemd, welke zijn gegroepeerd naar deze hoofddoelstellingen. Onderstaand worden de criteria besproken en wordt aangegeven hoe mogelijke locaties of regio's hierop scoren.

Veiligheid

Voor een veilige opslag van CO₂ wordt uitgegaan van leeggeproduceerde gasreservoirs. Dit betekent dat bij de locatiekeuze de diepe waterlagen (aquifers) buiten beschouwing zijn gelaten. Aquifers kunnen wel een veilig opslagreservoir voor CO₂ zijn, maar het is moeilijker om dit aan te tonen omdat er van nature geen gas is opgeslagen. Gasreservoirs worden vanuit de basis gezien als een aantoonbaar veilige vorm van CO₂-opslag, aangezien in deze ondergrondse structuren het aardgas miljoenen jaren opgesloten heeft gezeten. Er kan voor worden gekozen de uiteindelijke opslagdruk onder het drukk niveau van het omgevende gesteente te houden. Zolang de omgevingsdruk groter is dan de druk in het gasveld, zal mogelijke uitstroming worden tegengegaan. Bij de leeggeproduceerde

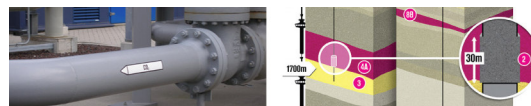


gasreservoirs wordt vervolgens in het bijzonder aandacht besteed aan de putten. Deze dienen bij de start van het injectieproject toegankelijk te zijn.

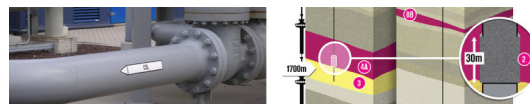
- Geschikt reservoir:
 - a) Hierbij gaat het om zaken als injectiviteit, breuk- en scheurvorming, opslagcapaciteit, risico van aardtrillingen.
 - b) Offshore komen geschikte reservoirs voor, evenals in Noord-Nederland. De reservoirs van de locaties De Lier en van beide locaties in Barendrecht voldoen aan de criteria.
- Geen (zo min mogelijk) afgesloten putten:
 - a) Als er al afgesloten putten zijn in het reservoir moet heel nauwkeurig gekeken worden naar de manier van afsluiten (abandonering), om de geschiktheid voor CO₂-opslag te evalueren. Putten die nog in productie zijn kunnen op optimale wijze worden afgesloten.
 - b) Zowel offshore als in Noord-Nederland zijn gasreservoirs nog in productie. Er zijn afgesloten putten, maar naar verwachting tevens voldoende reservoirs met goed toegankelijke putten. Dit geldt ook voor de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. Voor de locatie De Lier geldt echter dat er relatief veel afgesloten putten voorkomen.
- Toegankelijkheid afgesloten putten:
 - a) Niet toegankelijke putten in een veld maken het veld minder geschikt voor opslag. Omdat er geen gebruikersbeperkingen zijn voor oude (verlaten) puttenlocaties, kan nieuwbouw plaatsvinden boven de putten, waardoor deze niet meer toegankelijk zijn.
 - b) Offshore putten zijn toegankelijk vanaf een productieplatform. Indien de putten zich niet nabij een platform bevinden, wordt de toegankelijkheid minder gunstig. Voor de onshore locaties geldt dat in Noord-Nederland ook afgesloten putten veelal nog goed bereikbaar zijn. Dit geldt niet voor De Lier, waar zich al afgesloten putten bevinden onder nieuwe bebouwing. De putten van de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij zijn nog operationeel en daarmee goed toegankelijk. Wel hebben de putten afgesloten zijtakken.

Kosteneffectief

CO₂-opslag zal in de toekomst op grotere schaal toegepast kunnen worden indien het kosteneffectief kan plaatsvinden. Dit betekent dat de kosten voor afvang, transport en opslag opwegen tegen de kosten (bijvoorbeeld vertaald in de prijs van emissierechten) van CO₂-uitstoot. De kosten voor dit demonstratieproject worden mede bepaald door de afvang van CO₂ en de transportafstand. Voor de afvang van CO₂ is het van belang dat de bron een zo zuiver mogelijk CO₂ produceert, zodat geen aanvullende scheiding van gassen meer nodig is. Gebruik maken van bestaande afvangfaciliteiten heeft uiteraard de voorkeur. Ten aanzien van transport geldt dat een korte transportroute leidt tot lagere kosten, zodat de opslagreservoirs bij voorkeur nabij een CO₂-bron worden geselecteerd. Indien mogelijk wordt gebruikt gemaakt van bestaande leidingen en (aangepaste) putten. Voor de gasreservoirs geldt dat deze leeggeproduceerd dienen te zijn, zodat geen aardgas verloren gaat. Bij voorkeur wordt gebruik gemaakt van bestaande putten, aangezien het boren van een nieuwe put aanzienlijke kosten met zich brengt.



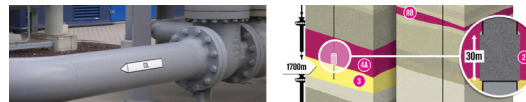
- Pure bron:
 - a) De kosten van CO₂-afvang zijn zeer hoog en kunnen nog niet betaald worden uit de verkoop van emissierechten. Voor een opslag-demonstratieproject is het dus nodig dat kosten van CO₂-afvang zo laag mogelijk worden gehouden.
 - b) Offshore bevinden zich geen pure bronnen. Wel is het mogelijk meegeproduceerd CO₂ te scheiden en te herinjecteren. In Noord-Nederland zijn momenteel eveneens geen pure CO₂-bronnen beschikbaar. Dit geldt echter wel voor de beide opties in West Nederland, bij de locaties De Lier en bij Barendrecht in combinatie met Barendrecht-Ziedewij.
- Aanleg nieuwe pijpleiding / boren nieuwe putten:
 - a) Omdat het bij een demonstratieproject om relatief kleine volumes gaat, is het verder belangrijk dat de bron en de opslaglocatie niet al te ver uiteen liggen. Wanneer dit wel het geval is, worden de transportkosten relatief hoog. Ook vanuit veiligheid is het goed de pijpleiding kort te houden om het lekkagerisico te minimaliseren. Het aanpassen en daarna hergebruiken van putten is meestal kosteneffectief in vergelijking met het opnieuw boren van putten.
 - b) Door de afwezigheid van bronnen in de omgeving, geldt voor offshore en Noord-Nederland dat zoveel mogelijk gebruik zou moeten worden gemaakt van bestaande leidingen. Offshore is dit waarschijnlijk niet mogelijk, behalve bij het concept van herinjectie. Voor Noord-Nederland zou een pijpleiding over grote afstand nodig zijn. De locatie De Lier zou mogelijk bestaande CO₂-transportleidingen kunnen gebruiken, maar voor de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij zullen nieuwe leidingen aangelegd moeten worden. Ten aanzien van herbruikbaarheid van infrastructuur geldt verder dat de putten van Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij herbruikbaar zijn (na een workover). Bij de locatie De Lier zouden nieuwe putten geboord moeten worden.
- Gasproductie op tijd klaar / leeggeproduceerd:
 - a) Indien CO₂ wordt geïnjecteerd terwijl via een tweede put nog gasproductie plaatsvindt, bestaat het risico dat CO₂ zich bij de winput gaat mengen met het aardgas (CO₂-doorbraak in de winput). Dit leidt er toe dat de gasproductie voortijdig gestopt moet worden. Vandaar dat (zeker voor kleinere velden) voor de reservoirs geldt dat geen verdere economische productie mogelijk is, of een zeer beperkte, totdat CO₂ bij de productieputten komt. Winning is daarna alleen mogelijk wanneer het CO₂ gescheiden wordt van aardgas en weer wordt geherinjecteerd. Dit proces vindt al plaats in K12b.
 - b) Offshore komen velden binnenkort beschikbaar (maar niet voor de optie van herinjectie van CO₂), evenals in Noord-Nederland. De Lier is al uitgeproduceerd en daardoor direct bruikbaar. Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij komen naar verwachting tijdig beschikbaar.
- Emissierechten:
 - a) Bij voorkeur valt de te gebruiken CO₂-bron nu al onder het emissierechtensysteem. Als dat zo is dan kan (in afwachting van de opname van CO₂-opslag onder het emissiehandelssysteem) de zogenaamde "opt-in" regeling getest en gebruikt worden. Dit biedt de mogelijkheid inkomsten te genereren door verkoop van emissierechten.
 - b) Dit is mede afhankelijk van de bron. Voor opslag offshore waarbij CO₂ wordt geherinjecteerd bij de productieput gelden geen emissierechten. Voor de opslag van CO₂ uit een andere bron gelden wel emissierechten. Shell Pernis Raffinaderij valt al onder het ETS (Emission Trading System).



Tendervoorwaarden

Belangrijke uitgangspunten uit de overheidstender voor de locatiekeuze zijn het volume, de mogelijke leereffecten van het project en de startdatum.

- Leereffecten:
 - a) Leereffecten kunnen bestaan uit niet-technische aspecten, zoals juridische procedures, emissierechten en publieke acceptatie. Voor de leereffecten van het demonstratieproject worden projecten op land hoger gewaardeerd dan projecten offshore. Dit is mede omdat er al drie projecten (goed) functioneren op zee en omdat Nederland veel opslagcapaciteit op land heeft en het dus belangrijk is te testen of deze voor CO₂-opslag gebruikt kan worden.
 - b) Op het leereffectencriterium scoren de onshore gebieden en locaties goed en de offshore gebieden minder, aangezien het hierbij slechts aanvullend zal zijn op al bestaande offshore projecten en ogenschijnlijk minder ruimtelijke leereffecten kent. De combinatie van de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij scoort extra goed op dit onderdeel aangezien na slechts enkele jaren al ervaring met het afsluiten van een gevuld reservoir opgedaan kan worden. Het beschikbaar komen van deze inzichten heeft een grote maatschappelijke waarde, waarmee bij andere projecten en in de wet- en regelgeving rekening kan worden gehouden.
- Start in 2009 – 2011:
 - a) De demonstratieprojecten moeten voldoende leereffecten opleveren (en snel genoeg) om de volgende fase (twee grotere projecten rond 2015) mogelijk te maken. In de oorspronkelijke aanbestedingsdocumenten werd gevraagd in 2009 al te beginnen met CO₂-opslag. Gaandeweg is wel duidelijk geworden dat dat niet haalbaar is. Inmiddels wordt een startdatum per 2011 aangehouden. Desalniettemin hecht de overheid nog steeds veel waarde aan een tijdige start, zodat het einddoel (brede implementatie vanaf 2020) haalbaar blijft.
 - b) Tijdig starten met het project kan als de bron, transportleiding en het opslagreservoir allemaal tijdig beschikbaar zijn. Voor alle opties lijken er mogelijkheden te zijn om tijdig, in 2011 te starten, met uitzondering van de herinjectie optie offshore. Voor Noord-Nederland is dit hypothetisch; er is wel een reservoir tijdig beschikbaar, maar door het ontbreken van een bron en pijpleiding wordt een start praktisch niet als haalbaar gezien. Het project in Barendrecht houdt als begindatum 2010 aan.
- Volume, minimaal 2 Mton opslaan in 10 jaar:
 - a) De overheidstender vraagt van het demonstratieproject minimaal 2 Mton op te slaan in een periode van 10 jaar. Dit vormt een selectiecriteria voor de grootte van de beschikbare reservoirs, maar tevens voor de bron.
 - b) Offshore zijn tijdig velden te vinden waarmee aan de voorwaarde van 2 Mton in 10 jaar kan worden voldaan, evenals naar verwachting in Noord-Nederland. De locaties De Lier en Barendrecht met Barendrecht-Ziedewij zijn mede op dit criterium geselecteerd en voldoen daarmee eveneens.



Tabel 2.2. Overzicht selectie van regio's en locaties

Criteria	Offshore		Noord-Nederland	West-Nederland	
	Bron onshore	Her-injecteren	Algemeen	De Lier	Barendrecht Barendrecht- Ziedewij
Geschiktheid reservoir	+	+	+	+	+
Geen afgesloten putten	+	+	+	-	+
Putten toegankelijk	0	+	+	--	+
Beschikbare pure bron	+	-	-	+	+
Nieuwe pijpleiding	--	+	---	0	-
Leeggeproduceerd veld	+	-	+	++	+
Emissierechten	+	-	+	+	+
Leereffecten	-	-	+	+	++
Tijdig starten	+	-	+	++	++
Volume in reservoir	+	-	+	+	+

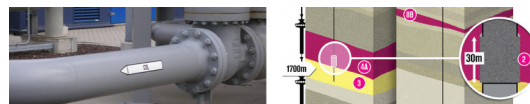
De mate waarin de vier opties voldoen aan de criteria zijn in tabel 2.2 schematisch weergegeven. De indeling in plussen en minnen is indicatief, om een beeld te geven van mogelijkheden en onmogelijkheden. Daarbij is aangehouden dat een '+' aangeeft dat wordt voldaan aan het criterium. Bij '+ +' geldt dat er een extra voordeel bestaat. Omgekeerd betekent een '-' dat niet wordt voldaan en '- -' of zelfs '- - -' geeft aan dat hier ruimschoots niet wordt voldaan aan het criterium. Een score '0' betekent dat voldaan kan worden aan het criterium, maar met de nodige extra inspanning.

2.2.3. Conclusie selectie regio's en locaties

In de bovenstaande afweging zijn verschillende mogelijkheden met elkaar vergeleken. Bij de afweging moet bedacht worden dat, zowel in Noord-Nederland als in offshore gebieden, verschillende locaties voorkomen die voldoen aan de bovenstaande criteria, zonder dat deze locaties specifiek zijn benoemd. Het uiteindelijke oordeel voor beide regio's is echter niet gebaseerd op de locatiespecifieke omstandigheden, maar de kenmerken van de regio. Hieronder worden deze nader samengevat en Tabel 2.3 geeft de bevindingen weer.

Offshore: Deze regio is minder geschikt omdat de leereffecten gering zijn. Immers er vinden al meerdere offshore projecten plaats, waaronder een Nederlands project. Het levert daarbij geen nieuwe inzichten op voor opslagprojecten onshore. Dit uit zich in een mindere score op de randvoorwaarde overheidstender. Daarnaast lijkt de kosteneffectiviteit ongunstig doordat er waarschijnlijk geen inkomsten uit de verkoop van emissierechten gerealiseerd kunnen worden en er mogelijk langere pijpleidingen op land en op de zeebodem nodig zijn.

Noord-Nederland: Deze regio valt op de korte termijn af omdat er geen geschikte pure CO₂-bron beschikbaar is. Dit resulteert in te hoge transportkosten en in een te lange ontwikkelfase. De plannen voor nieuwe energiecentrales in Noord-Nederland kunnen er toe leiden dat in de nabije toekomst ook deze regio in aanmerking komt voor CO₂-opslagprojecten.



De beschikbare bron met pure CO₂ en het feit dat de locaties zich onshore bevinden, betekent dat een locatie in West-Nederland de sterke voorkeur heeft. Van beide opties valt de locatie De Lier af, omdat vele putten niet meer toegankelijk zijn voor injectie en monitoring. Dat is vanuit de randvoorwaarde veiligheid niet acceptabel.

Bovenstaande afwegingen leiden samengevat tot de onderstaande tabel. De gele vlakken geven de belangrijkste redenen aan waarom velden of een cluster minder geschikt is beoordeeld.

Tabel 2.3. Samenvatting toetsing regio's en locaties

Criteria	Offshore	Noord-Nederland	De Lier	Barendrecht / Barendrecht-Ziedewij
Veiligheid	++	++	--	++
Kosteneffectief	-	--	++	+
Overheidstender	-	+	+	++

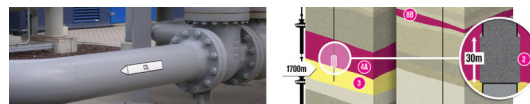
Daarmee valt de keuze op de combinatie van de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. Het aantal randvoorwaarden is dermate groot en stringent dat slechts één echte mogelijkheid overblijft. Dit betekent overigens niet dat CO₂-opslag in Nederland onshore ook in de toekomst tot deze reservoirs beperkt zal moeten blijven. Met andere randvoorwaarden, vooral een latere startdatum, komen naar verwachting meer reservoirs in aanmerking.

Nadat het selectieproces geleid heeft tot een voorkeur voor de locatie Barendrecht in combinatie met de locatie Barendrecht-Ziedewij, dienen de lokale omstandigheden, en dan vooral de ondergrondse structuren, uitgebreid onderzocht te worden om vast te stellen of de veiligheid daadwerkelijk gewaarborgd is. Onderstaand worden daarvoor de technische aspecten van de reservoirs beschreven, gevolgd door een toets aan geschiktheidskenmerken. Daarna wordt in de hoofdstukken 3, 4 en 5 ingegaan op een uitgebreide risicoanalyse van de ondergrondse opslag van CO₂ in de reservoirs van de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij.

2.3 Beschrijving reservoirs

De reservoirs bij de locatie Barendrecht en bij de locatie Barendrecht-Ziedewij zijn bovenstaand geselecteerd als meest geschikt voor CO₂-opslag. Daarbij is gekeken naar de toegankelijkheid van putten en de totale capaciteit. Bij een CO₂-opslagproject komen echter nog veel meer kenmerken aan bod, waarmee bepaald wordt of de opslag daadwerkelijk veilig en kosteneffectief kan plaatsvinden. De vraag naar geschiktheid van reservoirs en putten is in meer generieke zin uitgebreid aan bod gekomen in de "Algemene Milieu Effecten Studie CO₂ Opslag", kortweg aangeduid als AMESCO [AMESCO, 2007].

Binnen AMESCO is een tabel met toetsingscriteria voor de geschiktheid van een reservoir opgesteld. Deze toetsingstabel vormt de basis voor de onderstaande beschrijving. Binnen dit MER is de tabel daar waar zinvol geacht nog nader aangevuld.



Onderstaand worden eerst de kenmerken van het reservoir beschreven. Als achtergrond bij deze beschrijving is in appendix 2 een overzicht gegeven van de geologie van West-Nederland, nabij de beide reservoirs. In de onderstaande beschrijving wordt gebruik gemaakt van de begrippen uit deze appendix.

De beschrijving van de kenmerken wordt gevolgd door de toetsing. Dit levert een overzicht van de geschiktheid, maar tevens aandachtspunten bij de verder uitwerking in het project. Juist deze aandachtspunten komen in de daarop volgende hoofdstukken centraal te staan bij de risicostudies in hoofdstuk 3, 4 en 5.

2.3.1. Beschrijving Barendrecht veld

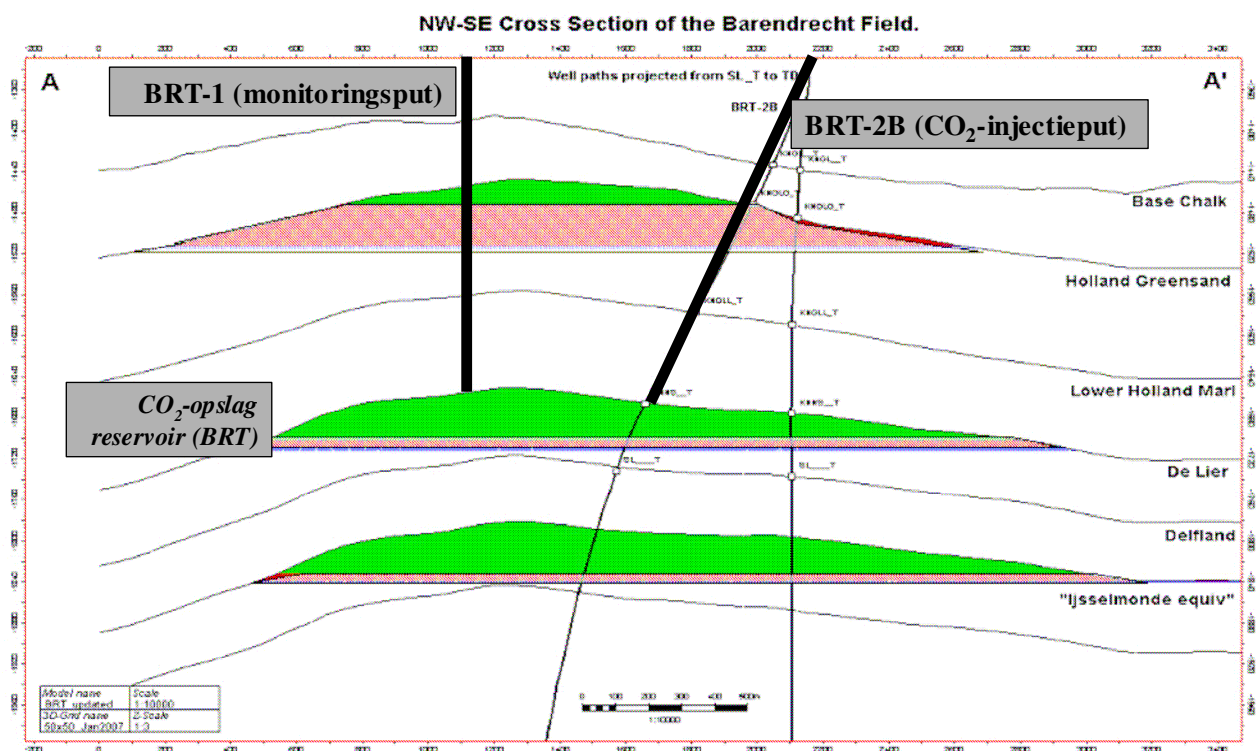
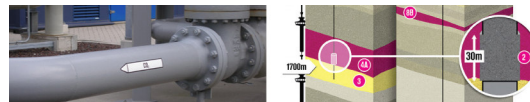
Kenmerken Barendrecht veld

Het Barendrecht veld ligt binnen het gebied van de winningsvergunning 'Rijswijk' ongeveer drie kilometer ten zuidoosten van de Rotterdamvelden en noordoostelijk van de Reedijk- en Oud-Beijerlandvelden.

Reservoirs

De reservoirstructuur bevindt zich op ongeveer 1.700 meter diepte (zie figuur 2.2). Delfstoffen zijn in een viertal gas- en oliehoudende zandsteenreservoirs vastgesteld, welke zich op toenemende diepte bevinden. De figuur toont de boven elkaar liggende reservoirs met in ieder reservoir een rode zone (hierin bevindt zich olie) en daarboven een groene zone (hierin bevindt zich gas). De gesteentepakketten die de reservoirs vormen zijn van boven naar beneden:

- Holland Groenzand Laagpakket (olie en gas);
- De Lier Zandsteen Laagpakket (olie en gas);
- IJsselmonde Zandsteen Laagpakket (olie en gas);
- Delfland Zandsteen Laagpakket (alleen oliehoudend, niet op de figuur weergegeven).



Figuur 2.2. Overzicht van de reservoirs en putten bij de locatie Barendrecht. Het De Lier reservoir zal gebruikt worden als CO₂-opslagreservoir.

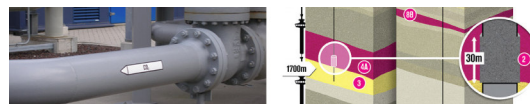
Voor de duidelijkheid, in het bovenstaande wordt gerefereerd aan het De Lier Laagpakket, die zich op circa 1.700 meter diepte bevindt. Dit dient niet te worden verward met de winlocatie De Lier, die zich in het Westland op maaiveld bevindt, en bij de locatieselectie is afgevallen.

Winputten

De putten bij de winlocaties worden aangeduid met een codering. Voor de locatie Barendrecht worden de putten aangeduid als BRT, gevolgd door een nummer, zoals BRT-2. Indien in een bestaande put een zijtak wordt geboord, wordt dit aangeduid met hetzelfde nummer en een letter als toevoeging, zoals BRT-2A.

Zoals bovenstaand is beschreven, bestaat het Barendrecht veld uit meerdere onder elkaar gelegen reservoirs. Een put kan meerdere reservoirs doorboren. Het is mogelijk een perforatie in de putbuis aan te brengen, waardoor gas of olie uit een reservoir in de put kan komen. Er kunnen productieredenen zijn, waarom een put in sommige doorboorde reservoirs wel of geen perforatie heeft.

Het Barendrecht veld is met behulp van put BRT-1 ontdekt in 1984. De put BRT-1 staat in verbinding met het Ijsselmonde Zandsteen Laagpakket. Deze put doorboort ook het De Lier Laagpakket, maar is ter hoogte hiervan niet geperforeerd.



In 1996 is een tweede put geboord, BRT-2. Tijdens het boren van BRT-2 is een deel van de boor verloren op circa 1.400 meter diepte, waardoor deze put niet verder is geboord. De put BRT-2 doorboort het Barendrecht veld dan ook niet. Vanaf circa 1.400 meter diepte zijn naderhand in 1999 ondergronds twee zijtakken geboord, BRT-2A en BRT-2B.

Uiteindelijk is vanaf 1999 productie gestart vanuit put BRT-2B. Daarna heeft vanaf 2000 productie plaats gevonden uit BRT-1. Voor de zijtak BRT-2A geldt dat hier geen gebruik van gemaakt wordt. Deze is reeds volledig geabandonneerd.

Gasproductie

De putten BRT-1 en BRT-2B hebben een klein deel van de gas en olie uit het IJsselmonde Zandsteen Laagpakket geproduceerd totdat formatiewater in de putten is gekomen. Vanaf 2002 heeft BRT-2B uit het hoger gelegen De Lier Laagpakket geproduceerd. Het De Lier Zandsteen Laagpakket is nagenoeg leeggeproduceerd. Het Holland Groenzand Laagpakket (gas/olie) en het Delfland Zandsteen Laagpakket (olie) hebben een laag productiepotentieel en zijn te klein voor verdere ontwikkeling.

CO₂-opslag

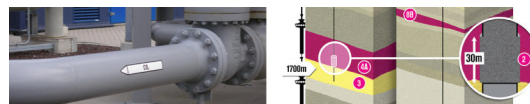
Voor opslag zal alleen het De Lier Zandsteen Laagpakket worden gebruikt. Vanuit dit pakket heeft gaswinning plaatsgevonden. Dit geeft aan dat het De Lier Zandsteen Laagpakket het meest geschikte reservoir is. De geschatte opslagcapaciteit voor CO₂ bedraagt 0,8 miljoen ton. De term Barendrecht veld refereert hierdoor in feite alleen naar productie en opslag in het De Lier Zandsteen Laagpakket. De namen Barendrecht veld en het De Lier Zandsteen Laagpakket reservoir zijn daarom uitwisselbaar in dit document.

Injectieputten

Voor CO₂-injectie kan gebruik worden gemaakt van de bestaande put BRT-2B. Deze dient aangepast te worden, maar is geschikt voor het injecteren van CO₂ in de De Lier formatie. Via deze put kan per jaar gemiddeld 0,3 miljoen ton CO₂ geïnjecteerd worden. BRT-1 kan worden gebruikt voor monitoring, aangezien deze put eveneens tot het De Lier Laagpakket toegang heeft (zie figuur 2.2).

Het cement van de putten BRT-1 en BRT-2B is niet overal in goede staat, waardoor er verbinding zou kunnen zijn tussen de formaties van het Barendrecht veld en de bovenliggende formaties. Dit is een aandachtspunt bij het verlaten van de putten. Het cement van de put BRT-2A is goed.

De overige karakteristieken van het Barendrecht veld zijn in tabel 2.4 weergegeven.

**Tabel 2.4. Veldkarakteristieken van het Barendrecht De Lier Laagpakket**

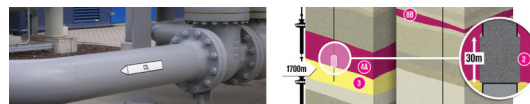
Karakteristiek	Waarde	Eenheid
Initiële formatie druk	174	Bar (abs)
Formatiedruk einde levensduur	30	Bar (abs)
Formatietemperatuur	70	Graden Celsius
Diepte formatie	Ca. 1.700	Meter
Dikte formatie	60	Meter
Condensaatgehalte van het gas	20 – 30	Standaard m ³ condensaat / miljoen Normaal m ³ gas
Subcompartimenten in de formatie	Geen	
Geproduceerd gasvolume (verwacht) einde levensduur	0,25	Miljard Normaal m ³
Totaal gasvolume initieel	0,285	Miljard Normaal m ³
Overige karakteristieken	Dunne, niet economische te ontwikkelen olielaag onder het gas (zogenaamde 'oil-rim').	

2.3.2. Toetsing veldkarakteristieken Barendrecht veld

Het Barendrecht veld is in paragraaf 2.2 geselecteerd, omdat wordt voldaan aan een aantal randvoorwaarden. De bruikbaarheid van het reservoir wordt onderstaand in meer detail getoetst. Daarvoor worden aanvullende gegevens van het reservoir beschreven. De toetsing vindt plaats in het verlengde van de AMESCO-tabel 2.2 [AMESCO, 2007]. De hoofdindeling is enigszins aangepast tot zeven categorieën:

- Geschiktheid ondergrond;
- Beweging ondergrond tijdens gasproductie;
- Toepasbaarheid reservoir;
- Gaskarakteristieken van het reservoir;
- Putten;
- Situatie op maaiveld;
- Randvoorwaarden beleid, wet- en regelgeving.

Onderstaand wordt de toetsing uitgevoerd voor het Barendrecht veld. De indeling in plussen en minnen is indicatief, om een beeld te geven van mogelijkheden en onmogelijkheden. Daarbij is aangehouden dat een '+' aangeeft dat wordt voldaan aan het criterium. Bij '+ +' geldt dat er een extra voordeel bestaat. Omgekeerd betekent een '-' dat niet wordt voldaan en '- -' of zelfs '- - -' geeft aan dat hier ruimschoots niet wordt voldaan aan het criterium. Een score '0' betekent dat voldaan kan worden aan het criterium, maar met de nodige extra inspanning.



Geschiktheid ondergrond (geologie)

Type reservoirgesteente +

- Het De Lier Laagpakket bestaat uit glauconieten rijke, kalkachtige zandsteen. Hierin is tevens sideriet (FeCO₃) aanwezig. De formatie is ongeveer 60 meter dik.
- Zandsteen is gunstig, in principe ++, maar kalkhoudend is minder, vanwege de oplosbaarheid van kalk in zuur water. Dit leidt tot de score +.

Afsluitende bovenlaag +

- Het De Lier Laagpakket in het Barendrecht veld is afgesloten met het Onder-Holland Mergel Laagpakket. Deze kleisteen formatie is ongeveer 90 m dik en maakt deel uit van de Rijnland groep.
- Goede afsluitende laag. Een dik zoutsteen pakket, zoals in Noord-Nederland veelal aanwezig is, zou ++ scoren, mede vanwege de extra plasticiteit van het zoutgesteente. De score is voor het Barendrecht veld echter een + door de kleisteenlaag.

Diepte van het reservoir +

- Het deel van het Barendrecht veld dat in aanmerking komt voor CO₂-injectie bestaat uit een laag op circa 1.670 tot 1.730 meter diepte in het De Lier Laagpakket.
- Diepere reservoirs hebben een groter pakket aan lagen tussen het reservoir en de oppervlakte. De score hier is een +. Vanaf 2.500 m wordt het een ++.

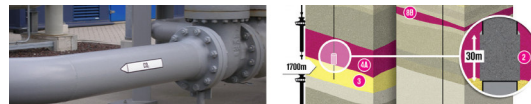
Breuken en breuklijnen +

- Binnen het De Lier Laagpakket van het Barendrecht veld bevindt zich een breukzone. De breuk strekt zich uit tot ongeveer 1.470 meter beneden maaiveld. De doorlaatbaarheid van de breuken is laag.
- Indien geen breuken voorkomen is de score optimaal ++. Doordat zich een enkele breuk voordoet met geen continuïteit naar boven en bovendien bewezen gasdicht, is dit een relatief gunstige omstandigheid en daarvoor een score van +.

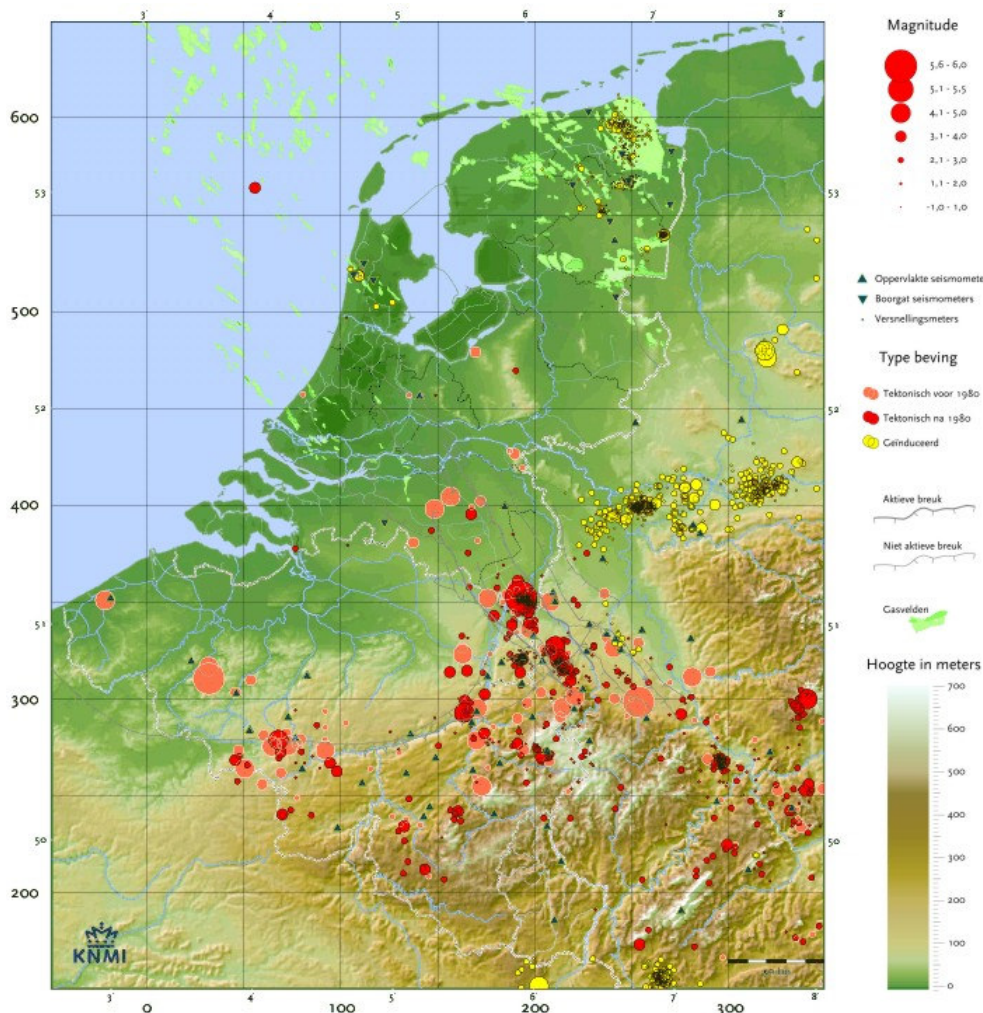
Beweging ondergrond tijdens gasproductie

Kans op aardschokken of trillingen ++

- Compactie van de olie- en gasvoerende lagen kan onderlinge beweging tussen gesteentelagen veroorzaken. Dit kan zich soms aan de oppervlakte manifesteren in de vorm van bodemtrillingen. Tot nu toe hebben zich geen bodemtrillingen voorgedaan als gevolg van de gaswinning uit het Barendrecht veld. Berekeningen laten zien dat de verwachte kans 0% (met een onnauwkeurigheid van circa 5%) is dat dergelijke trillingen zullen voorkomen tijdens de resterende productieperiode in Barendrecht.



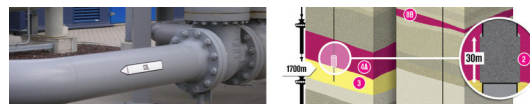
- Het KNMI houdt gegevens met betrekking tot aardbevingen bij. Op figuur 2.3 zijn geen bevingen in de omgeving van Barendrecht aangegeven. Dit bevestigt dat in de regio bij Barendrecht de kans op aardbevingen erg klein is. Het risico van trillingen bij dit reservoir is verwaarloosbaar, wat leidt tot een score ++.



Figuur 2.3. Overzicht aardbevingen in Nederland 1904 – 2004. Bron KNMI

Bodembeweging ++

- Door de winning van koolwaterstoffen uit olie- en gasvoerende gesteentelagen zal de druk in de poriën van het gesteente verminderen, waardoor compactie van de olie- en gasvoerende lagen optreedt. Dit manifesteert zich aan de oppervlakte in de vorm van bodemdaling. Omgekeerd kan de injectie van CO₂ leiden tot bodemstijging. De gemeten daling (sinds de nulmeting in 1989) door olie- en gaswinning bedraagt in dit gebied overal minder dan 2 cm. De nog te verwachten bodemstijging, veroorzaakt door de CO₂-injectie in de Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij velden, bedraagt tot omstreeks het jaar 2050, minder dan 2 cm.



- Een dergelijke stijging is kleiner dan de onzekerheid van de berekening en het is ook niet mogelijk een dergelijke kleine stijging met voldoende precisie te meten. De resultaten van de berekeningen worden uiteraard wel meegenomen bij het beschouwen van de cumulatieve bodembeweging in dit gebied. De score is hier voor ++.

Toepasbaarheid reservoir

Opslagcapaciteit 0

- De opslagcapaciteit voor CO₂ van het Barendrecht veld wordt geraamd op 0,8 miljoen ton CO₂.
- Daarmee vormt het reservoir een relatief klein veld, wat waarschijnlijk alleen in combinatie met andere velden rendabel kan worden gebruikt voor CO₂-opslag. Dit leidt tot een score van 0.

Geen instroom van water in reservoir ++

- Het Barendrecht veld wordt gekenmerkt door de afwezigheid van mobiel water. Water wordt alleen gevonden in gebonden toestand, ingesloten in de poriën van het reservoirgesteente. Dit water kan wel in contact komen met het geïnjecteerde CO₂. De afwezigheid van mobiel aquifer water is gunstig, omdat de combinatie van CO₂ en water leidt tot zuurwater, wat onder meer corrosief kan werken. Naast het aanwezige water lijkt additionele instroom van water geen rol te spelen.
- Afwezigheid van mobiel water geeft een score van ++.

Aanwezigheid CO₂ van nature in reservoir +

- In het Barendrecht veld komt van nature CO₂ voor met een concentratie van 0,04 – 0,6 mol%.
- Aanwezigheid van CO₂ is op zich gunstig, hoewel in lage hoeveelheden. Daarom een score van +.

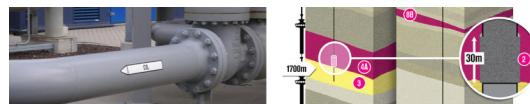
Aanwezigheid van andere restgassen in reservoir (afgezien van resterend aardgas) +

- De aanwezigheid van verschillende restgassen in een reservoir betekent dat hier nadrukkelijk rekening mee moet worden gehouden bij onderzoek naar mogelijke chemische reacties. Er zijn slechts kleine hoeveelheden restgassen gemeten in het reservoirgesteente van het Barendrecht veld. Zo komt H₂S voor met een concentratie van <50 ppm en stikstof met 1,1 tot 1,8 mol%. Onder het gasreservoir bevindt zich een olielaag.
- Weinig restgassen is gunstig, vandaar de score +.

Gaskarakteristieken van het reservoir

Initiële druk in reservoir +

- Het veld bestaat uit vier formaties en pakketten: De Lier, IJsselmonde, Greensand en Delfland. De initiële druk is 174 bar in het De Lier Laagpakket. De temperatuur is op deze diepte 70 °C.
- Het veld kan gevuld worden tot de initiële druk, wat een score van + geeft. Binnen dit project zal het veld echter tot iets minder dan de initiële druk worden gevuld.



Rest druk in reservoir +

- De restdruk na beëindiging van de winning bedraagt naar verwachting circa 30 bar.
- Het veld is vrijwel leeggeproduceerd wat ruimte biedt aan CO₂-opslag. Dit geeft een score van +.

Aanwezigheid aardgas in reservoir +

- Voor het Barendrecht veld geldt dat het binnenkort (2010) zal zijn leeggeproduceerd. Er is 0,25 miljard normaal m³ gas gewonnen en er bevindt zich nog 0,035 miljard normaal m³ gas in het veld. Door de lage restdruk is de resterende hoeveelheid aardgas niet of moeilijk te produceren.
- Er is weinig aardgas aanwezig, vandaar een score van +.

Chemische samenstelling van het te injecteren CO₂ ++

- Het is de bedoeling dat CO₂ wordt opgeslagen en niet allerlei andere gassen. Daarvoor is het van belang de samenstelling van het te injecteren gas te meten en vast te stellen dat dit inderdaad voor het overgrote deel bestaat uit CO₂. Vervolgens is het van belang de toch nog aanwezige andere gascomponenten te beschrijven.
- Uit de gegevens blijkt dat het te injecteren gasmengsel voor 99% of hoger uit CO₂ bestaat. De kleine verontreinigingen bestaan uit: stikstof, waterstof, methaan, methanol en koolstofmonoxide. Dit kan aangeduid worden als een chemisch zuivere vorm van CO₂ en vandaar een score van ++.

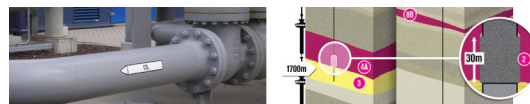
Mogelijke chemische reacties 0

- Over het algemeen zijn de chemische reacties lange termijn effecten (honderden tot duizenden jaren), maar op de korte termijn is chemische verwerking van het cement van de putten een aandachtspunt. Chemische reacties ontstaan veelal door contact met water. Er zit een beperkte hoeveelheid water in het reservoir en in kleine, losse druppeltjes. Dat betekent dat de reactiesnelheid van alle chemische reacties, die afhankelijk zijn van oplossing van CO₂ in water, heel snel zal afnemen.
- Er worden geen negatieve effecten door chemische reacties verwacht op de korte of lange termijn. Mogelijke chemische reacties worden nader uitgezocht bij de lekkagescenario's. Hiervoor een score van 0.

Putten

Operationele putten ++

- CO₂-injectie: Voor CO₂-injectie zal de put BRT-2B gebruikt worden. Met deze put kan CO₂ geïnjecteerd worden in het De Lier Laagpakket van het Barendrecht veld.
- Monitoring: De put BRT-1 zal gebruikt worden voor monitoring. Deze put doorboort het De Lier Laagpakket, maar is ter hoogte hiervan niet geperforeerd. Ten behoeve van de monitoring zal hier een perforatie worden aangebracht.
- Bestaande putten kunnen hergebruikt worden. De putten zijn gemakkelijk geschikt te maken voor injectie en monitoring. Dit geeft een score van ++.



Aandachtspunten abandonnering +

- Het cement van de putten BRT-1 en BRT-2B is niet overal in goede staat. Voor BRT-2 zijn tevens beperkte annulaire drukken waargenomen. Om de initiële integriteit van BRT-2 zeker te stellen, wordt voorafgaand aan injectie de put onderzocht door de 'tubing' te verwijderen en het lek met een 'logging tool' te detecteren. Op basis van de bron/ oorzaak zal het lek worden verholpen, waarna een nieuwe tubing wordt aangebracht.
- Voor BRT-1 bestaan er geen annulaire drukken. De put zal voorafgaand, om te kunnen worden gebruikt voor monitoren van druk en het nemen van monsters, worden geperforeerd, waarbij mogelijke communicatie tussen gashoudende formaties in BRT als gevolg van de staat van het cement worden gecontroleerd. Omdat er geen directe integriteitproblemen zijn, wordt er geen proactieve cement-aanpassing uitgevoerd. Indien de communicatie toch een probleem is, zal er ofwel een additionele cement-aanpassing worden uitgevoerd, of (indien de cement-aanpassing een te lage slagingskans heeft) zal de put niet verder voor monitoren worden gebruikt en mogelijk voortijdig worden afgesloten.
- Na injectie worden pannenkoekpluggen in BRT-1 en BRT-2B geplaatst. In BRT-2A bestaat er een goede en dikke cement afsluiting.
- Extra zorg voor abandonnering, maar geen feitelijk probleem, daarom een score van +.

Afgesloten (geabandonneerde) putten +

- Zoals aangegeven zijn er geen afgesloten putten in het Barendrecht veld. Zijtak BRT-2A, in het verlengde van BRT-2, wordt niet meer gebruikt.
- Er zijn geen afgesloten putten, wel een afgesloten zijtak. Dit geeft een score van +.

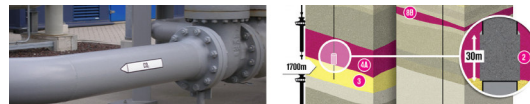
Situatie op maaiveld

Afstand van het reservoir tot aan de bron +

- CO₂ afkomstig van Shell Pernis wordt getransporteerd via een pijpleiding over een lengte van 17 km.
- De afstand is goed overbrugbaar, maar kan niet als 'dichtbij' worden beschouwd. Vandaar een score van +.

Hergebruikopties bestaande transportinfrastructuur +

- Voor het transporteren van CO₂ naar de injectielocatie is de aanleg van een nieuwe pijpleiding vereist. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een leidingstrook en de Buisleidingstraat. Er hoeven geen nieuwe putten geboord te worden, aangezien twee van de bestaande putten zullen worden hergebruikt.
- Op de locatie zijn de putten herbruikbaar, maar de pijpleiding moet aangelegd worden. Dit geeft een score van +.



Ondergrondse benutting biosfeer +

- Er is voor de ondergrond nabij de locatie geen specifieke gebruiksfunctie, zoals een waterwingebied, geothermie of gasopslag gedefinieerd of voorzien. Een onderzoek heeft aangegeven dat in de omgeving van locatie Barendrecht in potentie wel geothermie winning mogelijk is. Dit betreft echter een zeer groot deel van de provincie. In de toetsing is de benutting van geothermie niet als autonome ontwikkeling mee genomen.
- De opslag van CO₂ leidt daarom niet tot beperking van de mogelijke ondergrondse benuttingen. Dit leidt tot een score van +.

In AMESCO is het volgende opgenomen over de relatie tussen CO₂ en landgebruik:

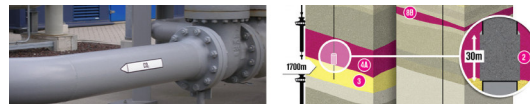
Op grond van bovenstaande conclusies zou men kunnen stellen dat er een beleid moet worden geformuleerd waarbij de opslag van CO₂ wordt verboden in potentieel dicht(bevolkte) gebieden (waaronder drukke infrastructurele werken en toeristenattracties) en in gebieden met een hoge natuurwaarde. In de praktijk zouden, bij een dergelijke aanpak, alleen agrarische gebieden met een lage bevolkingsdichtheid overblijven als mogelijke opslaggebieden.

Bovenstaande conclusies kunnen ook worden gebruikt als argument om, na het permanent verlaten van CO₂-injectionputten, de putmond toegankelijk te houden en om woonwijken en andere soorten bebouwing te verbieden in de directe omgeving van een putmond – aangezien de putmond kan worden beschouwd als het meest kwetsbare deel van een CO₂-opslagreservoir wat betreft eventuele lekkage. Dit betekent dat er zou worden afgeweken van het huidige beleid voor het permanent verlaten van gas- en oliewinningsputten. Nu schrijft de wet voor dat de locatie wordt teruggebracht naar de oorspronkelijke situatie, als onbebouwd terrein, en dat daarna elke soort activiteit is toegestaan bovenop een voormalige putmond.

Men moet echter voorzichtig zijn bij het overwegen van een dergelijke oplossing, want zo'n beleid is alleen relevant voor het huidige landgebruik. Het blijft een feit dat in de afgelopen 2000 jaar de geopolitieke situatie in Europa keer op keer volledig is veranderd, en daarmee ook het bevoegd gezag - en dat de exacte locaties van veel voormalige vuilnisstortplaatsen nu onbekend zijn. Dit werpt de vraag op of zo'n beleid eigenlijk wel zeker kan stellen dat er in de toekomst geen waardevol natuurgebied of woonwijk komt te liggen in de directe omgeving van een voormalige putmond.

Deze onzekerheid wat betreft toekomstig landgebruik en het bewust blijven van de plaatsen van voormalige putmonden, kan een argument zijn om te eisen dat een CO₂-opslagrichting 'storingsbestendig' wordt geconstrueerd Dat wil zeggend met een gegarandeerd maximaal risico op lekkage voor een bepaalde tijd, inclusief of exclusief onderhoud. Dit soort strookt met, bijvoorbeeld:

- Eisen voor vergunningen voor stortplaatsen in Nederland (10 000 jaar, rekening houdend met tussentijds onderhoud - 'eeuwigdurende nazorg');
- IPPC BAT (Geïntegreerde Preventie en Bestrijding van Verontreinigingen Richtlijn - beste beschikbare technieken) voor afvalreservoirs (5.000-10.000 jaar voor dammen met een hoog risico);
- VS vergunningseisen voor uraniumafvalstorthopen (5.000 jaar, zonder rekening te houden met tussentijds onderhoud).



Landgebruik bij injectielocatie -

- Het Barendrecht veld bevindt zich ten zuiden van Rotterdam. Boven het veld bevindt zich deels landbouwgebied en deels stedelijk gebied (Barendrecht). In de nabije omgeving ten noorden en ten noordoosten van het reservoir ligt Barendrecht en ten zuidwesten ligt Heinenoord.
- In het gebied bij de locaties bevindt zich een woonwijk. Er is echter geen waterwingebied of natuurgebied. Vanwege de mogelijke hinder tijdens de injectiefase voor de bewoners daarom een score van -.

Randvoorwaarden beleid, wet- en regelgeving

Beleid met betrekking tot CO₂-opslag 0

- Er is weinig concreet beleid, maar uit de beschikbare (ontwerp) documenten blijkt dat de overheid een voorstander is van klimaatmaatregelen, waaronder CO₂ opslag, mits dit veilig gebeurt.
- Deze neutrale houding geeft als score een 0.

Gebruiksplannen voor het reservoir +

- De provincie is het bevoegd gezag met betrekking tot een deel van de ondergrondse benutting. Voor de leeggeproduceerde reservoirs geldt dat het gebruik voor opslag van CO₂ andere toepassingen uitsluit, zoals tijdelijke opslag van aardgas of het opslaan van productiewater. De aanwezigheid van een met CO₂ gevuld reservoir betekent dat andere functies in de diepe ondergrond hiermee rekening dienen te houden. Dit kan bijvoorbeeld gevolgen hebben voor toekomstig gebruik van aardwarmte. Vooralnog zijn er geen beleidskeuzes vastgelegd door de provincie Zuid-Holland. Dit betekent dat er geen beleidsmatige hindernis is voor CO₂-opslag.
- Een (concrete) beleidsuitspraak in de vorm van een plan-MER of anderszins waarin het reservoir bestemd is voor CO₂-opslag geeft een score van ++. In dit geval is de score een +.

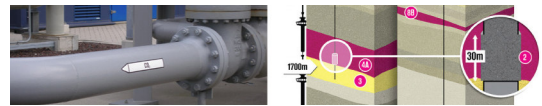
Alle scores zijn in tabel 2.6 samengevat, in combinatie met de scores voor het Barendrecht–Ziedewij reservoir, zodat in één oogopslag de toetsing van beide reservoirs zichtbaar is.

2.3.3. Beschrijving Barendrecht–Ziedewij veld

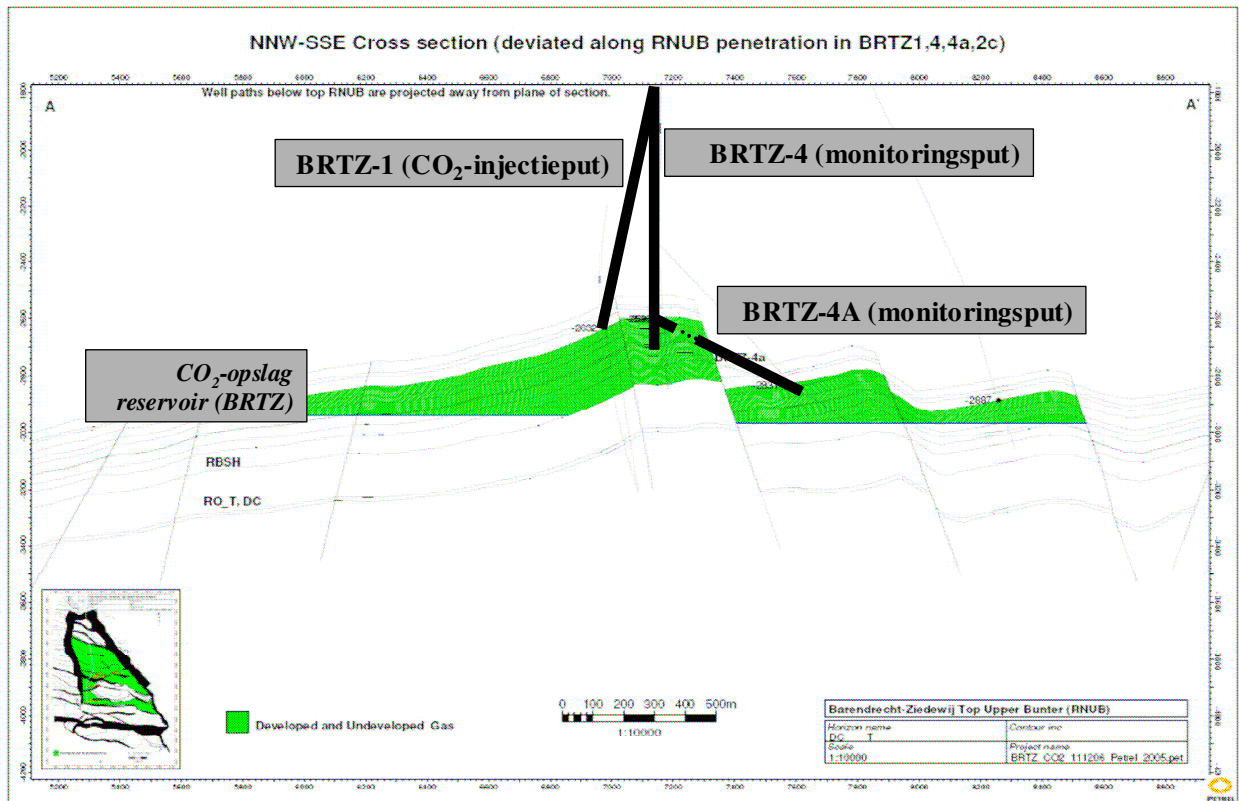
Beschrijving Barendrecht–Ziedewij veld

Veld

Het veld Barendrecht-Ziedewij ligt tevens binnen het genoemde vergunningsgebied Rijswijk. De gashoudende reservoirs bestaan uit zandsteen dat toebehoort aan de Hoofd-Bontzandsteen Subgroep (ook wel 'Bunter' genoemd) en bevinden zich op ongeveer 2.700 meter diepte. Waar het Barendrecht veld bestaat uit verschillende boven elkaar gelegen reservoirs, is dit veld gesplitst in verschillende min of meer naast elkaar gelegen blokken (compartimenten). De diepere blokken staan nauwelijks of niet met elkaar in verbinding. Het hoofdblok beslaat circa 90 procent van het veld en is in de loop der jaren bijna leeggeproduceerd.



Het reservoirgesteente is ontstaan uit fluviatiele afzettingen in een semi-aride omgeving. De leisteen (klei-achtige) afzettingen tussen het Boven en Midden Bunter komen continu voor en vormen een goede afsluiting.



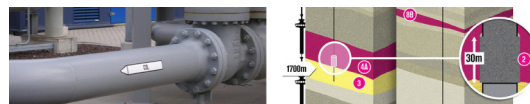
Figuur 2.4. Overzicht van de reservoirs en putten bij de locatie Barendrecht-Ziedewij. De put BRTZ-4A zal in het hoofdblok geperforeerd worden (stippellijn), om deze als monitoringsput te kunnen gebruiken.

Putten

Het Barendrecht-Ziedewij veld is in 1992 ontdekt middels de put BRTZ-1. Zoals bovenstaand beschreven, bestaat het veld uit verschillende compartimenten. In de loop van de daaropvolgende jaren zijn nieuwe putten toegevoegd, of uitgebreid, richting kleinere blokken of andere delen van het hoofdblok.

In 1995 is put BRTZ-2 geboord, met zijtak BRTZ-2C. De put BRTZ-2C doorboort een deel van het Barendrecht-Ziedewij veld dat niet voor CO₂-opslag in aanmerking komt. De putten BRTZ-2, -2A en -2B zijn uiteindelijk niet geschikt gebleken. BRTZ-2C staat niet in verbinding met het grootste blok en heeft verder geen rol bij de CO₂-opslag.

Daarna is in 1997 BRTZ-3 geboord. BRTZ-1 en BRTZ-3 bevinden zich in het grootste blok, waar zoals gezegd 90% van het veldvolume zich bevindt.



De put BRTZ-4 is geboord in 1999. Deze put heeft een zijtak gekregen, put BRTZ-4A, naar een dieper gelegen deel van het Barendrecht-Ziedewij veld. BRTZ-4A doorboort het deel van het Barendrecht-Ziedewij veld dat in aanmerking komt voor CO₂-injectie (hoofdblok). De put zal door middel van perforatie in verbinding worden gesteld met het hoofdblok, mede om nog overgebleven gas te produceren. Deze put wordt hiermee geschikt als een monitoringsput tijdens CO₂-injectie.

Gasproductie

De productie is gestart in 1997 uit het grote blok via BRTZ-1 en BRTZ-3. BRTZ-2C heeft weinig geproduceerd. In 1999 is de productie via BRTZ-4A gestart, maar door teveel water bij het geproduceerde gas is deze productie in 2001 gestopt. Ontwikkeling en productie van de niet aangeboorde subcompartimenten en verdere ontwikkeling van de uitgewaterde subcompartimenten is niet haalbaar. Het grote blok zal naar verwachting in 2014 uitgeproduceerd zijn.

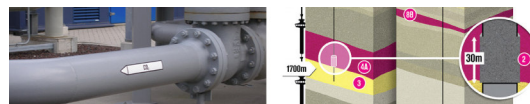
Vanaf de locatie Barendrecht-Ziedewij wordt het gas onbehandeld per pijpleiding getransporteerd naar de Barendrecht gasbehandelingsinstallatie (GBI), waar het op specificatie wordt gebracht voor verkoop.

CO₂-opslag

Het hoofdblok zal voor CO₂-opslag worden gebruikt. De kleinere, afgescheiden blokken zullen niet voor CO₂-opslag worden gebruikt. In het veld is een aantal putten aangebracht die na de gasproductie aansluitend gebruikt kunnen worden voor de injectie en monitoring van CO₂. Voor CO₂-injectie zal de put BRTZ-1 worden gebruikt. De put BRTZ-3 en BRTZ-4A zullen gebruikt worden voor monitoring. De geschatte opslagcapaciteit van het veld is 9,5 miljoen ton CO₂.

Overige veldkarakteristieken van de Barendrecht-Ziedewij Bunter formatie zijn in tabel 2.5 opgenomen.

Tabel 2.5. Veldkarakteristieken van de Barendrecht-Ziedewij Bunter formatie		
Karakteristiek	Waarde	Eenheid
Initiële formatie druk	314	Bar (abs)
Formatiedruk einde levensduur	40	Bar (abs)
Formatietemperatuur	107	Graden Celsius
Diepte formatie	2700	Meter
Dikte formatie	180	Meter
Condensaatgehalte van het gas	65	Standaard m ³ condensaat / miljoen Normaal m ³ gas
Overige karakteristieken	-	
Geproduceerd gasvolume (verwacht) einde levensduur	Ca. 3.6	Miljard Normaal m ³
Totaal gasvolume initieel	Ca. 3.9 (producerende blokken)	Miljard Normaal m ³
Subcompartimenten in de formatie	Drie producerende blokken die in verbinding staan. Hierna worden deze samen 'hoofdblok' genoemd waarin het CO ₂ zal worden opgeslagen. Eén uitgewaterd subcompartiment met weinig gas en meerdere kleine subcompartimenten; deze staan in verbinding met producerende blokken en hierin zal geen CO ₂ worden opgeslagen.	



2.3.4. Toetsing veldkarakteristieken Barendrecht-Ziedewij veld

Evenals het Barendrecht veld wordt ook het Barendrecht-Ziedewij veld in meer detail getoetst. Dit gebeurt op dezelfde onderdelen als bij het Barendrecht veld:

- Geschiktheid ondergrond;
- Beweging ondergrond tijdens gasproductie;
- Toepasbaarheid reservoir;
- Gaskarakteristieken van het reservoir;
- Putten;
- Situatie op maaiveld;
- Randvoorwaarden beleid, wet- en regelgeving.

Geschiktheid ondergrond (geologie)

Type reservoirgesteente ++

- Het Barendrecht-Ziedewij veld bestaat uit zandsteen.
- Zandsteen is een gunstig reservoirgesteente, vandaar de score van ++.

Afsluitende bodemlaag +

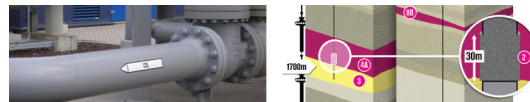
- Het Barendrecht-Ziedewij veld is afgedekt met (dolomitisch) kleisteen van de Keuper (107 m) en Muschelkalk formaties en met daarboven kleisteen van de Altena formatie (241 m).
- Hoewel geen zoutgesteente (++), biedt een dikke laag kleisteen een goede afsluitende laag, met een score van +.

Diepte van het reservoir ++

- Het Barendrecht-Ziedewij veld strekt zich uit op circa 2.630 tot 2.860 meter diepte. Het reservoir bevindt zich in de Upper Bunter en Middle Bunter formatie.
- De bovenliggende laag (overburden) is relatief groot, daarom een score van ++.

Breuken en breuklijnen 0

- Binnen het hoofdblok van het Barendrecht-Ziedewij veld bevinden zich zes breuken, waarvan de grootste breukzone door de Altena groep ligt en reikt tot aan de basis van de Schieland groep. De breukzone komt tot aan meer dan 2.000 m onder het maaiveld. De overige breuken strekken zich niet verder uit dan de Altena groep, op 2.200 m diepte. De doorlaatbaarheid van de breuken is laag.
- Meerdere breuken, maar geen voortzetting richting biosfeer en een lage doorlatendheid in de breuken. Daarom een score van 0.



Beweging ondergrond tijdens gasproductie

Kans op aardbevingen of trillingen +

- Door studie is vastgesteld dat de kans op aardbevingen of trillingen tijdens de gasproductie 10% ($\pm 5\%$) is voor Barendrecht-Ziedewij. Omgekeerd betekent dit dat voor 90% waarschijnlijk geen aardbevingen of trillingen optreden.
- Tijdens de productiefase zijn tot nu toe geen aardbevingen en trillingen waargenomen, vandaar de score van +.

Bodembeweging ++

- De eigenschappen met betrekking tot bodembeweging zullen in het Barendrecht-Ziedewij veld niet afwijken van de eigenschappen, zoals beschreven voor het Barendrecht veld.
- Lange termijn risico, er wordt voor Barendrecht-Ziedewij geen risico op compactie door chemische reacties van CO₂ met mineralen in het reservoirgesteente verwacht.
- Score vanwege het ontbreken van bodembeweging een ++.

Toepasbaarheid reservoir

Opslagcapaciteit ++

- De opslagcapaciteit voor CO₂ van het Barendrecht-Ziedewij veld wordt geraamd op circa 9,5 miljoen ton CO₂.
- De relatief grote capaciteit van het reservoir geeft een score van ++.

Geen instroom van water in reservoir ++

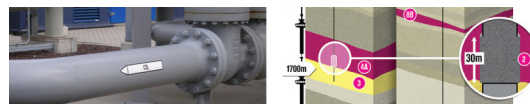
- Het hoofdblok is tijdens de gasproductie droog. Bij één van de subcompartimenten is wel water in het reservoir gekomen, waardoor de gasproductie is gestaakt. Dit is niet het geval in het hoofdblok. Dit geeft aan dat er geen water van buiten het reservoir instroomt.
- Weinig water is gunstig en scoort een ++.

Aanwezigheid van andere restgassen in reservoir +

- Er zijn kleine hoeveelheden N₂ gemeten en geen H₂S.
- Geringe hoeveelheid restgassen is gunstig, score een +.

Aanwezigheid CO₂ van nature in reservoir +

- De concentratie CO₂ die van nature aanwezig is in het Barendrecht-Ziedewij veld is 0,83 mol%.
- Beperkte aanwezigheid is gunstig, score +



Gaskarakteristieken van het reservoir

Maximale, initiële druk in reservoir ++

- De initiële druk is 314 bar, met temperatuur 107 °C.
- Relatief hoge initiële druk geeft de mogelijkheid meer CO₂ op te slaan, vandaar score ++.

Restdruk in het reservoir +

- Het reservoir zal na beëindiging van de productie een relatief lage einddruk hebben van circa 40 bar.
- De lage restdruk betekent dat het CO₂ initieel onder lage druk kan worden geïnjecteerd, wat een score van een + geeft.

Aanwezigheid rest aardgas in reservoir +

- Het Barendrecht-Ziedewij veld zal naar verwachting in 2014 leeggeproduceerd zijn. Er is 3,6 miljard normaal m³ gas gewonnen en er bevindt zich nog 0,3 miljard normaal m³ in het veld, dat niet of moeilijk geproduceerd kan worden.
- De relatief geringe hoeveelheid resterend aardgas vormt een gunstige score, een +.

Chemische samenstelling van het te injecteren CO₂ (verontreinigingen) ++

- Het te injecteren CO₂-gas is voor beide reservoirs hetzelfde gas, afkomstig van Shell faciliteiten in Pernis (voor een overzicht zie de tabel in paragraaf 3.3.5).
- De score is hier door het hoge gehalte aan CO₂ een ++.

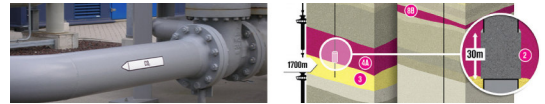
Mogelijke chemische reacties 0

- Over het algemeen zijn de chemische reacties lange termijn effecten (honderden tot duizenden jaren), maar op de korte termijn is chemische verwerking van het cement van de putten mogelijk. Mogelijk kan er ook een reactie optreden van geïnjecteerd CO₂ met resterend methaan in het gasreservoir.
- Er worden geen negatieve effecten door chemische reacties verwacht. Mogelijke chemische reacties worden nader uitgezocht bij de lekkagescenario's. Hiervoor vooralsnog een score van 0.

Putten

Operationele putten ++

- In het deel van het Barendrecht-Ziedewij veld waarvan het de bedoeling is CO₂ in op te slaan, bevindt zich een viertal putten: BRTZ-1, BRTZ-3, BRTZ-4 en BRTZ-4A.
- Voor CO₂-injectie zal de put BRTZ-1 worden gebruikt.
- De putten BRTZ-3 en BRTZ-4A zullen worden gebruikt voor monitoring.
- De putten zijn gemakkelijk geschikt te maken voor injectie en monitoring. Dit geeft een score van ++.



Aandachtspunten abandonnering ++

- Van alle BRTZ-putten is het cement in goede staat.
- Geen extra zorg bij het verlaten van de putten (abandonnering), daarom een score van ++.

Afgesloten (geabandoneerde) putten +

- Er zijn geen afgesloten putten, maar bij de putten komen wel afgesloten zijtakken voor.
- Dit geeft een score van +.

Situatie op maaiveld

Afstand van het reservoir tot aan de bron +

- De totale afstand van de locatie Barendrecht-Ziedewij tot de bron in Pernis bedraagt 21 km. De onderlinge afstand tussen Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij bedraagt 4 km.
- De afstand is goed overbrugbaar, maar kan niet als 'dichtbij' beschouwd worden, vandaar een score van +.

Hergebruiksopties bestaande transportinfrastructuur +

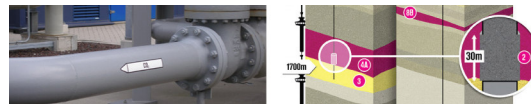
- Transport van CO₂ vanaf Pernis tot de injectielocatie kan grotendeels door dezelfde pijpleiding, die is gebruikt voor injectie in het Barendrecht veld. Een verlenging van de bestaande pijpleiding van 4 km is vereist. De bestaande putten kunnen na een workover worden hergebruikt; één als injectieput en twee als monitoringsput.
- Op de locatie zijn de putten herbruikbaar, de pijpleiding moet vanaf de locatie Barendrecht worden aangelegd, samen geeft dit een score van een +.

Ondergrondse benutting biosfeer +

- Er is voor de ondergrond nabij de locatie geen specifieke gebruiksfunctie, zoals een waterwingebied, gedefinieerd of voorzien. Uit onderzoek blijkt dat de ondergrond in de omgeving van de locatie Barendrecht-Ziedewij niet zo geschikt is voor geothermie winning.
- De opslag van CO₂ leidt daarom niet tot beperking van de mogelijke ondergrondse benuttingen. Dit leidt een score van een +

Landgebruik bij injectielocatie -

- Het Barendrecht-Ziedewij veld ligt eveneens ten zuiden van Rotterdam. Het reservoir ligt deels direct onder stedelijke bebouwing van Barendrecht en deels onder landbouwgrond. In de nabije omgeving van het reservoir bevindt zich ten zuiden het dorp Heerjansdam, ten westen een deel van Barendrecht en ten noorden Rotterdam.
- Er is echter geen waterwingebied of natuurgebied. Vanwege de mogelijke hinder tijdens de injectiefase voor de bewoners in de directe omgeving, wordt een - gescoord.



Randvoorwaarden beleid, wet- en regelgeving

Beleid met betrekking tot CO₂-opslag 0

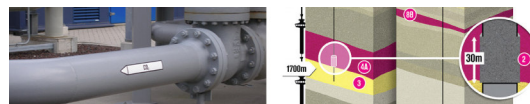
- Er is weinig concreet beleid, maar uit de beschikbare (ontwerp) documenten blijkt dat de overheid een voorstander is van klimaatmaatregelen, waaronder CO₂-opslag, mits dit veilig gebeurt.
- Deze neutrale houding geeft als score een 0.

Gebruiksplannen voor het reservoir +

- Evenals het geval is bij de locatie Barendrecht, is ook hier formeel geen beleid met betrekking tot ondergrondse benutting. Er zijn geen keuzes vastgelegd met betrekking tot het toekomstig gebruik van de reservoirs of de omgeving van de reservoirs in de diepe ondergrond. Dit betekent dat er geen hindernis is.
- Een (concrete) beleidsuitspraak in de vorm van een plan-MER of ander document waarin het reservoir bestemd is voor CO₂-opslag geeft een score van ++. In dit geval is de score een +.

2.3.5. Samenvattende tabel

Tabel 2.6 geeft een samenvattend overzicht van de geschiktheid van de Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij velden als CO₂-opslag reservoirs, op basis van toetsingscriteria. De toetsing, en in het verlengde daarvan de samenvattende tabel, is bedoeld om een snel overzicht te krijgen van de relevante aspecten. Het belang van de verschillende onderdelen kan sterk variëren.

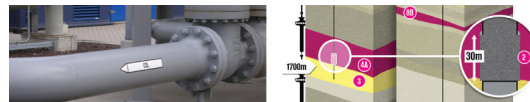


De toetsing levert de volgende resultaten op:

Tabel 2.6 Overzicht toetsing in meer detail van de geschiktheid van beide reservoirs		
	Barendrecht	Barendrecht-Ziedewij
Geschiktheid ondergrond (geologie)		
Type reservoirgesteente	+	++
Afsluitende bovenlaag	+	+
Diepte van het reservoir	+	++
Breuken en breuklijnen	+	0
Beweging ondergrond tijdens gasproductie		
Kans op aardshokken of trillingen	++	+
Bodembeweging	++	++
Toepasbaarheid reservoir		
Opslagcapaciteit	0	++
Geen instroom van water in reservoir	++	++
Aanwezigheid CO ₂ van nature in reservoir	+	+
Aanwezigheid van andere restgassen in reservoir	+	+
Gaskarakteristieken van het reservoir		
Maximale, initiële druk in reservoir	+	++
Restdruk in het reservoir	+	+
Aanwezigheid restgas in reservoir	+	+
Chemische samenstelling van het te injecteren CO ₂	++	++
Mogelijke chemische reacties	0	0
Putten		
Operationele putten	++	++
Aandachtspunten abandonnering	+	++
Afgesloten (geabandonneerde) putten	+	+
Situatie op maaiveld		
Afstand van het reservoir tot aan de bron	+	+
Hergebruiksopties bestaande transportinfrastructuur	+	+
Ondergrondse benutting biosfeer	+	+
Landgebruik bij injectielocatie	-	-
Randvoorwaarden beleid, wet- en regelgeving		
Beleid met betrekking tot CO ₂ -opslag	0	0
Gebruiksplannen voor het reservoir	+	+

Het bovenstaande overzicht leidt tot de volgende conclusies:

- Voor beide reservoirs is de geologische opbouw van de ondergrond geschikt, waarbij voor Barendrecht-Ziedewij geldt dat specifiek aandacht moet worden besteed aan de aanwezige breukzones.
- Bij beide reservoirs wordt slechts een geringe beweging van de ondergrond verwacht.



- De toepasbaarheid van beide reservoirs is goed, met de aantekening dat de opslagcapaciteit van het Barendrecht veld gering is.
- Toetsing van de gaskarakteristieken geeft aan dat dit positief wordt beoordeeld. Daarbij is aangegeven dat, met betrekking tot mogelijke chemische reacties, nader detailonderzoek nodig is. Dit heeft plaatsgevonden en wordt toegelicht in de hoofdstukken 4 en 5.
- De bestaande putten blijken zeer geschikt te zijn.
- De situatie op maaiveld (bovengronds) is gunstig met de kanttekening dat relatief veel bewoning aanwezig is nabij de locaties.
- Beleid en regelgeving staan de activiteiten niet in de weg, maar geven ook geen expliciete voorkeur voor de beide locaties.

2.4 Resultaat van de locatiekeuze

Uit de afweging van verschillende mogelijkheden, die voldoen aan de centrale criteria van veiligheid, kosteneffectiviteit en voorwaarden uit de tenderprocedure, komt slechts één kandidaat naar voren, de combinatie van de locatie Barendrecht met de locatie Barendrecht – Ziedewij.

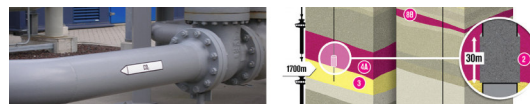
Op het criterium van veiligheid vallen een paar locaties af, waaronder de locatie De Lier, vanwege de aanwezigheid van afgesloten putten, die niet meer goed toegankelijk zijn. Andere locaties blijken nog niet beschikbaar, aangezien de gasproductie hier niet tijdig is afgerond.

Voor Noord-Nederland geldt dat hier op korte termijn een beperking aan geschikte CO₂-bronnen bestaat. Voor de offshore locaties geldt dat hier minder nieuwe inzichten verkregen kunnen worden, doordat hiervoor al een Nederlands opslagproject uitgevoerd wordt.

De beide reservoirs zijn in meer detail afgewogen op gunstige en ongunstige factoren. Daaruit blijkt dat het reservoir en de putten geschikt tot zeer geschikt zijn. Mogelijke chemische reacties dienen nader onderzocht te worden, aangezien hierover nog geen uitspraken gedaan kunnen worden. De uitgevoerde nadere onderzoeken worden gepresenteerd in de volgende hoofdstukken.

Het belangrijkste aandachtspunt blijft de aanwezigheid van bebouwing nabij de beide locaties. De centrale gedachte van het project is daarom dat de lange termijn ondergrondse opslag op een aantoonbaar veilige wijze moet plaatsvinden, onafhankelijk van de mate van bewoning nabij de winlocaties.

In dit hoofdstuk zijn de uitgangspunten voor de keuze van de beide reservoirs beschreven. De volgende hoofdstukken gaan in detail in op de toetsing van mogelijke risico's.



3. Risicomanagement methodiek

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk heeft betrekking op het in beeld brengen van risico's en onzekerheden. Voor het gehele project zijn drie typen risico's te onderscheiden: de risico's tijdens normale operationele activiteiten, de risico's bij calamiteiten aan de oppervlaktefaciliteiten en de risico's ten gevolge van de ondergrondse opslag. De eerste twee onderdelen zijn uitgewerkt in deelrapport 2 van dit MER, waarin tevens externe veiligheid en de gevolgen van mogelijke calamiteiten aan bod komen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op mogelijke risico's en onzekerheden bij ondergrondse opslag.

Nadruk op lekkagerisico's

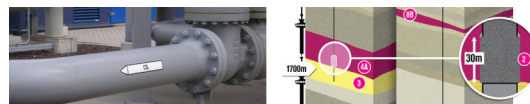
Binnen de Algemene Milieu Effecten Studie CO₂ Opslag [AMESCO, 2007] is uitgebreid aandacht besteed aan de risicobenadering. In dit MER is dit uitgewerkt voor de specifieke situatie van de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. Uit AMESCO blijkt dat het van belang is aandacht te besteden aan de mogelijke lekkage van CO₂ uit het opslagreservoir en mogelijke bodembeweging door het opnieuw vullen van een leeggeproduceerd gasreservoir. In deelrapport 2 is in het hoofdstuk bodem ingegaan op de mogelijke bodembeweging. In het voorliggende deelrapport 3 staat het risico van lekkage uit het CO₂-opslagreservoir centraal.

Terminologie: lekkage, migratie, sijpelen

De term lekkage suggereert dat CO₂ uit het reservoir in de buitenlucht terecht komt. In de praktijk zal CO₂, indien het uit het gasreservoir komt, in de bovenliggende lagen of in de put terecht komen. Ter onderscheid worden ook de termen migratie of sijpelen van CO₂ wel gebruikt. Binnen dit MER wordt de term lekkage van CO₂ aangehouden, waarmee ieder transport van CO₂ uit het gasreservoir wordt bedoeld. *Lekkage betekent daarmee dus zeker nog niet dat CO₂ aan de oppervlakte of in de buitenlucht terecht komt.* Het CO₂ kan oplossen in de bovenliggende lagen of onder andere gasdichte lagen ingevangen worden. Migratie beschrijft het transport van CO₂ *buiten* het reservoir. Sijpelen wordt aangehouden voor extreem langzame processen in deklagen ten gevolge van b.v. dichtheidsverschillen (buoyancy) of lokale (tijdelijke) overdrukken, die hoger zijn dan de capillaire inpersdruk.

Terminologie Risico

De term risico kan verschillende betekenissen hebben. In het kader van risicomanagement is het van belang vooraf scherp te bepalen wat wordt verstaan onder de hier gehanteerde term risico. Hiervoor worden de onderstaande typeringen gebruikt. Aangezien veel literatuur in het engels is opgesteld, zijn de bijbehorende engelse termen eveneens aangegeven:

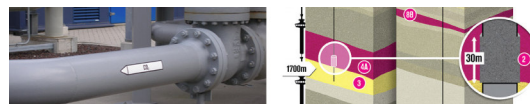


Risico(risk)	Het risico wordt kwantitatief bepaald (berekend) door de kans van een gebeurtenis te vermenigvuldigen met de consequentie. Bij de berekeningen voor externe veiligheid wordt met behulp van modellen het risico gekwantificeerd
Ongewenste gebeurtenis (top event)	Een gebeurtenis die plaatsvindt wanneer het gevaar escaleert. Het lekken van CO ₂ uit de ondergrond kan gezien worden als een voorbeeld van een ongewenste gebeurtenis. Een ongewenste gebeurtenis kan door middel van een gedefinieerd risicoscenario nader worden onderzocht.
Gevaar (hazard)	Is een gebeurtenis of toestand die tot schade kan leiden. Propan onder hoge druk in een gastank kan als gevaar worden gezien.
Bedreiging (threat)	Wordt gebruikt voor oorzaken die kunnen leiden tot een ongewenste gebeurtenis. Chemische verandering van het gesteente kan als bedreiging voor lekkage worden gezien.
Barrière (Barrier)	Beheersmaatregel om te voorkomen dat een bedreiging leidt tot een ongewenste gebeurtenis, of om de consequentie van een ongewenste gebeurtenis te beperken. Een monitoringsmaatregel kan ook als een barrière fungeren.
Gevolg of consequentie (consequence)	Een ongewenste gebeurtenis kan leiden tot bijvoorbeeld een negatieve invloed op de gezondheid van mens of dier, of schade aan bebouwing. De woorden gevolg of consequentie zijn uitwisselbaar in dit rapport.
Risicoscenario (Risk scenario)	Een gekoppelde combinatie van bedreiging, ongewenste gebeurtenis en consequentie. Een risicoscenario heeft bij voorkeur een bijbehorende risico kwantificering.

Kwantificering van risico's

Risico's en onzekerheden worden veelal gekwantificeerd met behulp van een QRA, een kwantitatieve risico analyse. De QRA geeft aan waar bij mogelijke risicoscenario's een levensbedreigende (letale) situatie kan ontstaan. Dit gebeurt bij de aanleg van fabrieken of infrastructuur. Hiervoor moet het duidelijk zijn, welke kans op een gebeurtenis bestaat en welke gevolgen een gebeurtenis kunnen hebben. Kans en gevolg bepalen samen het risico (zie hierboven onder Terminologie Risico). De QRA kan worden berekend aan de hand van vastgestelde voorschriften, gebaseerd op beschikbare statistieken.

Voor ondergrondse opslag van CO₂ zijn nog weinig statistieken beschikbaar. Er zijn ook nog geen vastgestelde voorschriften. Dit betekent dat voorafgaand aan een QRA eerst de mogelijke risico's moeten worden vastgesteld. Op basis van analogieën en expertopinie is het mogelijk kansen kwantitatief te schatten. Ook de gevolgen van lekkagescenario's (de hoeveelheid CO₂ die lekt of migreert en de impact daarvan) zijn kwantitatief te bepalen. Echter, in vele gevallen is deze kwantificering niet noodzakelijk, omdat met een kwalitatieve analyse al aangetoond kan worden dat

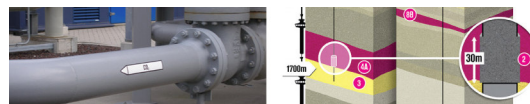


de risico's verwaarloosbaar zijn. Dat is dan ook de gevolgde aanpak: eerst een kwalitatieve analyse (vaak wel gebaseerd op ook kwantitatieve berekeningen en analyses) van de belangrijkste lekkagerisico's en alleen verdere kwantificering als de ingeschatte risico's niet aantoonbaar verwaarloosbaar zijn. Indien kwantificering aangeeft dat mogelijk letale concentraties kunnen ontstaan, zal een QRA bepaald worden. Als uitgangspunt is echter aangehouden dat de veiligheid van de ondergrondse opslag dermate groot is, dat aanpassingen worden uitgevoerd totdat na kwantificering geen letale concentraties kunnen ontstaan. Als gevolg hiervan is in dit MER het bepalen van een QRA niet aan de orde.

Risicobenadering

Uit praktijkervaring en jarenlange studie is al veel bekend over mogelijke risico's van stoffen in de ondergrond. Daardoor kunnen er met voldoende zekerheid uitspraken worden gedaan over de waarschijnlijkheid dat situaties voorkomen en de mogelijke gevolgen. In dit MER wordt een methodiek toegepast, waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van bestaande ervaringen en kennis. Deze bestaat uit twee niveaus (volgend op de locatiekeuze uit hoofdstuk 2):

- Er vindt een conservatieve kwalitatieve risico-inschatting (met name de kans als onderdeel van het risico) plaats van alle mogelijk relevante bedreigingen voor lekkage uit het CO₂-opslagreservoir (ongewenste gebeurtenis). Dat wil zeggen dat vanuit een slechtste situatiebenadering (worst case) bepaald wordt, waar zich bedreigingen kunnen voordoen en hoe groot het bijbehorende risico (kans) is. De nadruk in deze stap ligt op de bedreigingen, daar het voorkomen van de ongewenste gebeurtenis wordt gezien als het belangrijkste element in het vermijden van een risico.
- Voor de relevante bedreigingen die vanuit voorgaande stap niet aantoonbaar verwaarloosbaar zijn, wordt een haalbaarheidsstudie uitgevoerd. Hierbij worden de bedreigingen verder uitgewerkt in concrete risicoscenario's en indien nodig ook de consequenties. Vervolgens wordt het risicoscenario in detail geanalyseerd, om een goed beeld te krijgen van de bestaande barrières, de initiële integriteit van het opslagsysteem en de afstand tot kritische grenzen ('veiligheidsfactor'). Er wordt in meer detail bekeken en berekend wat de mogelijke kans en consequentie/impact van een lekkage zou kunnen zijn. Daarbij worden mogelijke kansen en gevolgen zoveel mogelijk gekwantificeerd. Dit biedt de mogelijkheid aanvullende maatregelen te treffen, waarmee de bedreiging kan worden verlaagd. Het vermijden van migratie en lekkage van CO₂ is het hoofddoel van technisch studiewerk dat is verricht binnen dit project. Daarbij komt automatisch de focus te liggen op de bedreigingen die kunnen leiden tot lekkage van CO₂ uit het reservoir en migratie.



Kwalitatieve risico inschatting

(hoofdstuk 4)

- Tien-stappenplan: stap 2



Detailanalyse risicoscenario's

(meer detail hoofdstuk 5 en 10. Tien-stappenplan: stap 3,4 en 5)

- Risicoscenario definitie en detailanalyse (Bedreigingen en mogelijke gevolgen)
- Analyse van bestaande barrières.
- Kwantitatief onderzoek (kans en gevolg)
- Aanvullende barrières/ mitigerende maatregelen

Schema van de risicobenadering voor de toetsing van de geschiktheid van de geselecteerde reservoirs

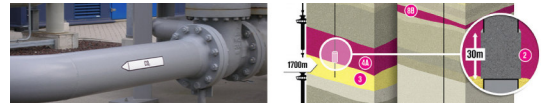
Structuur Risicomanagement

In hoofdstuk 3 is de methodiek beschreven, waarbij een tien-stappenplan centraal staat. Hoofdstuk 4 gaat in op de bevindingen van de verschillende stappen uit het stappenplan. Hoofdstuk 5 beschrijft de verdiepingsslag die gedaan is voor de belangrijkste lekkagescenario's (zoals ook gedefinieerd in de startnotitie).

3.2 Stappenplan risicomanagement

Binnen de olie- en gasindustrie is in de loop van de jaren samen met onderzoeksinstituten een werkwijze ontwikkeld voor het in beeld brengen en minimaliseren van mogelijke risico's. Deze werkwijze is vastgelegd in de risicomanagement methodiek [Detailonderzoek ondergrond, referentie 1], welke hier is aangepast voor CO₂-opslag in de ondergrond. Centraal in de risicomanagement methodiek staat een tien-stappenplan.

- Stap 1 Locatiekeuze door evaluatie van de kandidaat-opslagreservoirs.
- Stap 2 Inventarisatie van mogelijke bedreigingen als onderdeel van de lekkage (risico) scenario's.
- Stap 3 Haalbaarheidstudie en beoordeling van bedreigingen en gevolgen.
- Stap 4 Semi kwantitatieve rangschikking van de risicoscenario's voor lekkage (bedreigingen en gevolgen).
- Stap 5 Identificatie van (aanvullende) risicomitigerende maatregelen.
- Stap 6 Definitie van acceptatiecriteria en toetsing van de resterende risico's aan deze criteria.
- Stap 7 Overzicht van het uiteindelijke risicobeheersplan als onderdeel van het project; ontwerp, operationeel, afsluiting, monitoring, reactieplan.
- Stap 8 Toetsing of audit van risicomanagement.
- Stap 9 Toetsing en aanpassing van het scenario overzicht op vooraf bepaalde kernpunten en zodra nieuwe monitoringsgegevens beschikbaar komen.
- Stap 10 Communicatie over risico's met de belanghebbenden en het publiek.



Stappenplan Risico Analyse en Beheersing voor geleidelijke ontsnapping uit het opslagreservoir

Onderstaand zijn de tien stappen kort toegelicht.

Stap 1: Locatiekeuze door evaluatie van de kandidaat opslagreservoirs

De eerste stap is het evalueren op hoog niveau van de potentiële opslagreservoirs. Daarbij worden mogelijke opslagreservoirs vergeleken op basis van veiligheid, maar ook op commerciële en juridische aspecten. Reeds in deze fase kunnen potentiële opslagreservoirs afvallen omdat risico's niet (tegen acceptabele kosten) verder kunnen worden gereduceerd.

Stap 2: Inventarisatie van mogelijke bedreigingen als onderdeel van de lekkagescenario's

De tweede stap bestaat uit het vaststellen van de mogelijke bedreigingen. De nadruk ligt daarbij op mogelijke lekkage van CO₂. Bij deze stap is gebruik gemaakt van beschikbare (internationale) expertise om alle mogelijke bedreigingen te kunnen benoemen. Er zijn twee methodes van belang: FEP en Bow-tie. Onderstaand wordt dit proces nader toegelicht.

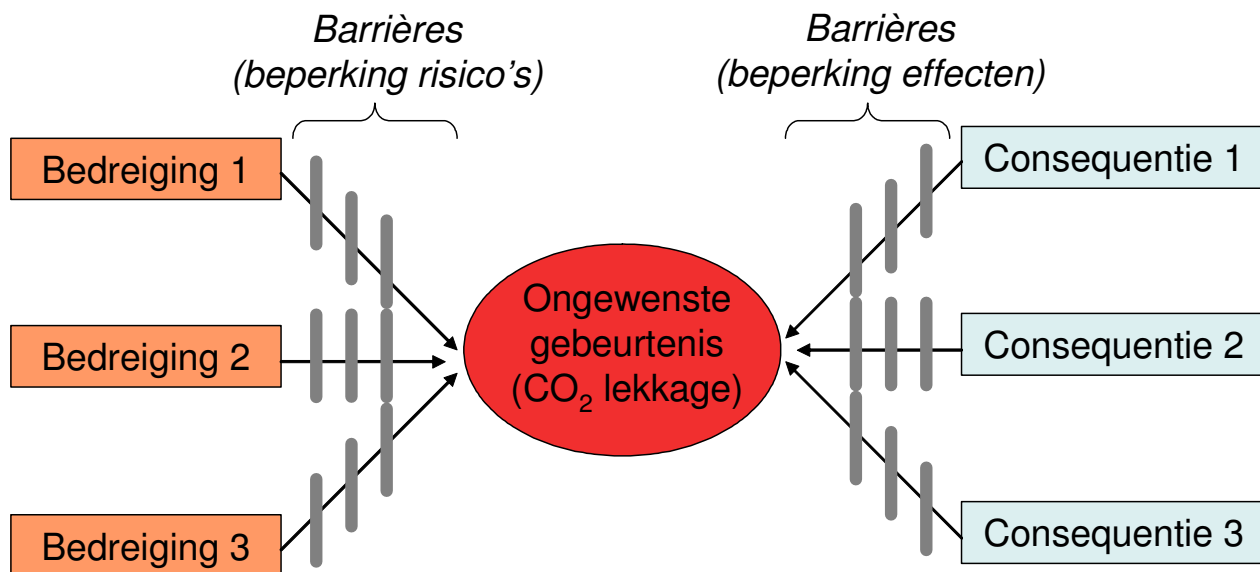
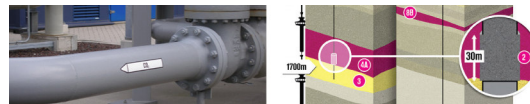
Inventarisatie van bedreigingen

Experts op de verschillende kennisgebieden van CO₂-opslag zijn bijeengekomen voor een 'brainstorm' sessie. Tijdens de sessie is een breed scala van bedreigingen geïnventariseerd. Vervolgens heeft een eerste schifting plaatsgevonden, waarbij alleen de mogelijk relevante bedreigingen zijn overgebleven. Dit vormt het startpunt voor verder onderzoek.

De experts hebben tijdens deze sessie gebruik gemaakt van de zogenaamde FEP database (Features, Events en Processes), die door TNO ter beschikking is gesteld. De FEP database is een database van bedreigingen, die kunnen leiden tot lekkage van CO₂ uit het reservoir. De database is tot stand gekomen op basis van expertdiscussies in verschillende CO₂-opslag projecten. FEP's of bedreigingen kunnen oorzaak-gevolg ketens vormen. Een bow-tie diagram is vervolgens uitermate geschikt om deze ketens in beeld te brengen.

Bow-tie: Kwalitatieve technische Risico beoordeling

De bow-tie bestaat uit een aantal mogelijke bedreigingen die kunnen leiden tot een ongewenste gebeurtenis, met daaraan gekoppeld consequenties. Voor dit project toont het bow-tie diagram aan de linkerkant de bedreigingen die lekkage kunnen veroorzaken. Aan de rechterkant worden de mogelijke gevolgen van ontsnapping van CO₂ uit het reservoir getoond. Tussen de bedreigingen en de ongewenste situaties kunnen vervolgens barrières worden ingebouwd (dit voorkomt dat een ongewenste gebeurtenis optreedt). Tussen de ongewenste gebeurtenis (top event) en het gevolg kunnen eveneens barrières worden ingezet. Dit zorgt ervoor dat de gevolgen beperkt zijn, indien een ongewenste gebeurtenis toch optreedt (figuur 3.1).



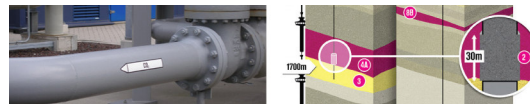
Figuur 3.1 Schematische weergave van de bow-tie methodiek.

De bow-tie methodiek wordt toegepast bij de beoordeling van externe veiligheidsaspecten en is in het verlengde hiervan toegepast voor gebeurtenissen in de ondergrond.

Toepassen bow-tie

Bij het opstellen van de bow-tie staat centraal als ongewenste gebeurtenis de lekkage van CO₂ uit het opslagreservoir. Dit wordt gezien als belangrijkste technische risico bij de ondergrondse opslag van CO₂. Er is een bow-tie structuur opgesteld voor zowel de injectiefase, als de fase na afsluiting.

Oorzaak-gevolg ketens uit de bow-tie kunnen worden omgezet in risicoscenario's.



Voorbeeld toepassing bow-tie methodiek

Externe veiligheid pijpleiding nabij maaiveld: Als een **ongewenste gebeurtenis** kan gezien worden het lekken van CO₂ uit een pijpleiding. Het **gevaar** hierbij komt voort uit het feit dat CO₂ onder druk in een leiding voorkomt. Een **bedreiging** bestaat uit de mogelijke interne corrosie in de leiding of een externe beschadiging van de leiding. Een **barrière of mitigerende maatregel** tegen de bedreiging van interne corrosie is ervoor te zorgen dat het CO₂ droog is, zodat er geen water aanwezig is wat kan leiden tot interne corrosie. Als barrière tegen externe beschadiging kan de leiding worden gelegd in een leidingenstraat of voorzien worden van een graaflint. Aan de andere kant van de bow-tie worden **consequenties** in beeld gebracht. Indien CO₂ lekt uit een leiding, leidt dit tot CO₂-emissies. Als **mitigerende maatregelen** kan lekdetectie worden toegepast zodat een lekkage snel wordt ontdekt en de hoeveelheid lekkage gering is. Een andere mitigerende maatregel is het insluiten van de leiding, zodat toevoer van CO₂ wordt gestopt.

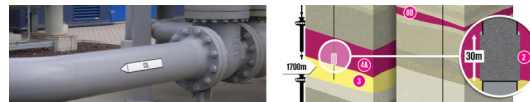
Beoordeling ondergrondse lekkage van CO₂: Als **ongewenste gebeurtenis** wordt gezien het lekken van CO₂ uit een opslagreservoir. Het **gevaar** hierbij is gelegen in het feit dat het CO₂ onder druk in het reservoir voorkomt. Een mogelijke **bedreiging** waardoor de ongewenste gebeurtenis kan optreden, is een te hoge druk van CO₂ wat kan leiden tot een scheur in de afdeklag van het opslagreservoir. In dit geval bestaan de **barrières of mitigerende maatregelen** uit het controleren van de gemeten CO₂ injectiedruk en injectiedebiet, het uitvoeren van injectietesten om vast te stellen dat te hoge druk wordt voorkomen en toetsing van de toplaag op lekvrijheid bij CO₂. Als **mitigerende maatregelen** tegen de **consequenties** van lekkage wordt een massabalans bijgehouden, waardoor het verblijf van het CO₂ in het reservoir getoetst wordt, of het uitvoeren van seismische metingen om vast te stellen of in de omringende waterlagen een toename van CO₂ is geconstateerd. Het te vermijden **gevolg / consequentie** is dat CO₂ uit het reservoir uiteindelijk terecht komt in de bovenliggende lagen. Het **risicoscenario** in dit voorbeeld is de combinatie van de bedreiging, de ongewenste gebeurtenis en de consequentie(s).

Stap 3: Haalbaarheidstudie en beoordeling van bedreigingen.

Stap 2 levert als resultaat een aantal bedreigingen en risicoscenario's voor lekkage op. In stap 3 worden nadere detailonderzoeken uitgevoerd. In deze onderzoeken worden alle mogelijk relevante bedreigingen en lekkagescenario's uit stap 2 bestudeerd, zodat er met zekerheid kan worden gesteld dat er geen scenario's zijn die mogelijk kunnen leiden tot het stopzetten van het project.

Stap 4: Semi kwantitatieve rangschikking van de bedreigingen en lekkagescenario's.

De studies uit stap 3 resulteren in een meer gedetailleerde beschrijving van de meest relevante en waarschijnlijke scenario's voor CO₂-lekkage. Dit leidt tot een bijgestelde bow-tie. Met behulp van een risicomatrix kunnen de risico's van de lekkagescenario's uit de bow-tie in beeld worden gebracht. De scenario's worden gecategoriseerd in laag-, midden- en hoog-risicoscenario's, op basis van de beoordeling van experts (dit wordt nader toegelicht in paragraaf 3.3). Voor elk scenario wordt een inschatting gemaakt van de waarschijnlijkheid dat het scenario optreedt en hoe serieus de mogelijke consequenties zijn. Alle aannames met betrekking tot reeds aanwezige barrières in het originele project zijn benoemd en gedocumenteerd. Deze barrières worden als onderdeel van de scenario's in stap 4 opgenomen.



Stap 5: Identificatie van (aanvullende) risico mitigerende maatregelen.

Voor de scenario's die zijn geclassificeerd als midden- of hoog-risico in stap 4 worden aanvullende maatregelen geïdentificeerd om het risico te reduceren. Dit kan bijvoorbeeld inhouden dat veranderingen in het ontwerp, operationele filosofie, afsluitingsmethode of monitoringsplan worden geïntroduceerd. Deze mitigerende maatregelen worden als nieuwe barrières in het bow-tie diagram opgenomen.

Stap 6: Definitie van acceptatiecriteria en toetsing van de resterende risico's aan deze criteria.

Acceptatiecriteria zijn in veel gevallen gedefinieerd door de overheid. Echter op het moment van het uitbrengen van dit MER zijn deze criteria niet bekend. De risicomatrix laat zien wat de kansen op en gevolgen van bepaalde lekkagescenario's kan zijn, voor en na de inzet van barrières. De criteria voor de schaalindeling van de 'kans' en 'consequentie' assen zijn intern bepaald. Binnen dit project en deze methodiek is gesteld dat hoog-risico scenario's in de risicomatrix niet acceptabel zijn. Midden-risico scenario's zijn zeer onwenselijk voor een eerste onshore demonstratieproject. Afhankelijk van de risico-kwalificatie moeten er voldoende monitorings- en herstelmaatregelen beschikbaar zijn.

Stap 7: Overzicht van het uiteindelijke risicobeheersplan als onderdeel van het project; ontwerp, operationeel, afsluiting, monitoring, reactieplan.

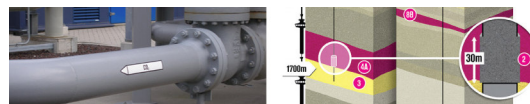
Voor de geïdentificeerde mitigerende maatregelen moet zeker gesteld worden dat deze daadwerkelijk geïmplementeerd worden in het ontwerp, de operaties en verdere projectuitvoering.

Stap 8: Toets van risicomanagementplan.

Projecten en activiteiten worden met zekere regelmaat getoetst (audits, reviews); in deze audits zal ook gekeken moeten worden of de uitvoerder zich houdt aan het risicomanagementplan en of alle afgesproken beheersmaatregelen geïmplementeerd zijn.

Stap 9: Toetsing en aanpassing van het scenario overzicht op vooraf bepaalde kernpunten en zodra nieuwe monitoringsgegevens beschikbaar komen.

Een belangrijk element in de risicomanagement aanpak is de uitgebreide monitoring (zie hoofdstuk 7), de evaluatie van de resultaten en het aanpassen van de modellen, monitoringsfrequenties, operationele limieten, etc, indien dit nodig is als gevolg van de monitoringsresultaten.



Stap 10: Communicatie over risico's met de belanghebbenden en het publiek.

Hiervoor genoemd stappenplan wordt iteratief toegepast. Hierdoor worden verbeteringen tijdig doorgevoerd. Uiteindelijk zullen, zeker voor demonstratieprojecten op land, de resultaten in begrijpelijke vorm met een breder publiek gedeeld worden.

3.3 Classificaties risicoscenario's en acceptatiecriteria

Voor de ondergrondse risico's van lekkage van CO₂ uit het ondergrondse opslagreservoir, zijn hieronder de generieke classificaties weergegeven.

Risico-matrix

De risicomatrix vormt een overzichtelijke structuur om een risico inschatting te visualiseren (figuur 3.2). In de matrix worden zowel de waarschijnlijkheid (horizontale as) als de mogelijke gevolgen (vertikale as) weergegeven, in vier klassen, variërend van verwaarloosbaar, via laag, naar medium en hoog. De combinatie van een hoge waarschijnlijkheid en grote gevolgen wordt als meest negatief rood gemaakt, terwijl een verwaarloosbare kans van optreden met verwaarloosbare gevolgen het streven is binnen het project. Indien activiteiten en gebeurtenissen in de blauwe vlakken vallen, wordt voldaan aan de risiconormen.

Risk Matrix CO₂ opslag

- CL Cap rock lekkage
- BL Breuk lekkage
- CS Cap rock sijpelen
- OL Overstromings punt lekkage
- Rest risico na mitigatie

Mogelijke consequenties

CO₂ komt aan oppervlakte of CO₂ accumuleert in ondiepe (<200 m) lagen met hoge concentraties met gevolgen voor kritische objecten

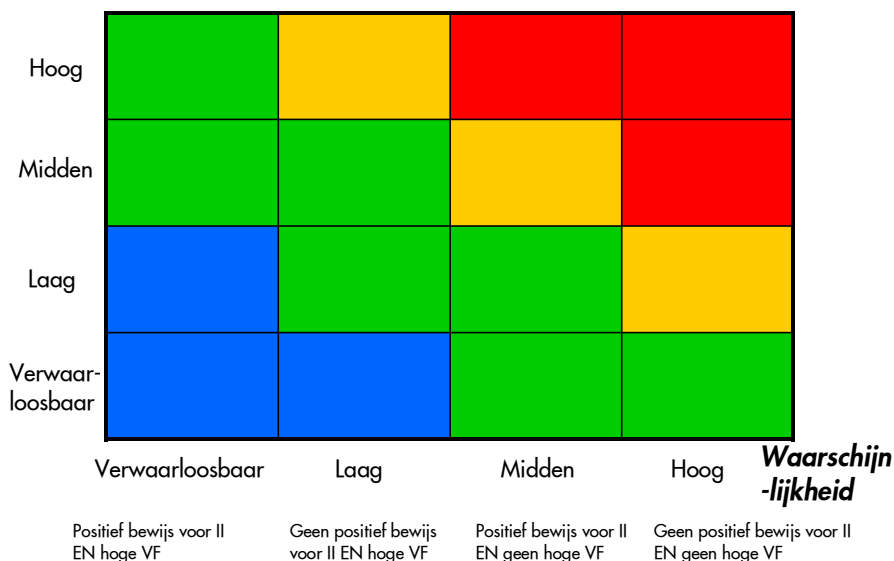
CO₂ komt aan opp. of CO₂ accumuleert in ondiepe (<200 m) lagen met:

- hoge concentraties zonder gevolgen voor kritische objecten
- lage concentraties met gevolgen voor kritische objecten

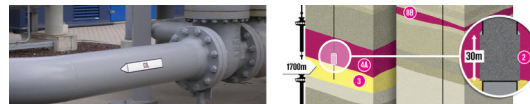
CO₂ migreert door het afsluitend gesteente met relatief hoge snelheid maar wordt gevangen in een diepe laag (>200 m) of migratie van CO₂ naar ondiepe lagen en/of biosfeer met lage concentratie en niet bij kritische/gevoelige objecten.

CO₂ migreert door het afsluitend gesteente met relatief lage snelheid maar wordt gevangen in een diepe laag (>200 m)

Informatie over initiële integriteit (II) veiligheidsfactoren, VF (uit studies)



Figuur 3.2 Risicomatrix CO₂-opslag.



De waarschijnlijkheid en de consequenties weergegeven in de matrix zijn in principe te vergelijken met respectievelijk de linker –en rechterkant van de bow-tie (zie stap 2). De matrix wordt bij stap 4 en 5 uit het stappenplan gebruikt.

Mogelijke gevolgen

De mogelijke gevolgen worden getoetst afhankelijk van de mate waarin CO₂ uit het reservoir ontsnapt. Indien een zeer beperkte flux diep in de ondergrond blijft, is er weinig aan de hand, maar zodra een grotere hoeveelheid het maaiveld bereikt en gevoelige objecten bedreigt, worden de mogelijke gevolgen als groot gezien. Dit heeft geleid tot onderstaande indeling:

- verwaarloosbaar-risico: CO₂ lekt uit het reservoir, met een zeer lage flux en concentratie, maar zal worden afgevangen op grotere diepten (meer dan 200 m onder maaiveld).
- laag-risico: CO₂ lekt uit het reservoir, met een hogere flux, maar zal worden afgevangen op grotere diepten (meer dan 200 m onder maaiveld). Lekkage naar ondiepe lagen en/of biosfeer met lage flux en niet bij kritische/gevoelige objecten. (bijvoorbeeld: zeer lage flux langs putwand).
- midden-risico: CO₂ komt aan het maaiveld en in de atmosfeer, of er vindt accumulatie plaats in ondiepe structuren (minder dan 200 m diepte) met:
 - hoge concentraties maar geen kritische objecten of,
 - lage concentraties maar wel kritische objecten.
- hoog-risico: CO₂ komt aan het maaiveld en in de atmosfeer, of er vindt accumulatie plaats met hoge concentraties in ondiepe structuren (minder dan 200 m diepte) en kritische objecten worden bedreigd.

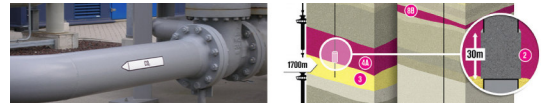
Waarschijnlijkheid

De waarschijnlijkheid of kans dat een gebeurtenis plaatsvindt, is afhankelijk van wat de initiële integriteit van het reservoir wordt genoemd, en de zogenaamde veiligheidsfactoren. De initiële integriteit betekent de beginsituatie zoals deze van nature voorkomt. Onder veiligheidsfactoren wordt verstaan de aangebrachte verandering ten gevolge van het project. Hoofdstuk 5 gaat dieper in op de begrippen initiële integriteit en veiligheidsfactoren. Dit leidt tot de onderstaande indeling:

- verwaarloosbaar-risico: aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit en hoge veiligheidsfactoren;
- laag-risico: geen aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit, maar wel hoge veiligheidsfactoren;
- midden-risico: aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit, maar geen hoge veiligheidsfactoren;
- hoog-risico: geen aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit en geen hoge veiligheidsfactoren.

Verwaarloosbaar-risico scenario's

Dit zijn scenario's die in het blauwe gedeelte van de risicomatrix vallen. Deze scenario's zijn gedocumenteerd, maar er zijn geen specifieke beheersmaatregelen van toepassing. Soms wordt een risico als verwaarloosbaar geïdentificeerd, omdat het niet van toepassing is op CO₂-opslag in Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij specifiek (maar wel in een ander reservoir of in geval van opslag in een waterlaag).



Laag-risico scenario's

Deze scenario's hebben in zijn totaliteit een laag risico. De risico's kunnen worden geaccepteerd, wanneer de migratie van CO₂ uit het opslagreservoir op tijd kan worden gedetecteerd en/of monitoring nabij gevoelige objecten kan worden uitgevoerd, zodat tijdig maatregelen kunnen worden genomen.

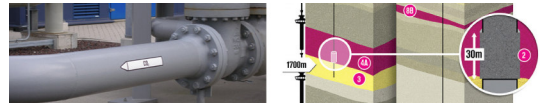
Midden-risico scenario's

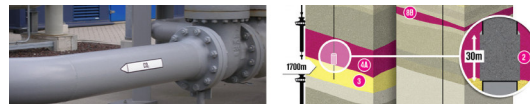
Deze scenario's hebben in zijn totaliteit een midden risico. Er zal monitoring dienen plaats te vinden op aanwezigheid van mogelijke oorzaken die kunnen leiden tot migratie van CO₂ uit het reservoir en om zeker te stellen dat de barrières, die voorkomen dat migratie optreedt, in tact zijn. Monitoring van het migratiepad (in de bovenliggende lagen) moet mogelijk zijn als daar aanleiding voor is. Tevens is monitoring nabij gevoelige objecten noodzakelijk.

Hoog-risico scenario's

Deze categorie wordt niet geaccepteerd binnen het project. Indien hoog-risico scenario's zijn geïdentificeerd, zal er door middel van studiewerk worden bekeken of het risico inderdaad hoog is of dat meer detailinformatie er toe leidt dat de classificatie kan worden verlaagd. Indien het risico hoog blijft, zullen er beheersmaatregelen worden toegepast om het risico tot 'midden' en bij voorkeur 'laag' te reduceren.

Voor onshore projecten wordt als uitgangspunt gehanteerd: geen middel of hoog risico scenario's.





4. Risico Analyse

4.1 Inleiding

De risicomanagement methodiek is beschreven in hoofdstuk 3. De bevindingen voor de locatie Barendrecht en voor de locatie Barendrecht-Ziedewij komen in dit hoofdstuk aan bod. Eerst wordt kort ingegaan op ervaringen uit andere projecten, ter indicatie van bekende en onbekende risico's.

Daarna wordt de ondergrondse CO₂-opslag van de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij getoetst met behulp van het tien-stappenplan als onderdeel van de risicomanagement methodiek zoals beschreven in hoofdstuk 3. Deze toetsing spitst zich toe op het risico van lekkage uit het CO₂-opslagreservoir. De belangrijkste bevindingen naar aanleiding van deze toepassing van het tien-stappenplan worden beschreven en samengevat.

In het hierop volgende hoofdstuk 5 komt een nadere kwantificering en detaillering aan bod in de vorm van de belangrijkste scenario's (detaillering van uitwerking van stap 3, 4 en 5 van het stappenplan).

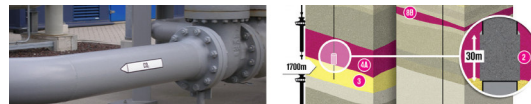
4.2 Ervaringen projecten en onderzoeken

Voor het in beeld brengen van onzekerheden en risico's wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de ervaringen uit relevante andere projecten. Bij de vergelijking is het van belang duidelijk te hebben in welke mate ervaringen wel of niet bruikbaar zijn, of slechts met mate bruikbaar zijn. Het zijn allemaal praktische situaties, geen nabootsing op laboratoriumschaal en met een min of meer vergelijkbare omvang en schaalgrootte (vaak zelfs veel groter) dan dit project. Appendix 1 geeft een vrij compleet overzicht van gebeurtenissen en van andere opslagprojecten.

CO₂-incidenten

Een aantal CO₂-incidenten heeft het nieuws gehaald. Dit roept de associatie op dat CO₂ zeer gevaarlijk kan zijn. Onder bepaalde omstandigheden kan dat inderdaad het geval zijn. Het blijkt dat een grote CO₂-wolk buitengewoon gevaarlijk is en dat zeker moet worden voorkomen dat dit optreedt. Daarbij moet bedacht worden dat CO₂ geclassificeerd wordt als een niet-gevaarlijke stof, maar dat deze zoals iedere andere stof onder bepaalde omstandigheden en concentraties wel degelijk gevaar voor de gezondheid kan opleveren.

De bekendste voorbeelden van CO₂-incidenten zijn Lake Nyos in Kameroen en Mammoth Mountain. Het betreft steeds vulkanische ondergrond of seismisch gevoelige gebieden, waar CO₂ kan ontsnappen langs breukzones (zie beschrijving in appendix 1). De Nederlandse bodem is niet vulkanisch en zeer beperkt seismisch actief. Bij de selectie van geschikte reservoirs is er specifiek aandacht voor mogelijk actieve breukzones of breukzones die door de CO₂-opslag weer actief kunnen worden.



CO₂-Enhanced Oil Recovery (EOR)

Er zijn al vele olievelden waar CO₂ geïnjecteerd wordt om de olieproductie te verhogen. Vaak wordt de CO₂-injectie afgewisseld met waterinjectie. Hierdoor is het risico van lekkage door corrosie en cementproblemen veel groter dan voor een leeg, droog gasveld. Er bestaan ook al duizenden kilometers hoge druk (tussen 150 en 200 bar) pijpleiding om CO₂ naar de olievelden te brengen. Alhoewel het doel van EOR verschilt van de onderhavige emissiereductie, is de te gebruiken techniek hetzelfde.

Als voorbeeld kan hier genoemd worden de plaats Denver City, Texas in de Verenigde Staten, waar in een plaats met circa 4.000 inwoners een groot aantal CO₂-injectielocaties al jarenlang operationeel is. Onderstaande foto geeft een indruk van de ligging van de injectielocaties en de woningen.

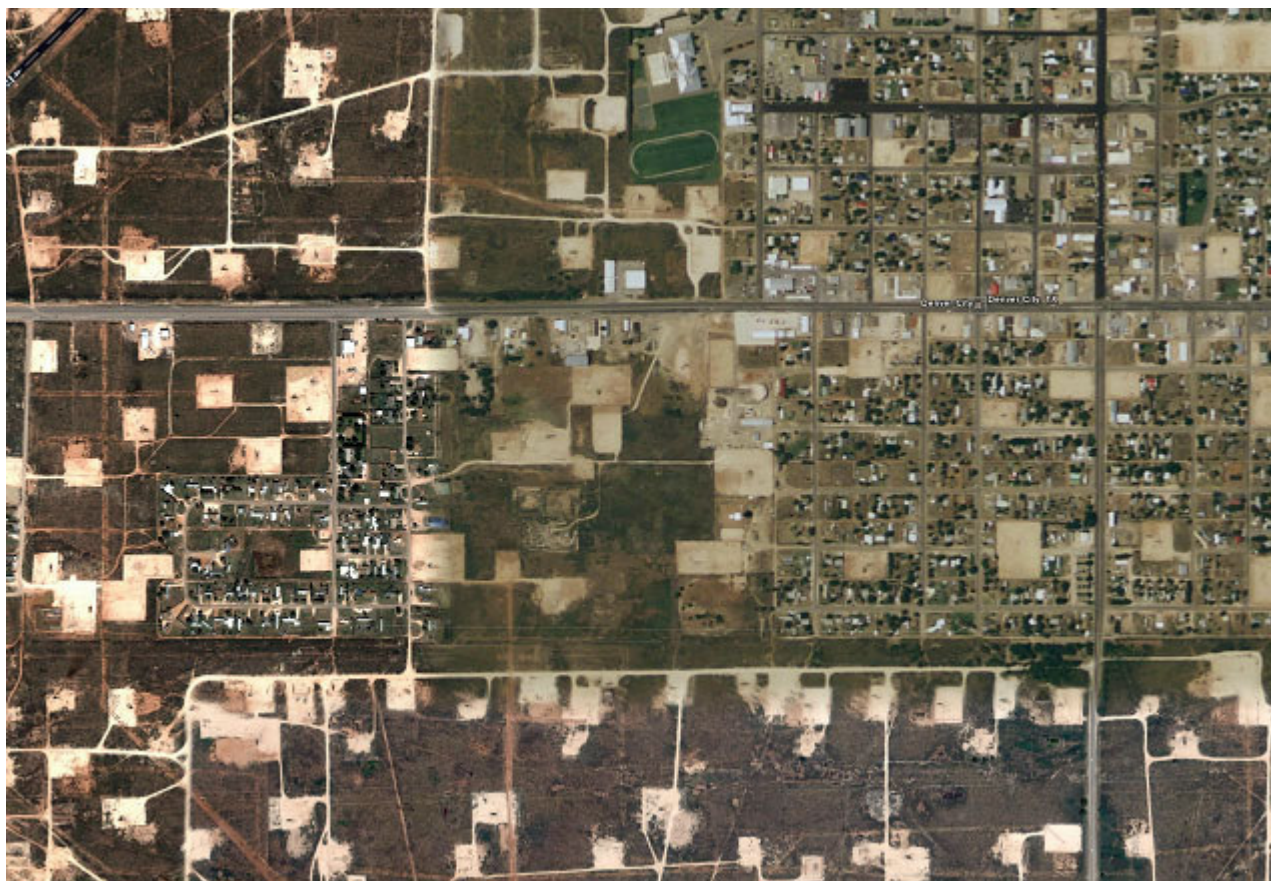
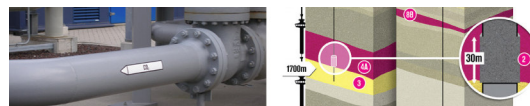


Foto: Denver City, Texas, met daarin de huizen, en injectielocaties zichtbaar.

CO₂-opslag in het buitenland

Een aantal CO₂-opslagprojecten is in het buitenland inmiddels van start gegaan. Een voorbeeld is het Noorse Sleipner project, waarbij al circa 12 jaar CO₂ in een aquifer (waterlaag) wordt geïnjecteerd. De meeste projecten zijn hooguit enkele jaren operationeel, of nog in een beginfase, zodat langjarige monitoring nog niet heeft kunnen plaatsvinden.



Bij een deel van de projecten wordt CO₂ opgeslagen in reservoirs onder de zee (offshore). Hierbij is de aanwezigheid van CO₂ in reservoirs zichtbaar te maken met behulp van seismische metingen. Mogelijke interactie met de oppervlakte speelt hier in een heel andere vorm dan bij opslag op land. Het gebruik van aquifers voor opslag van CO₂ is structureel anders (door een overdruk situatie) dan het gebruik van leeggeproduceerde gasreservoirs (met een onderdruk situatie).

Er zijn echter ook projecten met CO₂-opslag op land. Deze geven interessante ervaringen. Een samenvatting van enige van deze projecten staat in Appendix 1.

Gasinjectie

Ervaringen met het in de Nederlandse bodem brengen van aardgas is beschikbaar via de gasopslagprojecten in onder meer Norg en Grijskerk. Hier wordt door de NAM aardgas tijdelijk opgeslagen om piekleveringen te kunnen verzorgen. Deze activiteit lijkt sterk op CO₂-opslag, maar er zijn twee belangrijke verschillen. Ten eerste wijkt het CO₂ af van aardgas en kan tot (andere) reacties leiden in de ondergrond. Ten tweede wordt het aardgas tijdelijk opgeslagen met het doel dit weer uit de ondergrond te halen, terwijl het CO₂ permanent wordt opgeslagen.

Waterinjectie

In het geval van waterinjectie geldt dat productiewater in de leeggeproduceerde gasreservoirs permanent wordt opgeslagen. Dit is vergelijkbaar met de CO₂-opslag, maar met een productiewater in plaats van CO₂. Het injecteren van productiewater vindt al lange tijd plaats, zodat hier veel ervaring mee is.

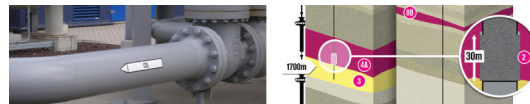
Natuurlijke CO₂ reservoirs

CO₂ blijkt ook al van nature in ondergrondse reservoirs voor te komen. Het is de huidige praktijk dat indien bij een exploratieboring blijkt dat in een reservoir geen aardgas voorkomt, maar CO₂, wordt deze put afgesloten. Deze situatie komt overeen met de opslag van CO₂, met als verschil dat het CO₂ in dergelijke gevallen al van nature voor komt in het reservoir, waardoor geen nieuwe chemische reacties worden verwacht. Dit zou bij het inbrengen van CO₂ in een omgeving waar van nature geen CO₂ aanwezig is geweest, wel het geval kunnen zijn. In West Nederland bevinden zich ook dit soort natuurlijke CO₂-reservoirs (op enkele kilometers diepte).

Er zijn natuurlijke CO₂ bronnen die niet afgesloten zijn en zodoende lekken naar de oppervlakte. Dit komt onder meer voor in het Matra gebergte in Hongarije en op meerdere plaatsen in Italië. De hoeveelheden CO₂ zijn in de meeste gevallen dermate laag dat dit voor de omgeving geen gevaar oplevert.

4.3 Toetsing met behulp van het stappenplan

In deze paragraaf wordt het stappenplan risicomangement, zoals beschreven in hoofdstuk 3 toegepast op de lokaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. Deze toetsing spitst zich toe op het risico van lekkage uit het CO₂ opslagreservoir.



Stap 1: Locatiekeuze door evaluatie van de kandidaat opslagreservoirs.

De afweging van verschillende mogelijke reservoirs is onderdeel geweest van de locatiekeuze. In hoofdstuk 2 staat de locatiekeuze beschreven. Eerst worden de mogelijke reservoirs vergeleken op basis van veiligheid, kosteneffectiviteit en de tendervoorwaarden. In paragraaf 2.3 zijn de reservoir eigenschappen expliciet in beeld gebracht en getoetst op geschiktheid.

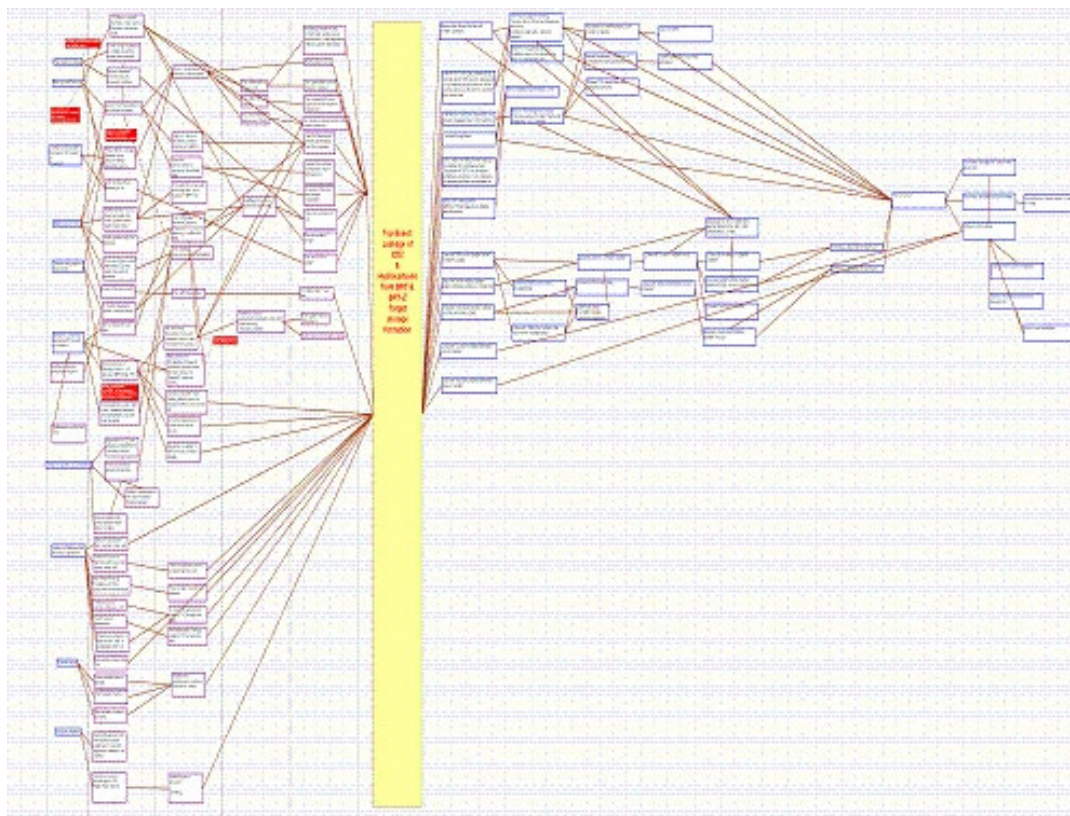
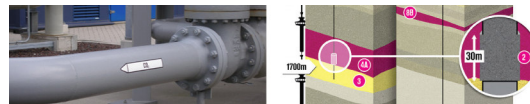
De scores voor geschiktheid zijn voornamelijk + en ++. Er wordt een 0 gescoord voor de breuklijnen bij de locatie Barendrecht – Ziedewij. Dit vormt daarmee een aandachtspunt. De putten scoren goed, onder voorwaarde dat vooral bij de locatie Barendrecht de cementering van de putten eerst wordt verbeterd. De opslagcapaciteit voor de locatie Barendrecht scoort een 0, aangezien het volume niet al te groot is. Hier is verder geen aandacht voor nodig, aangezien dit door de toevoeging van de locatie Barendrecht–Ziedewij wordt ondervangen. Mogelijke chemische reacties worden voor beide reservoirs als aandachtspunt gezien, eveneens met een score 0. Dit geldt eveneens voor de onzekerheden op het gebied van beleid en regelgeving. Het landgebruik bij de injectielocaties wordt als een – gescoord, vanwege verstoring in de aanlegfase. Hieraan wordt bij geluid en externe veiligheid voor de bovengrond uitgebreid aandacht besteed in deelrapport 2 van dit MER.

Stap 2: Inventarisatie van mogelijke bedreigingen als onderdeel van de lekkagescenario's.

In brede workshops (door middel van toepassing van FEP en Bow-tie) met interne en externe experts is een overzicht gemaakt van mogelijke bedreigingen die kunnen leiden tot lekkage. De bedreigingen en scenario's hebben betrekking op mogelijke lekkage van CO₂ uit het opslagreservoir van de locaties Barendrecht en Barendrecht – Ziedewij.

Bedreigingen en lekkagescenario's

De workshops hebben geleid tot de eerste aanzet van het bow-tie diagram. De bow-tie is gesplitst in twee delen. De eerste bow-tie heeft betrekking op de periode tijdens CO₂-injectie (operationele fase). De tweede bow-tie brengt in beeld de situatie nadat het reservoir is afgesloten. Dit eerste bow-tie diagram heeft geleid tot het programma van haalbaarheidsstudies uit stap 3.



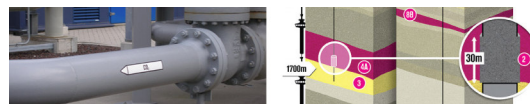
Figuur 4.1 Voorbeeld van een bowtie uitwerking. Hoewel de vakjes in het schema niet leesbaar zijn, geeft dit aan hoe de structuur van een bowtie er uit ziet.

Stap 3: Haalbaarheidstudie en beoordeling van bedreigingen en consequenties.

De lekkagescenario's (bedreigingen en consequenties) uit stap 2, zijn in stap 3 in detail onderzocht, inclusief alle relevante factoren die op de scenario's van invloed kunnen zijn. Het primaire doel van de studies is met zekerheid te bepalen dat er geen scenario's zijn die mogelijk kunnen leiden tot het stopzetten van het project.

De uitgevoerde studies voor Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij zijn:

1. Onderzoek naar beschikbare data gedurende gasproductieperiode (NAM).
2. Karakterisering van de breukzones in Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij (NAM); Basis is de beschikbare data, karakterisering (seismiek) en modellen op basis van de afgeronde gasproductie [Detailonderzoek ondergrond, referentie 2, 3 en 4].
3. Onderzoek naar initiële putintegriteit (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 5].
4. Putintegriteitsstudie (TNO); onderzoek naar verschillende bedreigingen en mitigerende maatregelen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 6].

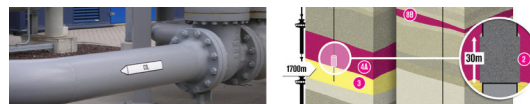


5. Onderzoek naar de integriteit van de breukzones voor het De Lier veld na de volledige cyclus van 'blow-down en re-pressurisation' (als basis voor het BRT veld) (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 7].
6. Petrografische analyse (Panterra) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 8 en 9], van beschikbaren monsters van het:
 - gesteente in de afdekkende laag, en het
 - reservoirgesteente.
7. Onderzoek naar mogelijke chemische reacties [Detailonderzoek ondergrond, referentie 10a en 10b] van:
 - CO₂ en de afdekkende laag (TNO);
 - CO₂ en het opslagreservoir (TNO);
 - CO₂ met de aanwezige putonderdelen (TNO).
8. Onderzoek naar mogelijke mechanische reacties [Detailonderzoek ondergrond, referentie 7] van druk op:
 - de afdekkende laag (TNO);
 - breukzones (TNO).
9. Onderzoek naar injectie onder 'fracturing condities' en de kans en impact hierop bij de aanwezigheid van een 'irreversible stress path' als gevolg van gasproductie (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 11].
10. Onderzoek naar een realistisch lekkagedebiet/ hoeveelheid (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12, 13].
11. Mogelijke migratieroutes van CO₂, indien dit buiten de reservoirs komt, ongeacht de bestaande barrières en het lekkagedebiet (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 14].
12. Gevoeligheidsanalyse voor voorkeurspaden in het reservoir (modelberekeningen door NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15 en 16].
13. Mate en snelheid van oplossen van CO₂ in aquifers [Detailonderzoek ondergrond, referentie 17].
14. Lange termijn mengeffecten van CO₂ en methaan in het reservoir [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15 en 16].
15. Lange termijn drukverhoging door menging van methaan en CO₂ (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 18].

De bevindingen uit de bovengenoemde rapporten zijn verwerkt in de bespreking van scenario's in hoofdstuk 5. Een overzicht van alle referenties is opgenomen aan het eind van dit rapport.

Stap 4: Semi kwantitatieve rangschikking van de bedreigingen en lekkagescenario's.

De studies uit stap 3 hebben ertoe geleid dat de risicoscenario's uit stap 2 kunnen worden samengevat tot vijf hoofdscenario's. Deze scenario's zijn:



1. *Lekkage door of langs de afdichtende bovenlaag (caprock) (nader uitgewerkt in paragraaf 5.3)*

De belangrijkste bedreigingen zijn openingen of scheuren als gevolg van hoge injectiedebieten, hoge (lokale) drukken en plotselinge fase- of dichtheidsveranderingen. Dit kan leiden tot ontsnapping van CO₂ naar de bovenliggende lagen. In de bovenliggende lagen zal het CO₂ ofwel accumuleren onder andere afdekkingen of deels oplossen in waterlagen. Uiteindelijk kan (althoewel zeer onwaarschijnlijk) het CO₂ terecht komen in de biosfeer.

2. *Sijpelen door of langs de afdichtende bovenlaag (caprock) (zie eveneens paragraaf 5.3)*

De belangrijkste bedreiging is het overschrijden van capillaire inpersdrukken. Dit kan leiden tot zeer geleidelijke ontsnapping van CO₂ in de bovenliggende lagen.

3. *Lekkage via een overstromingspunt (spillpoint) van het reservoir (zie paragraaf 5.4)*

De belangrijkste bedreigingen als onderdeel van dit scenario zijn:

- Overvullen van het veld;
- Aanwezigheid van voorkeursverplaatsing/ stroompaden;
- Oplossing in onderliggende waterlagen (aquifers);
- Drukverhogingen op lange termijn als gevolg van menggedrag.

Dit kan vervolgens tot gevolg hebben dat CO₂ zich verplaatst in de naburige en bovenliggende lagen en uiteindelijk terecht komt in de biosfeer.

4. *Lekkage langs of via geologische breuken (zie paragraaf 5.5)*

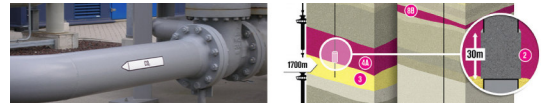
De belangrijkste bedreiging van dit scenario vormt de reactivering van breuken als gevolg van gasproductie en/of CO₂-injectie. Evenals het vorige scenario kan dit ertoe leiden dat CO₂ zich verplaatst in de naburige en bovenliggende lagen en uiteindelijk terecht komt in de biosfeer.

5. *Lekkage langs de putwand of door de putten (zie paragraaf 5.6)*

De ongewenste gebeurtenis van dit scenario is de ontsnapping van CO₂ bij de put. Dit zou kunnen optreden als gevolg van degradatie van cement en staal van de injectie- en monitoringsputten onder invloed van CO₂, opgelost in aanwezig water (lage pH, zuur milieu), en als gevolg van hogere drukken. Dit zijn bedreigingen voor lekkage vanuit het opslagreservoir via de put (tussen binnenste en buitenste verbuizing) of langs de cementlaag om de buitenste verbuizing naar de bovenliggende lagen en/of naar de atmosfeer.

Detailbeschrijving in hoofdstuk 5

In hoofdstuk 5 van dit rapport worden deze vijf risicoscenario's, onderliggende haalbaarheidsstudies, risicoclassificatie, en mitigerende maatregelen in meer detail beschreven.



Evaluatie risico's

Hoewel de bevindingen van de risicoscenario's worden beschreven in hoofdstuk 5, zijn de uitkomsten in dit hoofdstuk al van belang, omdat deze bepalend zijn voor de volgende stappen. Daarom worden onderstaand de belangrijkste bevindingen uit hoofdstuk 5 samengevat. De evaluatie van de risico's komt op het volgende neer:

- Lekkage van CO₂ uit het reservoir naar omringende of bovenliggende lagen is erg onwaarschijnlijk omdat er voldoende en robuuste barrières aanwezig zijn, welke voorkomen dat het CO₂ uit het reservoir kan lekken. Dit wordt mede bepaald doordat er een hogere druk heerst in de omringende lagen.
- Indien lekkage van CO₂ plaatsvindt uit het reservoir naar andere lagen, kan dit niet meer zijn dan een zeer beperkte stroom.
- Indien CO₂ in de omringende lagen terecht komt, zal het CO₂ grotendeels oplossen in het aanwezige water in de diepe ondergrond. Dit vormt aanvullende barrières zodat het CO₂ niet naar de oppervlakte zal migreren. In het meest extreme geval kan het CO₂ naar andere gasreservoirs migreren.
- Vooral nabij de putten en bij het afdichten van putten kunnen niet-verwaarloosbare risico's voorkomen (op korte en lange termijn) ten gevolge van mogelijke chemische reacties (corrosie en degradatie). Het nemen van aanvullende beheersmaatregelen richt zich daarom vooral op de putten en het afsluiten van de putten.

Eerder is in deelrapport 2, hoofdstuk 2, al vastgesteld dat het risico van lekkage naar aanleiding van trillingen of bevingen verwaarloosbaar is.

Classificatie in risicomatrix

De bevindingen van stap 3 en 4 hebben er toe geleid dat de lekkagescenario's zijn uitgewerkt en dat op basis van de bevindingen de risicomatrix kan worden ingevuld. De werking van de risicomatrix is in paragraaf 3.3 uitgelegd. Onderstaand is de ingevulde risicomatrix weergegeven, met daarbij in de vakjes de verschillende risicoscenario's. Onderstaand wordt toegelicht welke codes en classificaties daarbij gelden.

1. Lekkage door of langs de afdichtende bovenlaag (caprock) (zie paragraaf 5.3)

De waarschijnlijkheid is verwaarloosbaar. Het gevolg wordt als laag bepaald (aangeduid als 'CL' in risicomatrix).

2. Sijpelen door of langs de afdichtende bovenlaag (caprock) (zie paragraaf 5.3)

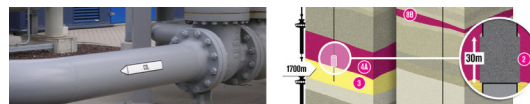
Zowel de waarschijnlijkheid als de gevolgen zijn als verwaarloosbaar geclassificeerd (aangeduid als 'CS' in risicomatrix).

3. Lekkage via een overstromingspunt (spillpoint) van het reservoir (zie paragraaf 5.4)

Zowel de waarschijnlijkheid als de gevolgen zijn hierbij verwaarloosbaar geclassificeerd (aangeduid als 'OL' in risicomatrix).

4. Lekkage langs of via geologische breuken (zie paragraaf 5.5)

De waarschijnlijkheid is verwaarloosbaar. Het gevolg wordt als laag bepaald (aangeduid als 'BL' in risicomatrix).



5. Lekkage langs of door de putten (zie paragraaf 5.6)

- Er zijn twee putten op de locatie Barendrecht, BRT-2B (injectieput) en BRT-1 (monitoringsput), waarvoor geldt dat ze geclassificeerd zijn als lage waarschijnlijkheid, maar met een medium voor de gevolgen, op basis van vooral de cementering onderin de putten. Hier zijn mogelijk aanvullende beheers- en mitigatie maatregelen nodig.
- Put BRT-2A op de locatie Barendrecht is gescoord als verwaarloosbaar voor de waarschijnlijkheid en laag voor de gevolgen.
- Voor vier putten op de injectielocatie Barendrecht-Ziedewij (BRTZ-1, BRTZ-3, BRTZ-4 en BRTZ-4A) geldt dat deze eveneens een verwaarloosbare waarschijnlijkheid hebben, in combinatie met een lage score voor de gevolgen.

Risk Matrix CO₂ opslag

- CL Cap rock lekkage
- BL Breuk lekkage
- CS Cap rock siphelen
- OL Overstromings punt lekkage
- Rest risico na mitigatie

Mogelijke consequenties

CO₂ komt aan oppervlakte of CO₂ accumuleert in ondiepe (<200 m) lagen met hoge concentraties met gevolgen voor kritische objecten

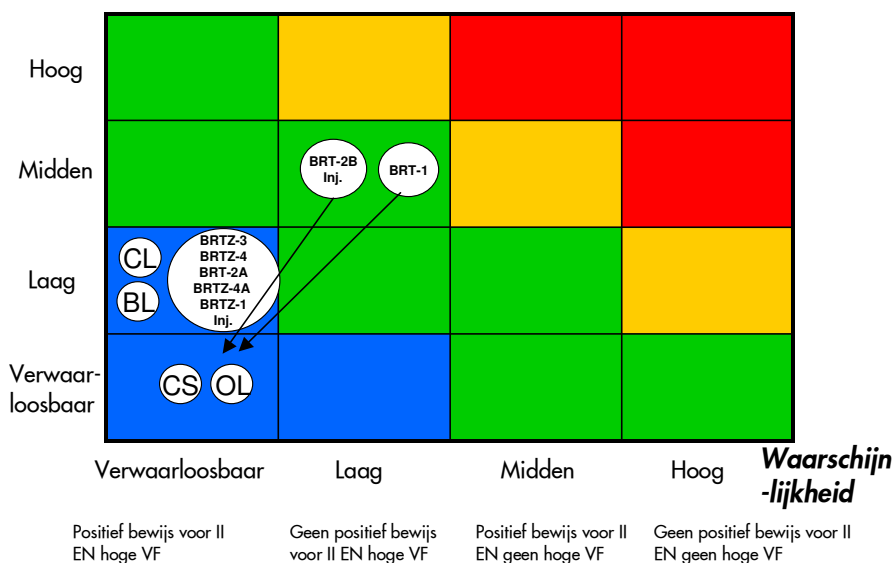
CO₂ komt aan opp. of CO₂ accumuleert in ondiepe (<200 m) lagen met:

- hoge concentraties zonder gevolgen voor kritische objecten
- lage concentraties met gevolgen voor kritische objecten

CO₂ migreert door het afsluitend gesteente met relatief hoge snelheid maar wordt gevangen in een diepe laag (>200 m) of migratie van CO₂ naar ondiepe lagen en/of biosfeer met lage concentratie en niet bij kritische/gevoelige objecten.

CO₂ migreert door het afsluitend gesteente met relatief lage snelheid maar wordt gevangen in een diepe laag (>200 m)

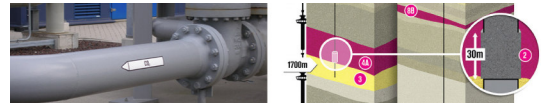
Informatie over initiële integriteit (II) veiligheidsfactoren, VF (uit studies)



Figuur 4.2 Schema ingevulde risico-matrix naar aanleiding van detailonderzoek

De risicoclassificatie geeft het volgende aan:

- Op basis van bovenstaande afwegingen worden alle lekkagescenario's als verwaarloosbaar geclassificeerd (inclusief de mitigerende maatregelen en barrières die in stap 3 en 4 als onderdeel van het project waren meegenomen). Deze maatregelen zijn onder stap 5 samengevat.
- Echter voor enkele van de putten zullen extra beheersmaatregelen worden genomen om het risico als verwaarloosbaar te kunnen classificeren (zie tevens stap 5).



Stap 5: Identificatie van mitigerende maatregelen.

De geïdentificeerde barrières c.q. mitigerende maatregelen die onderdeel zijn van deze stap, zijn gegroepeerd naar de benoemde lekkagescenario's en staan in detail beschreven in hoofdstuk 5.

Voor de risicoscenario's 1 t/m 4 blijken vrijwel alle mitigerende maatregelen al onderdeel van de oorspronkelijke opzet van het opslagproject. De risicoclassificatie is dan ook zonder aanvullende maatregelen verwaarloosbaar.

Voor risicoscenario 5 (Lekkage langs of door de putten) blijkt de risicoclassificatie 'midden'. Voor dit scenario zijn aanvullende mitigerende maatregelen geïdentificeerd en opgenomen in het ontwerp, waardoor het risico afneemt tot 'verwaarloosbaar'.

De risicoclassificatie 'midden' is tot stand gekomen doordat de initiële integriteit lager scoort. Dit komt doordat zich mogelijk te weinig of slecht cement tussen buizen en gesteente bevindt. De volgende mitigerende maatregelen worden hiervoor toegepast:

- voordat CO₂-injectie start: metingen aan de cementbinding langs de put en toepassen van een workover om het cement te repareren;
- tijdens the CO₂-injectie wordt de CO₂-drukgradiënt in het reservoir lager gehouden dan in het omliggende gesteente, wat voorkomt dat er CO₂ uit het reservoir kan stromen;
- na afloop van de CO₂-injectie worden buizen en mogelijk slecht cement in de ruimte tussen buizen/gesteente weggehaald en vervangen door een nieuwe 30 m dikke pannenkoekplug. Hierbij wordt speciaal cement gebruikt, wat in een betere afsluiting met het reservoirgesteente resulteert.

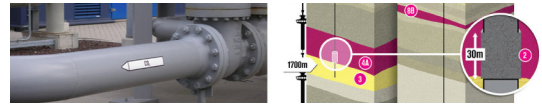
Stap 6: Definitie van acceptatiecriteria en toetsing van de resterende risico's aan deze criteria.

Voor dit onshore demonstratieproject is door de initiatiefnemer gesteld dat alleen verwaarloosbaar- of laag-risico scenario's acceptabel zijn.

Aan dit acceptatiecriterium kan voldaan worden, doordat:

- in de Barendrecht velden geen geheel afgesloten (geabandonneerde) putten aanwezig zijn;
- aangetoond is dat de kans op eventuele lekkages uit het reservoir verwaarloosbaar is;
- bij lekkage het CO₂ in bovenliggende lagen komt en niet in de biosfeer.

Om aan het acceptatiecriterium te voldoen, dienen de mitigerende maatregelen uit stap 5 in stap 7 verder uitgewerkt te worden voor concrete toepassing in het project.

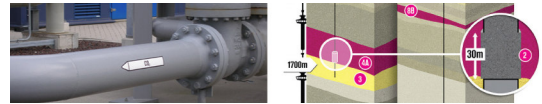


In hoofdstuk 7 worden de beschikbare monitoringstechnieken beschreven, welke ingezet worden om tijdig (bij voorkeur voordat lekkage optreedt) in te kunnen grijpen.

Stap 7: Overzicht van het uiteindelijke risicobeheersplan als onderdeel van het project; ontwerp, operationeel, afsluiting, monitoring en reactieplan.

De belangrijkste geselecteerde beheersmaatregelen voor het CO₂-opslagproject met betrekking tot de lekkagescenario's worden hieronder kort samengevat:

- **Ontwerp:**
 - Grote temperatuurverschillen en faseveranderingen worden voorkomen door een minimum en een maximum injectietemperatuur te specificeren.
 - Het CO₂ moet te allen tijde voldoen aan de strenge eisen wat betreft watergehalte en zuiverheid.
 - De pannenkoekplug wordt gebruikt om de putten hermetisch af te sluiten.
 - Injectie wordt gestopt op een iets lagere druk dan de originele reservoirdruk (8 bar lager dan de initiële druk wordt als waarde gehanteerd).
 - Maximale injectiedebieten en druklimieten worden in het ontwerp van de faciliteiten meegenomen.
- **Operationeel:**
 - Continue meting en beheersing (pressure control) van injectiedrukken en injectiedebieten.
 - CO₂-awareness training voor het personeel (op basis van onder meer de ervaringen in de Verenigde Staten met het toepassen van CO₂ bij Enhanced Oil Recovery).
 - Uitgebreide procedures voor start-up en shut-down.
 - Minimaliseren interfaces.
- **Afsluiting:**
 - Een gefaseerde afsluiting (stop injectie, monitoring, plaatsing pannenkoekplug, monitoring, plaatsing meerdere bovenliggende plugs, monitoring, definitieve afsluiting, verwijdering en overdracht);
 - Het precieze ontwerp van de afsluiting (bijvoorbeeld type cement) zal naderhand worden vastgesteld met behulp van de dan best beschikbare technieken en materialen.
- **Monitoring:**
 - De nadruk in het monitoringsplan is gelegd op preventieve monitoring (van de bedreigingen voor lekkage; beheersing van de operationele condities zodat lekkage niet zal optreden).
 - Voor de putten (relatief hoger risicoscenario) zal ook regelmatig gechecked worden of er CO₂ langs de putwand stroomt (met een zogenaamde belletjes-meter).
 - De seismische nulmeting kan worden gebruikt om aan te tonen dat het veld niet is gaan lekken in de gasproductiefase.
 - Indien nodig (als er veel CO₂ langs de putwand stroomt, maar niet aan het maaiveld komt of als de massabalans niet klopt) kan een vervolg survey gedaan worden om te bepalen waar het CO₂ eventueel heen is gegaan. Zoals de modelberekeningen in Appendix 3 aangeven, is dit waarschijnlijk een bovenliggende waterlaag.



- Reactieplan:
 - Veel reacties uit het reactieplan zijn standaard in de olie- en gasproductie (bijvoorbeeld als corrosie optreedt of als er puttenlekkage optreedt).
 - De lokatie van de putten is bekend en de putten zijn toegankelijk, wat betekent dat in principe elke lekkage kan worden gestopt (desnoods met een pannenkoekplug en een vroegtijdige afsluiting).
 - Lekkages via andere paden zijn zeer onwaarschijnlijk en zullen niet in de biosfeer komen. Een reactieplan wordt opgesteld voor mogelijke maar ook voor onmogelijk geachte gebeurtenissen.
 - Het reactieplan beschrijft mogelijke activiteiten van additionele metingen en het uitvoeren van mogelijke reparaties (van het boren van een hulpbron bij een blow-out tot het gecontroleerd aflaten van CO₂ via een put).

Stap 8: Toets van risicobeheersplan.

Interne procedures zorgen ervoor dat er met zekere regelmaat (bijvoorbeeld voor start-up, in operationele fase) audits en reviews zullen worden uitgevoerd. In overleg met het bevoegd gezag zullen daar (zeker voor dit project) ook de nodige externe audits/reviews bijkomen. Deze zullen behalve op veiligheid ook de nadruk leggen op de aantoonbare permanente opslag van het CO₂ in het kader van emissiereducties (Nederlandse Emissie Autoriteit).

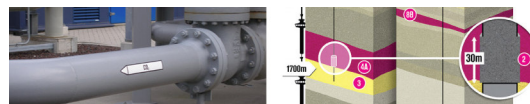
Stap 9: Toetsing en aanpassing van het scenario overzicht op vooraf bepaalde kernpunten en zodra nieuwe monitoringsgegevens beschikbaar komen.

Het monitoringsplan wordt in hoofdlijnen beschreven in hoofdstuk 7. Daarbij geldt dat de gemeten waarden steeds getoetst worden om vast te stellen of de kritische waarden binnen de benodigde bandbreedten blijven. Daarnaast vindt periodiek, waarschijnlijk op jaarbasis, een totaalevaluatie plaats van de monitoringsgegevens en de mogelijke risico's. Doordat het reservoir van de locatie Barendrecht relatief klein is, kan hier in een betrekkelijk korte periode een gehele cyclus van injectie tot insluiting en nazorg worden doorlopen.

De bevindingen van stap 1 tot en met stap 8 worden voorgelegd aan externe experts. Dit gebeurt onder meer in het kader van de m.e.r. procedure. Ook bestaat het plan om met het Barendrechtproject deel te nemen aan CATO-2 (zie www.co2-cato.nl) en de monitoringsresultaten aan een breder panel van experts (TNO, Universiteiten, ECN, etc.) voor te leggen voor evaluatie en conclusies.

Stap 10: Communicatie over risico's met de belanghebbenden en het publiek.

De uitkomsten van de risicomangement beoordelingen dienen duidelijk aan het publiek en belanghebbenden gecommuniceerd te worden.



5. Scenario's

5.1 Inleiding

Detailonderzoek binnen het tien-stappenplan

In hoofdstuk 3 en 4 is ingegaan op de toegepaste risicomanagement methodiek. De methodiek zelf is onderwerp van hoofdstuk 3, terwijl hoofdstuk 4 de bevindingen beschrijft. De methodiek bestaat uit een tien-stappenplan, waarbij daar waar nodig mogelijke risico's in meer detail worden onderzocht. In stap 3, stap 4 en stap 5 van het tien-stappenplan is aangegeven dat detailonderzoek kan worden uitgevoerd aan de hand van scenario's. Daarbij zijn vier te onderzoeken lekkagescenario's beschreven. Dit hoofdstuk beschrijft de vier scenario's in meer detail en gaat dieper in op de uitgevoerde studies en indien van toepassing de mitigerende maatregelen.

Korte termijn effecten versus lange termijn effecten

De scenario's hebben betrekking op de periode voorafgaand aan de CO₂-injectie, gedurende de injectie en de periode waarin nog monitoring plaatsvindt. De mogelijke effecten op de langere termijn, nadat een stabiele eindsituatie is bereikt en het veld is overgedragen aan de overheid, zijn samengevat in hoofdstuk 6.

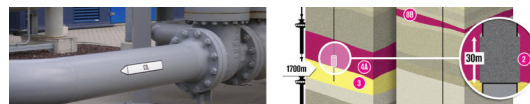
Aandachtspunten Commissie voor de m.e.r.

De Commissie voor de m.e.r. heeft in reactie op het AMESCO-rapport aangegeven, dat het gebruik van scenario's een geschikte methode is om mogelijke risico's inzichtelijk te maken. [Commissie voor de m.e.r., 2007].

Advies Commissie voor de m.e.r. naar aanleiding van het AMESCO-rapport

De Commissie beveelt aan in toekomstige milieueffectrapportages te werken met scenario's voor mogelijke lekkage. Per scenario kunnen de verschillende milieu-, veiligheids- en technische effecten worden onderzocht en beschreven. Daarbij kan aangegeven worden wat de kans is dat het scenario met bijbehorende effecten optreedt. De Commissie acht het in het kader van een goede veiligheidsanalyse wenselijk om hierbij ook minder waarschijnlijk geachte scenario's waarbij lekkage van CO₂ plaatsvindt, bijvoorbeeld door het ontstaan of reacteren van een breuk, te beschouwen. Gedacht wordt aan de volgende lekkagescenario's:

- Een 'lekvrij' reservoir, waarbij waarschijnlijk slechts 1% of minder van het CO₂ uit het reservoir zal ontsnappen;
- De reactie van CO₂ met water (en wellicht andere in/bij het reservoir aanwezige mineralen) en de reservoir-en/of toplaaggesteenten;
- Het ontstaan en/of reacteren van een breuk.



Leeswijzer

In paragraaf 5.2 wordt beschreven hoe de opslag van CO₂ regulier zal plaatsvinden op basis van uitgevoerde studies en modellen. Daarna wordt aandacht besteed aan scenario's waarbij niet reguliere gebeurtenissen plaatsvinden. Centraal in deze scenario's staan de mogelijke weglekmechanismen uit een reservoir en eventuele weglekpaden naar het aardoppervlak. In het geval van CO₂-opslag in de lege gasvelden van Barendrecht (BRT) en Barendrecht-Ziedewij (BRTZ) zou men zich, in het verlengde van het AMESCO rapport, vier mogelijke lekkagemechanismen kunnen voorstellen.

Lekkagescenario's:

1. Lekkage door of langs de afdichtende bovenlaag, inclusief sijpelen (zie paragraaf 5.3).
2. Lekkage via een overstromingspunt (spillpoint) van het reservoir (zie paragraaf 5.4).
3. Lekkage langs of via geologische breuken (zie paragraaf 5.5).
4. Lekkage langs of door de putten, inclusief ondiepe accumulatie (zie paragraaf 5.6).

Als onderdeel van het eerste en vierde scenario wordt speciaal aandacht besteed aan:

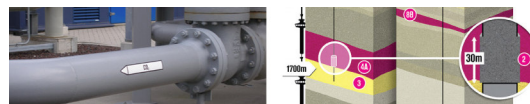
- Het heel geleidelijk sijpelen van CO₂ uit het reservoir door de afdichtende bovenlaag.
- De mogelijke secundaire CO₂-ophoping, indien CO₂ langs de put zou lekken en accumuleert in ondiepe lagen.

In dit hoofdstuk wordt resumerend, na de beschrijvingen van de scenario's, afzonderlijk aandacht besteed aan bodembeweging en trilling en aan mogelijke chemische reacties. Dit zijn mogelijke oorzaken, die tot ongewenste situaties kunnen leiden en in de discussies dan ook veelvuldig terugkomen. Het resumerende gedeelte aan het slot van dit hoofdstuk beoogt hier de nodige duidelijkheid in te brengen.

Opzet van de scenariobeschrijving

In dit hoofdstuk zijn de lekkagescenario's volgens een vast stramien onderzocht. Hierin zijn steeds zes onderdelen te onderscheiden:

1. Een beschrijving van het betreffende scenario.
2. Een beschrijving van de mogelijke oorzaken van de lekkage en de mogelijke consequenties van de lekkage.
3. Toelichting op de uitgevoerde detailonderzoeken en studies, met daarin aangegeven de mate van kwantificering van bedreigingen en consequenties.
4. Risico inschatting op basis van de bestaande barrières tegen de bedreigingen en consequenties van lekkage, op basis van de uitgevoerde studies en beschikbare data.



5. Beschrijving van aanvullende mitigerende maatregelen, inclusief monitoringsmaatregelen van de bedreigingen voor lekkage en de gevolgen van de lekkage. Dit wordt bijeengebracht in een risicobeheersplan met projectmaatregelen.
6. Beschrijving resulterend resterend risico (kans en consequentie).

Initiële integriteit en veiligheidsfactor

Bij het onderzoek naar mogelijke lekkages, wordt een onderverdeling gemaakt tussen:

- de “initiële integriteit”, waarmee de karakteristieken van de beginsituatie worden aangeduid. De initiële integriteit wordt bepaald aan de hand van het gedrag van een reservoir in het verleden, op basis van uitgevoerde metingen en analyses. Dit wordt aangevuld met recente monitoringsresultaten van de nulmeting (zie het hoofdstuk 7 monitoring).
- de “veiligheidsfactor”, waarmee de ‘afstand’ wordt aangeduid, tussen de voorziene projectcondities in het reservoir en het overschrijden van bepaalde limieten. Dit kunnen bijvoorbeeld sterktelimieten zijn voor het breken van het gesteente, maar ook chemische limieten, wanneer bepaalde corrosielimieten worden overschreden. Een voorbeeld van deze ‘afstand’ is het verschil tussen de maximaal toegepaste druk in het reservoir en de omgevingsdruk waarbij lekkage uit het reservoir zal optreden. Indien besloten wordt het reservoir tot een lagere druk op te vullen dan in de oorspronkelijke plannen, leidt dit er toe dat de afstand tot de omgevingsdruk toeneemt. Dit wordt aangeduid als een vergroting van de veiligheidsfactor.

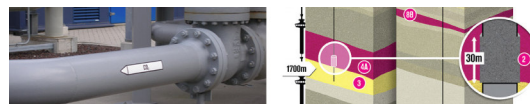
5.2 Opslag van CO₂

Voordat met de scenariobeschrijving wordt begonnen, wordt in deze paragraaf de ondergrondse opslag onder normale bedrijfsvoeringomstandigheden beschreven. Dit bestaat uit een beschrijving van de samenstelling van het te injecteren gas, de opbouw van de druk in de reservoirs, de wijze waarop het CO₂ zich zal verspreiden door het reservoir en tot slot het aanbrengen van de pannenkoekplug bij het afsluiten van het reservoir. De beschrijving geeft een beeld van de voorziene projectcondities in het reservoir.

5.2.1. Samenstelling te injecteren gas

Het voornemen is slechts CO₂ op te slaan en niet allerlei andere gassen. Daarvoor is het van belang de chemische samenstelling van het te injecteren gas te meten en vast te stellen dat dit inderdaad voor het overgrote deel bestaat uit CO₂. Tevens is het van belang de toch nog aanwezige andere gascomponenten weer te geven, in verband met mogelijke chemische reacties in de ondergrond.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de componenten van het te injecteren gas. De gegevens zijn afkomstig van de Shell faciliteiten in Pernis.

Tabel 5.1. Overzicht van de chemische samenstelling van het te injecteren CO₂

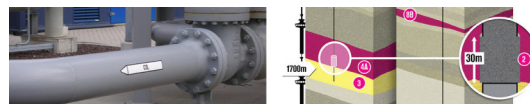
Component	Range van concentraties zoals gemeten door Shell	Specificatie Shell
CO ₂	Ca. 99%	-
H ₂ O	2 – 15 ppm	<40 ppm
O ₂	30 – 45 ppm	<150 ppm
N ₂	720 – 770 ppm	<1.500 ppm
H ₂	700 – 1.400 ppm	250 – 2.000 ppm
NO _x	NG ¹	<2.5 ppm
Methaan	480 – 625 ppm	200 – 1.000 ppm
Ethaan	35 – 70 ppm	20 – 150 ppm
Propaan	4 – 7 ppm	0 – 20 ppm
Butaan	NG	0 – 20 ppm
Methanol	100 – 350 ppm	50 – 700 ppm
CO	100 – 300 ppm	100 – 750 ppm
H ₂ S	0,8 – 1,4 ppm	<5 ppm
Etheen	NG	<1 ppm
SO ₂	NG	<1 ppm
HCN	NG – 15 ppm	<20 ppm

¹) niet gedetecteerd / niet aangetroffen binnen de nauwkeurigheid van de meetapparatuur.

Uit de gegevens blijkt dat het te injecteren gasmengsel voor 99% of hoger uit CO₂ bestaat, en de kleine 'verontreinigingen' bestaan uit: stikstof, waterstof, methaan, methanol en koolstofmonoxide.

5.2.2. Opbouw van de druk in de reservoirs

In tabel 5.2 wordt een overzicht gegeven van de hoeveelheden CO₂, die volgens planning zullen worden geïnjecteerd in de leeggeproduceerde gasreservoirs. Daarbij wordt de injectiedruk aan maaiveld en de druk in het reservoir bijgehouden, om te bepalen of de maximaal wenselijke druk is bereikt.

Tabel 5.2. Overzicht van de CO₂-injectiehoeveelheden

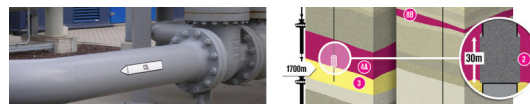
Locatie	Jaar	Jaarlijks injectie volume	Cumulatief injectie volume	Injectiedruk aan maaiveld
		Miljoen ton CO ₂	Miljoen ton CO ₂	Bar
Barendrecht	2010	0,00	0,00	initieel
	2011	0,16	0,16	73,1
	2012	0,28	0,44	97,1
	2013	0,28	0,72	111,3
Barendrecht Ziedewij	2014	0,1	0,82	35,3
	2015	0,4	1,22	36,0
	2016	0,4	1,62	40,8
	2017	0,4	2,02	45,8
	2018	0,4	2,42	50,8
	2019	0,4	2,82	55,6
	2020	0,4	3,22	60,2
	2021	0,4	3,62	64,4
	2022	0,4	4,02	68,0
	2023	0,4	4,42	71,5
	2024	0,4	4,82	74,8
	2025	0,4	5,22	78,1
	2026	0,4	5,62	81,2
	2027	0,4	6,02	84,4
	2028	0,4	6,42	87,5
	2029	0,4	6,82	90,6
	2030	0,4	7,22	93,9
	2031	0,4	7,62	97,2
	2032	0,4	8,02	100,7
	2033	0,4	8,42	104,8
	2034	0,4	8,82	109,7
	2035	0,4	9,22	115,3
	2036	0,4	9,62	122,0
	2037	0,4	10,02	130,8
	2038	0,16	10,18	143,5

Hoeveelheden CO₂

Tabel 5.3 geeft een overzicht van de CO₂-stromen, vanaf de raffinaderij in Pernis (eerste kolom, aangeduid als productie). In de tabel zijn twee karakteristieke jaren opgenomen. Het jaar 2012 is typerend voor de eerste drie jaar, vanaf eind 2011 tot 2013, waarin CO₂ geleverd kan worden aan de locatie Barendrecht. Het jaar 2015 is typerend voor de periode vanaf eind 2014, waarin CO₂ kan worden geleverd aan de locatie Barendrecht-Ziedewij. In ieder jaar zal vanaf de raffinaderij nog een beperkte hoeveelheid CO₂ worden afgeblazen in de atmosfeer. Dit heeft te maken met interne processen van de raffinaderij zelf. Daarnaast wordt CO₂ geleverd aan Linde voor de (frisdrank) industrie en aan OCAP voor de tuinbouw.

Tabel 5.3 Maatgevende hoeveelheden CO₂ in Kton voor opslag bij Barendrecht (2011) en Barendrecht-Ziedewij (2015).

jaar	Productie	Afblazen	Linde	OCAP	Beschikbaar	Injectie schema
2012	1000	70	150	380	400	280
2015	1000	70	150	380	400	400



Tabel 5.3 geeft een rekenkundige hoeveelheid beschikbaar CO₂. Dit kan gedurende het project afwijken, doordat tijdelijk minder CO₂ kan worden opgeslagen of doordat de opslag wordt vertraagd in de tijd. Daarnaast is het ook mogelijk dat CO₂ sneller kan worden opgeslagen. Dit wordt onderstaand toegelicht.

Redenen waarom dit profiel lager of vertraagd kan worden, zijn:

- Minder CO₂ komt beschikbaar vanaf de bron, doordat er meer dan de geplande shutdowns optreden bij de raffinaderij (bij het Pernis proces).
- Meer CO₂ op Pernis is nodig voor controle en regelingdoeleinden van het afblaasproces (van de SGHP).
- Onvoorziene wijzigingen in de hoeveelheden, die door de tuinbouw en industrie worden afgenomen.
- De beschikbaarheid van transport- en compressie-installaties is lager dan gepland, door stops, lekkages etc, onvoorziene shutdowns.
- Indien het project later opstart dan gepland, als gevolg van vertraging bij het verkrijgen van vergunningen, materiaalleveranties etc.
- Een lagere instelling van het injectiedebiet, ten gevolge van waargenomen onvoorziene lokale scheurdreiging (fracking). Het totale volume verandert hierdoor niet, maar het reservoir wordt langzamer opgevuld.
- Meer evaluatietijd nodig van de bevindingen van BRT, voordat op BRTZ kan worden overgegaan. Bijvoorbeeld doordat een langere baseline monitoring van BRTZ nodig is, op basis van de bevindingen bij BRT. Onvoorziene aanpassing op de putten van BRTZ, op basis van resultaten BRT.
- Er bevindt zich nog meer dan verwacht economisch winbaar gas op BRTZ, wat eerst nog geproduceerd moet worden.

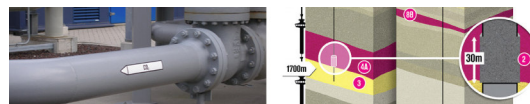
Redenen waarom het opvulvolume van de velden lager kan uitvallen zijn:

- Er wordt een (onvoorzien) hogere veiligheidsmarge, zodat minder CO₂ kan worden opgeslagen.
- Observatie toont aan dat er lekkage optreedt, waardoor het project (tijdelijk) moet stoppen.

Redenen waarom injectie sneller kan plaatsvinden:

- Minder afname dan voorzien van tuinbouw en industrie (meer CO₂ beschikbaar voor opslag).
- Meer CO₂ beschikbaar door hogere beschikbaarheid van Pernis en/of compressie/transport (optimalisatie van shutdowns).
- Overgang van BRT naar BRTZ gaat sneller dan verwacht (sneller verplaatsen van compressoren/ hook-up, snellere evaluatie).

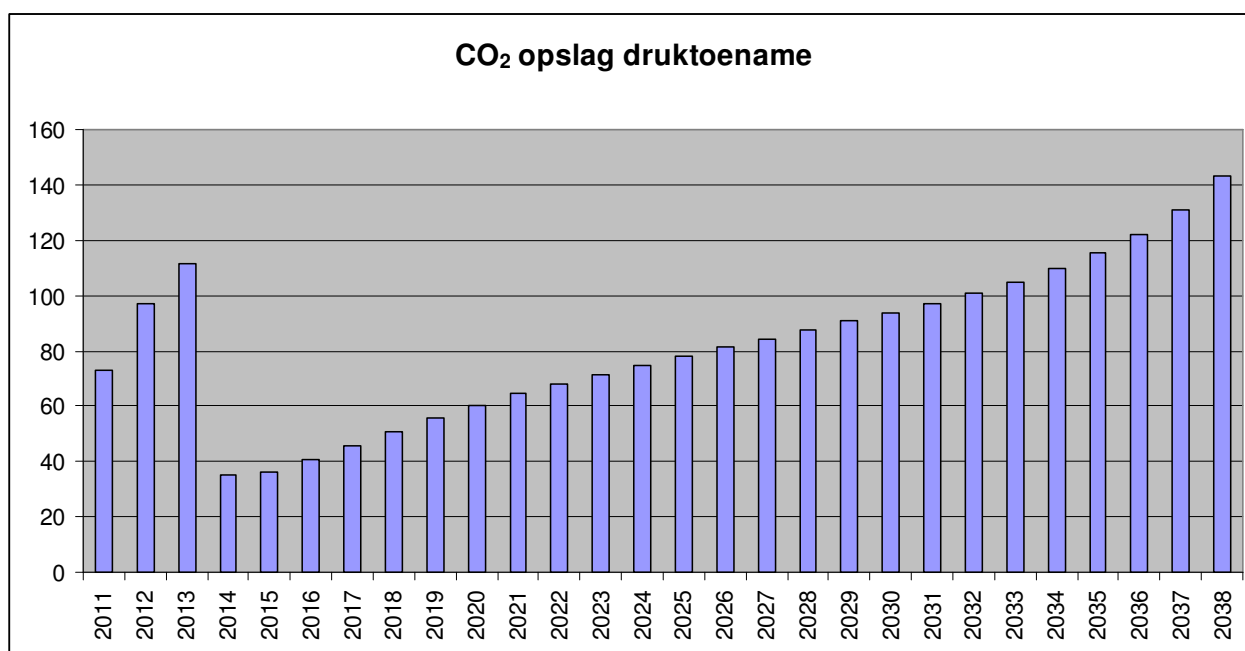
Er dient zodoende rekening gehouden te worden met in de praktijk afwijkende hoeveelheden CO₂-injectie. Onzekerheden over de precieze hoeveelheden zijn gebruikelijk in de olie- en gasindustrie. Om inzicht te krijgen in de gevolgen, wordt daarom een minimum en maximum hoeveelheid bepaald. Nader onderzoek moet er vervolgens voor zorgen dat het verschil tussen de minimaal en maximaal te verwachten hoeveelheid te injecteren CO₂ zo klein mogelijk wordt.



Opbouw van de CO₂-druk in het reservoir

In de startnotitie is aangegeven dat door de injectie van CO₂ de druk in het reservoir zal toenemen, maximaal tot aan de oorspronkelijke druk (initiële druk). In de loop van het onderzoek is naar voren gekomen dat het uit veiligheidsoverwegingen de voorkeur heeft de reservoirs te vullen tot een lagere druk.

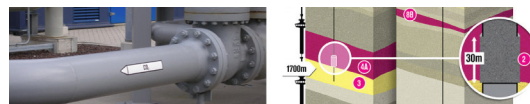
In figuur 5.1 wordt per jaar de bovengrondse druk van het geïnjecteerd CO₂ getoond.



Figuur 5.1 Overzicht bovengrondse druk van het CO₂-veld, cumulatief per jaar

Bij het benoemen van de druk van een reservoir wordt onderscheid gemaakt tussen de druk in het reservoir zelf, op kilometers diepte, en de druk aan maaiveld, waar de injectieput zich bevindt. De druk in het reservoir is groter dan aan maaiveld, afhankelijk van de diepte. Het drukverschil is mede afhankelijk van het soortelijk gewicht van de vloeistof in de put. De druk in het reservoir is maatgevend voor de maximale vulgraad. De druk aan maaiveld is maatgevend voor de technische specificaties van de injectieput.

De initiële druk wordt als maatgevend beschouwd bij het bepalen van de maximale einddruk. Daarbij wordt er van uitgegaan, dat de oorspronkelijke druk in het aardgasreservoir overeenkomt met de omgevingsdruk. Nadat het aardgas is gewonnen, is er een onderdruksituatie ontstaan in het reservoir. De omgevingsdruk is niet veranderd, maar de reservoirdruk is relatief laag geworden. Indien bij het vullen van het reservoir de einddruk lager is dan de initiële druk, zal de druk in de omgeving steeds hoger blijven dan de druk in het reservoir, waardoor de mogelijkheid van lekkage uit het reservoir sterk beperkt wordt [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12].



Reservoirdruk en omgevingsdruk

Het reservoir wordt opgevuld met CO₂ tot een onderdruk van 8 bar vergeleken met de originele druk op de referentiediepte van het oorspronkelijke gasreservoir. De oorspronkelijke druk is iets hoger dan de hydrostatische druk van een watervoerend reservoir. Een onderdruk van 4 bar zou nodig zijn om te voorkomen dat CO₂ via een open verbinding door de afdekkende laag, bijvoorbeeld via een put, in een circa 100 meter hoger liggende laag zou kunnen stromen. In Barendrecht is dit het eerst volgende reservoir boven de afdekkende laag. In dit geval zal de druk van een CO₂ kolom in deze open verbinding gelijk of minder zijn dan de hydrostatische druk van het boven liggende reservoir. Hier bij wordt een veiligheid marge van nog een keer 4 bar opgeteld.

Voor het reservoir bij de locatie Barendrecht geldt dat de oorspronkelijke druk in het reservoir 174 bar op 1.700 meter diepte heeft bedragen. Dit is de gemeten druk, voordat de gasproductie is begonnen. Voor CO₂-injectie wordt rekening gehouden met een lagere einddruk. In plaats van 174 bar wordt de einddruk 166 bar, wat neerkomt op 8 bar minder dan de omgevingsdruk of 95% van de initiële druk.

Voor het reservoir bij de locatie Barendrecht-Ziedewij geldt dat de oorspronkelijke druk in het reservoir 314 bar heeft bedragen. Dit is de gemeten druk, voordat de gasproductie is begonnen. Voor CO₂-injectie wordt rekening gehouden met een lagere einddruk. In plaats van 314 bar wordt de einddruk 306 bar, wat neerkomt op 8 bar minder dan de omgevingsdruk of 97,5% van de initiële druk.

Tabel 5.4 Overzicht druk in reservoirs

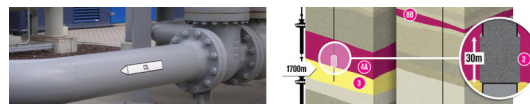
Reservoir	Initiële drukreservoir	Einddruk CO ₂ -injectie	Vulgraad
Barendrecht	174	166	95 %
Barendrecht-Ziedewij	314	306	97,5%

5.2.3. CO₂-stroming in reservoir

Het inbrengen van CO₂ in de reservoirs kan vooraf worden gemodelleerd. Met behulp van modelberekeningen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15] kan inzicht worden verkregen in de stroming binnen het reservoir en de opbouw van druk op verschillende plaatsen binnen het reservoir. Zo kan bijvoorbeeld berekend worden wanneer geïnjecteerd CO₂ vanaf de injectieput de monitoringsput bereikt. Met behulp van de beschikbare ondergrondinformatie is een stromingsmodel opgesteld. Onderstaand wordt kort ingegaan op de opbouw van het model en de berekeningsresultaten.

Meetgegevens

Voor de beide reservoirs, zowel het Barendrecht veld als het Barendrecht-Ziedewij veld, geldt dat veel informatie beschikbaar is van de geologische structuren. De ruimtelijke afmetingen zijn voorafgaand aan de gaswinning met behulp van seismische methoden in beeld gebracht. Bij het boren van de verschillende putten zijn eigenschappen van het veld en de verschillende doorboorde lagen zichtbaar geworden.



Door de uitgevoerde metingen tijdens de productie van aardgas is daarnaast veel informatie beschikbaar gekomen van eigenschappen van het reservoir. Metingen van productiedebieten, drukken tijdens de aardgaswinning en ondergrondse putmetingen (zogenaamde 'logging' en 'cores') zijn uitgevoerd tijdens de gaswinning. Dit heeft geleid tot inzicht in de porositeit en doorlatendheid (permeabiliteit) van het reservoir.

Stromingsmodellen

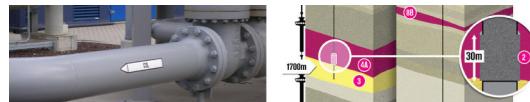
De bestaande kennis van de ondergrondse structuren is gebruikt bij het opstellen van driedimensionale statische [Detailonderzoek ondergrond, referentie 2, 3 en 4] en dynamische modellen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15 en 16].

Met behulp van PETREL (gedetailleerd geologisch model) en MoReS (simulatiemodel om de beweging en verspreiding van water, gas, CO₂ of olie in de poriën van het geologische model te berekenen), is voor zowel het reservoir bij de locatie Barendrecht (BRT) als bij de locatie Barendrecht-Ziedewij (BRTZ) een aantal berekeningen uitgevoerd. Hierin zijn geologische en petrofysische parameters opgenomen. Panterra heeft hiervoor een petrografische analyse [Detailonderzoek ondergrond, referentie 8 en 9] uitgevoerd van enkele boorkernen, ter ondersteuning van het reservoirmodel. De volgende data zijn gebruikt voor het maken van de modellen:

- De productiedata tijdens de periode van aardgaswinning;
- Ondergrondse putmetingen (Logs);
- Boorkernen en analyses van de boorkernen;
- Seismische metingen;
- Eerder gemaakte veldmodellen;
- Petrofysische evaluatie van de productie uit beide reservoirs [Detailonderzoek ondergrond, referentie 20a en 20b].

De modellen zijn vervolgens gekalibreerd en geverifieerd aan de hand van de historische gasproductie en bovengenoemde meetgegevens. Met deze modellen zijn berekeningen uitgevoerd, om vast te stellen hoe CO₂-stroming in het reservoir plaatsvindt. Dit geeft tevens inzicht in de menging tussen het CO₂ en het al aanwezige restgas in het reservoir.

De berekeningen hebben betrekking op de gehele periode waarin het reservoir wordt gevuld. Daarbij wordt berekend hoe in de loop van de tijd de druk in het reservoir toeneemt. Daarnaast wordt er rekening mee gehouden, dat in eerste instantie CO₂ in gasvorm voorkomt. Later gedurende injectie en lange termijn opslag (boven omgevingsdruk en temperatuur) komt het CO₂ in superkritische vorm voor.



Detailonderzoek met behulp van de reservoirmodellen

De reservoirmodellen zijn tevens gebruikt om de volgende onderzoeken uit te voeren (mede ter onderbouwing van risicoscenario's in de volgende paragrafen van hoofdstuk 5):

- Het vaststellen van het CO₂-opslagvolume en het volume van het resterend gas en condensaat in het reservoir;
- Het selecteren van de optimale injectieput;
- Het simuleren van mogelijk lokale drukken en overdrukken;
- Onderzoek naar mogelijk zijwaartse uitstroming via het overstromingspunt (spillpoint) van het reservoir;
- Onderzoek naar menggedrag van CO₂ met de aanwezige gassen en de hierdoor veroorzaakte dichtheidsveranderingen;
- Het bepalen en kwantificeren van het opsluitingsmechanisme (trapping), zoals oplossing in water, structurele en chemisch vastlegging.

Winning van resterende hoeveelheid aardgas

De (MoReS) modellering is uitgevoerd om te bepalen of met behulp van CO₂-injectie nog een deel van het resterende aardgas uit de reservoirs kan worden gewonnen. Met het model is bepaald hoeveel resterend aardgas in het reservoir aanwezig is. Vervolgens is berekend hoe de druk in het reservoir toeneemt bij de injectie van CO₂. De hogere druk in het reservoir kan leiden tot extra gasproductie in een tweede winput in het reservoir. Uiteindelijk zal het CO₂ vanaf de injectieput de winput bereiken. Het zogenaamde doorslaan van CO₂ in de winput (ook aangeduid als breakthrough) leidt er toe dat productie van aardgas moet worden gestopt.

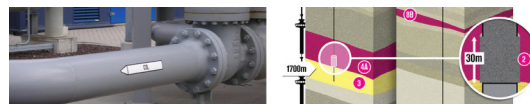
De resultaten [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15] van de berekeningen zijn de volgende:

- Bij Barendrecht treedt na negen maanden doorbraak op van CO₂ in de productieput.
- Voor Barendrecht-Ziedewij is berekend dat binnen drie maanden doorbraak optreedt.

De periode bij de locatie Barendrecht-Ziedewij is relatief kort, maar het is toch wel interessant om de eerste periode van CO₂-injectie door te blijven produceren. Dit is zowel interessant gezien de commerciële waarde van het geproduceerde aardgas, maar tevens om zo de verwachte CO₂-doorbraak bij wijze van leereffect en modelverificatie te confirmeren. Put BRTZ-3 zal ingezet worden om door te produceren. Het CO₂-gehalte in het geproduceerde aardgas zal hiervoor regelmatig worden gemeten. Hierna zal BRTZ-3 gedurende de resterende injectieduur als monitoringsput worden gebruikt, zonder gasproductie.

Lange termijn interactie

Met behulp van de reservoirmodellen is de interactie berekend van CO₂ met de resterende gassen in het reservoir, de vloeibare koolwaterstoffen (condensaat) in het reservoir en de waterlaag onder het reservoir.



De berekeningen geven aan dat op korte termijn het CO₂ het resterende gas en condensaat zal verdringen, vanaf de injectieput richting de randen van het veld.

Op termijn van honderd(en) jaren zal de resterende hoeveelheid aardgas (hoofdzakelijk methaangas (CH₄), wat lichter is dan CO₂) in het reservoir boven komen drijven. Zo ontstaat er dus een laag van methaan met daaronder het CO₂. Dit leidt er toe dat op deze termijn door de dichtheidsstroming het risico dat CO₂ weglekt via de afdekkende laag zal afnemen. Immers, de afdekkende laag heeft bewezen ondoorlatend te zijn voor het bovenliggend methaangas. Ook de blootstelling van cement (de pannenkoekplug) aan CO₂ zal hierdoor verminderd worden.

Het methaan en CO₂ zullen op een termijn van honderdduizenden tot miljoenen jaren uiteindelijk volledig vermengen door diffusie (de diffusie in de poriën van het gesteente is erg langzaam).

5.2.4. Put afsluiten, de pannenkoekplug

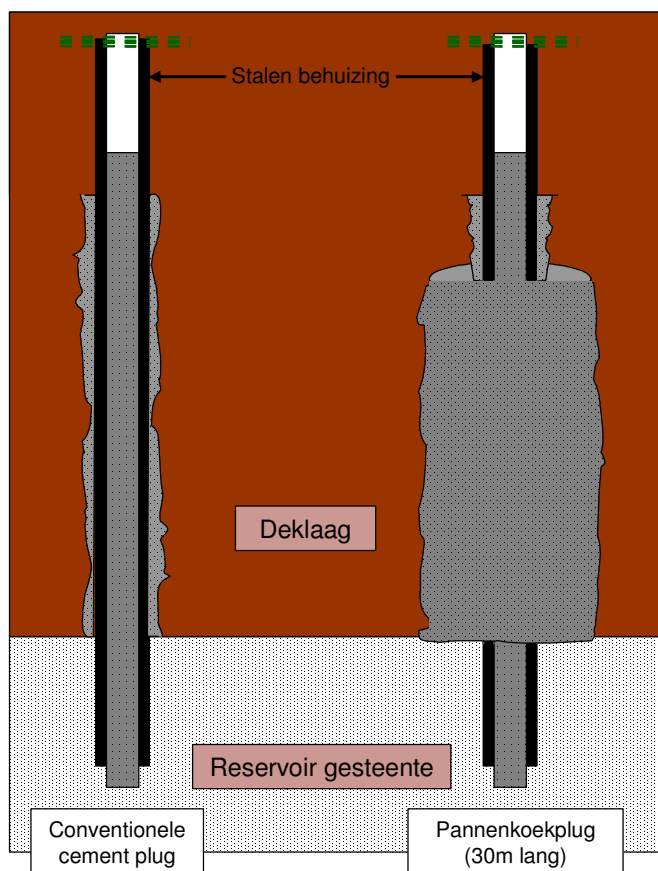
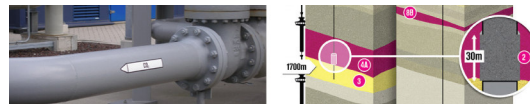
Nadat het reservoir gevuld is met CO₂ zal gedurende een periode van één of meerdere jaren nog monitoring van het gevulde reservoir plaatsvinden. Daarbij wordt bepaald of lekkage uit het reservoir of andere onwenselijke processen optreden. Zodra duidelijk is geworden dat een stabiele eindsituatie is bereikt, kunnen de injectieputten en monitoringsputten worden afgesloten. Het afsluiten van een met CO₂ gevuld reservoir vraagt een andere benadering dan de standaardafsluiting van een leeggeproduceerd gasveld. Voor de afsluiting zal daarom gebruik worden gemaakt van de zogenaamde pannenkoekplug (pancake plug).

Stabiele eindsituatie

Voor de overdracht van het gevulde CO₂-reservoir aan de overheid, zal de initiatiefnemer aantonen dat zich geen ongewenste processen voordoen in het reservoir. Deze situatie wordt aangeduid met de term stabiele eindsituatie. De kenmerken van een stabiele eindsituatie zullen door de overheid en initiatiefnemer samen worden bepaald.

Pannenkoekplug

In de Mijnbouwregeling (Staatscourant, 19 december 200, 245) Afdeling 8.5 voor "Het buiten gebruik stellen van putten en boorgaten" staat: De normale manier van puttenafsluiting is door het plaatsen van enkele 50 of 100 m lange cementpluggen in de put.

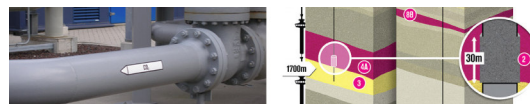


Figuur 5.2 Verschil tussen een gewone plug (links) en een pannenkoekplug (rechts)

Als de cementlaag aan de buitenkant van een put van goede kwaliteit is, volstaat deze werkwijze eveneens voor de afsluiting van CO₂-reservoirs. Dit is momenteel de praktijk wereldwijd. In dit demonstratieproject is gekozen voor een meer uitgebreide afsluiting van de putten, met behulp van een pannenkoekplug [Detailonderzoek ondergrond, referentie 5 en 6].

Bij een pannenkoekplug worden op het niveau van de deklaag de stalen putwand, de cementlaag en een stuk van de afdichtende laag verwijderd. Hierin wordt een dikke schijf nieuw cement geplaatst. Dit heeft als voordeel dat na afsluiting geen contact meer bestaat tussen het CO₂ en het staal van de puttenwand. Dit beperkt het corrosierisico aanzienlijk. Eventuele hele kleine lekpaden aan de buitenkant van de put zijn nu ook definitief afgesloten.

De Shell heeft al ruim 10 jaar ervaring met deze techniek en ook elders in de wereld wordt deze toegepast.



5.3 Scenario Lekkage door afdekkende laag (caprock)

5.3.1. Beschrijving scenario

Lekkage van het opgeslagen CO₂ door de afdekkende laag (ook wel aangeduid als caprock) van het gasreservoir wordt gezien als één van de mogelijke lekkagescenario's. Het scenario beschrijft de situatie waarbij CO₂ het reservoir verlaat door de afdekkende laag. Hierbij worden twee mechanismen onderscheiden.

- Indien bijvoorbeeld een scheur ontstaat in de afdekkende laag en het CO₂ hierdoor in grotere hoeveelheden kan weglekken naar de bovenliggende laag, wordt dit als lekkage aangeduid.
- Indien het CO₂ bijzonder langzaam en over lange tijd door de afdekkende laag migreert naar de bovenliggende laag, bijvoorbeeld door dichtheidsverschillen of lokale (tijdelijke) overdrukken. Dit langzame proces wordt aangeduid met de term sijpelen.

Zowel het lekken als het sijpelen van CO₂ door de afdekkende laag worden in dit risicoscenario onderzocht. In beide gevallen richt het scenario zich op de kwaliteit van de afdekkende laag.

5.3.2. Beschrijving van bedreigingen en consequenties

Bedreigingen

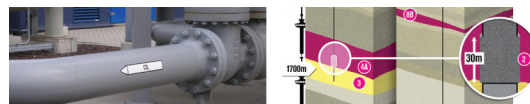
Het is van belang dat de afsluitende kwaliteit van de afdekkende laag niet wordt bedreigd. Zowel voor lekkage als voor het sijpelen geldt dat twee typen bedreigingen een bijdrage zouden kunnen leveren:

- Mechanische bedreigingen.
- Chemische bedreigingen.

Mechanische bedreiging

Bij het winnen van aardgas en vervolgens het injecteren van CO₂ verandert de druk in het reservoir van boven de 100 bar naar ongeveer 25 bar en weer terug naar boven de 100 bar. Deze drukveranderingen kunnen effecten op de afdekkende laag hebben.

Een tweede mechanische bedreiging kan ontstaan, doordat de druk in het reservoir hoger wordt dan de oorspronkelijke druk of de omgevingsdruk. Dit kan optreden wanneer de druk van CO₂ in het reservoir te hoog wordt als gevolg van overvullen van het reservoir. Het is echter ook mogelijk dat er tijdelijk hogere (lokale) drukken ontstaan door te hoge injectiedebieten, inhomogeniteiten of door plotselinge faseveranderingen of dichtheidsveranderingen.



Chemische bedreiging

In plaats van aardgas wordt nu CO₂ opgeslagen. Daarmee is het de vraag of de afdekkende laag ook voor de opslag van CO₂ geschikt is. Door geochemische reacties van het geïnjecteerde CO₂ met mineralen in de deklaag kunnen de eigenschappen van de deklaag worden aangetast, waardoor de kwaliteit en het afsluitend vermogen kunnen verminderen (bijvoorbeeld als er een grotere doorlatendheid ontstaat).

Consequenties

Indien bovengenoemde mechanische en chemische bedreigingen daadwerkelijk optreden, kan dat tot onderstaande consequenties leiden:

De mechanische druk kan leiden tot een situatie waarbij CO₂ in de afsluitende bovenlaag dringt. Het is ook mogelijk dat hierdoor scheuren in de afdekkende laag ontstaan. Indien een scheur door de deklaag zou groeien (wat geen enkel model laat zien omdat een scheur een voorkeur heeft om in het reservoir te groeien), kan het CO₂ in de bovenliggende lagen terecht komen. Daar kunnen twee effecten optreden:

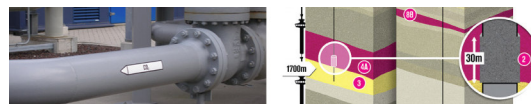
- Vanuit deze lagen migreert het CO₂ via aanwezige lekpaden richting naburige formaties.
- Ook is het mogelijk dat het CO₂ oplost in bovenliggende waterlagen of reageert met bovenliggende formaties.

Chemische reacties kunnen optreden als het CO₂ is opgelost in het aanwezige water. Indien dit opgeloste CO₂ in contact komt met de deklaag, kan het mogelijk leiden tot het omvormen van mineralen in de afdekkende laag. Door het omvormen van mineralen in de deklaag, kan deze op plaatsen iets doorlaatbaar worden. Dit kan ertoe leiden dat CO₂ in de afdekkende laag makkelijker sijpelt, waarna bovenstaande twee effecten kunnen optreden.

5.3.3. Onderzoeken en studies

Beide bedreigingen staan centraal bij het onderzoek in hoeverre het mogelijk is dat CO₂ de afsluitende bovenlaag indringt en migreert naar door bovenliggende lagen. Voor de onderbouwing van dit scenario zijn acht detailstudies uitgevoerd:

- Onderzoek naar beschikbare data gedurende gasproductieperiode (NAM) en toetsing aan de statistische modellen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15].
- Petrografische analyse van beschikbare monsters van de afdekkende laag van het Barendrecht veld, het Barendrecht-Ziedewij veld en analoge velden met dezelfde formaties (Panterra) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 8 en 9].
- Onderzoek naar mogelijke chemische reacties van CO₂ en de afdekkende laag (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 10a en 10b].
- Onderzoek naar mogelijke mechanische reacties van druk op de afdekkende laag (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 7].



- Onderzoek naar scheurvorming door injectie van CO₂ (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 11].
- Lange termijn drukverhoging door menging van methaan en CO₂ (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 18].
- Mogelijke migratieroutes van CO₂, indien dit buiten de reservoirs komt, ongeacht de bestaande barrières en het lekkagedebiet (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 14 en appendix 3].
- Onderzoek naar een realistisch lekkagedebiet/ hoeveelheid (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12 en 13].
- Onderzoek naar het mogelijke oplossen van kalkgesteente en de mogelijke gevolgen ervan. (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 32].

Deze onderzoeken geven inzicht in de initiële integriteit van de afdekkende laag en de veiligheidsfactoren, zoals onderstaand nader toegelicht.

Initiële Integriteit van de afdeklaag

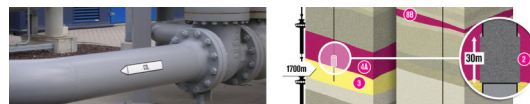
De afdekkende bovenlaag heeft voor zeer lange tijd aangetoond dat hier geen gassen en vloeistoffen door kunnen lekken. Dit blijkt voor de velden bij Barendrecht doordat olie- en gasaccumulaties miljoenen jaren onder de deklaag met extreem lage doorlatendheid (permeabiliteit) ingesloten zijn geweest. De diktes van de afdeklaag zijn voor Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij aanzienlijk: respectievelijk 90 en 430 m dik.

De chemische samenstelling van de afdekkende laag is niet aangetast door de gasproductie. De chemische samenstelling van de afdekkende laag is geanalyseerd door middel van een petrografische studie in 2007 en beschikbare eerder uitgevoerde petrografische studies. De petrografische studie onderzoekt in meer detail de exacte samenstelling van de afdekkende laag.

Mogelijke instroom van water uit onderliggende waterlagen

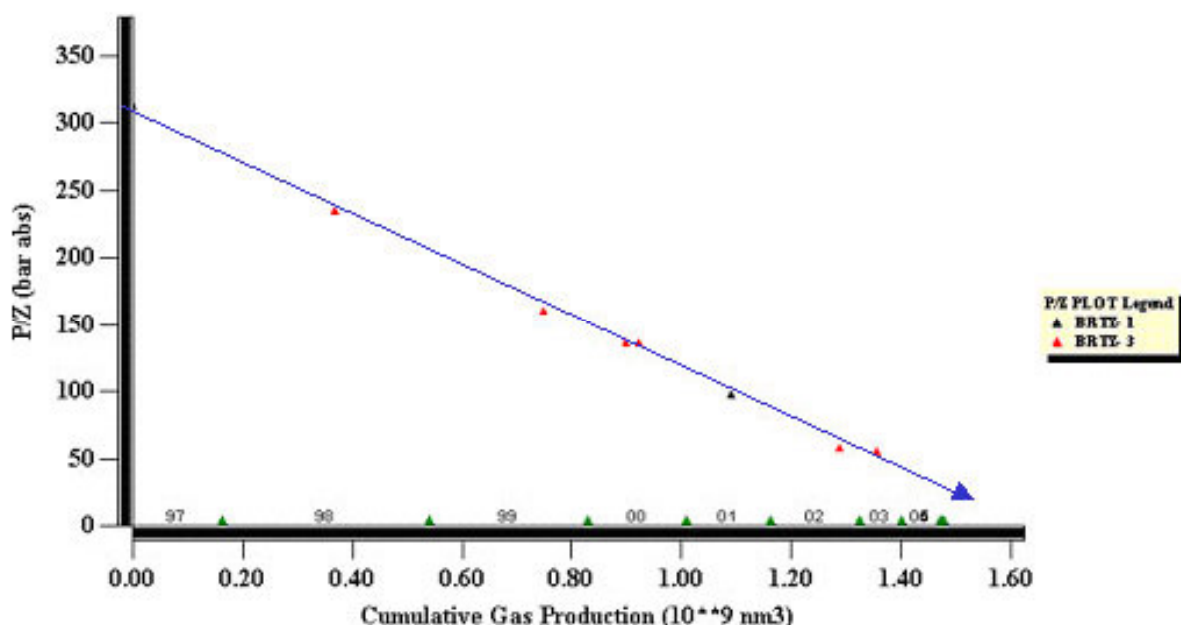
Er is onderzoek uitgevoerd naar de mogelijke interactie van de waterlagen onder beide reservoirs met het reservoir. Bij het winnen van aardgas uit de reservoirs ontstaat een onderdruksituatie in het reservoir. Dit zou er toe kunnen leiden dat water uit dieper gelegen waterlagen (aquifers) in het reservoir stroomt.

Mogelijke instroom van water wordt gezien als iets minder gunstig voor CO₂-opslag, aangezien CO₂ in water kan oplossen en chemische reacties kan aangaan. Hierbij geldt dat het aanwezige water al volledig is verzadigd met CO₂. Instroom van aanvullend water leidt tot een verlaging van de pH-waarde. Dit heeft op korte termijn vrijwel geen effect. Er is alleen in het reservoir wel meer water aanwezig. Dit betekent dat op de lange termijn (> 1000 jaar) de minerale reacties langer doorgaan en er meer omzetting kan plaatsvinden. De porositeitafname zal daardoor groter zijn. TNO geeft aan dat er voor het BRT veld maximaal 8% porositeitafname zal zijn (indien het reservoir voor 100% met water gevuld is), tegen 6% porositeitafname bij de standaardsituatie (voor 20% met water gevuld).



Er zijn analytische materiaalbalansberekeningen en numerieke reservoirsimulatieberekeningen uitgevoerd. Deze zijn gebaseerd op gedetailleerde geologische modellen. Hieruit blijkt dat de waterlaag onder zowel het Barendrecht als het Barendrecht-Ziedewij veld niet actief reageert tijdens het produceren van gas, waardoor geen of nauwelijks aquiferwater het reservoir binnenstroomt en geen drukopbouw tijdens of na het einde van productie plaatsvindt.

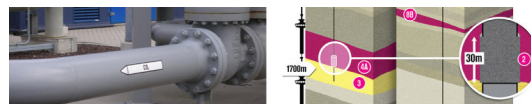
Ook de meetgegevens tonen aan dat er tijdens de productie van zowel BRT als BRTZ geen indicaties zijn voor lekkage. Dit blijkt uit de massabalans en de gemeten gasproductie (zie figuur 5.1). De aquifer onder zowel het Barendrecht veld als het Barendrecht-Ziedewij veld is dus niet gemigreerd tijdens het produceren van gas, waardoor de afdekkende laag niet met aquiferwater in contact is gekomen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15].



Figuur 5.3 Gemeten drukafname in het BRTZ hoofdblok uitgezet tegen het geproduceerde gasvolume. Het rechtlijnig verband duidt op een vrijwel ideaal 'tankgedrag' van het veld en een betrouwbare indicatie van het beschikbare volume [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15].

Irreversibel spanningsverloop

De productie van aardgas uit een gashoudende formatie veroorzaakt in deze formatie een spanningsverloop in het gesteente. Opvulling van het reservoir met CO₂ kan leiden tot een gelijk maar omgekeerd spanningsverloop in het gesteente. Indien dit optreedt, is er sprake van een reversibel spanningsverloop. Het reservoir reageert dan volledig elastisch op de spanningsveranderingen.



Indien het gedrag niet volledig reversibel is, wordt gesproken over een (gedeeltelijk) irreversibel gedrag. In dit geval reageert het reservoir als gevolg van eerdere gasproductie niet volledig elastisch en is het mogelijk dat bij het opvullen van het veld sneller (bij lagere injectiedebieten en drukken) scheuren kunnen ontstaan dan bij volledig reversibele gedrag. Scheuring van het gesteente zal eerst ontstaan, daar waar het CO₂ wordt geïnjecteerd, bij de put in het reservoir. Wanneer deze scheuren door hoge injectiedrukken doorgroeien tot in de afdeklaag, kan de integriteit van de afdeklaag bedreigd worden.

De kans op de aanwezigheid van een irreversibel spanningsverloop bij injectie kan niet volledig worden uitgesloten. Voor het Barendrecht veld is de kans groter dan voor Barendrecht-Ziedewij veld, daar het Barendrecht-Ziedewij veld gesteente sterker is.

Veiligheidsfactoren van de afdekkende laag

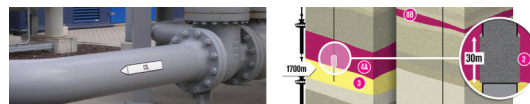
Mechanische integriteit met betrekking tot scheurvorming [Detailonderzoek ondergrond, referentie 11]

De onderzoeken geven voor zowel BRT als BRTZ aan dat, bij de voorziene injectievolumes, drukken en debieten, de kans van scheurvorming in de afdeklaag verwaarloosbaar is. Dit blijkt uit onderstaande bevindingen:

- In het geval van een reversibele spanningsontwikkeling zal de injectiedruk niet boven de sterktelimiet komen (waarna scheuring optreedt).
- In het geval van een gedeeltelijk irreversibele spanning bestaat er een kleine kans op scheurvorming in het reservoir. Een eventuele scheur zal beperkt blijven en zich alleen ontwikkelen binnen het reservoir. De scheuring zal niet optreden in de afdekkende laag door het heersende spanningscontrast met de afdeklaag.
- De kans op scheurvorming in de afdeklaag is verwaarloosbaar, omdat de spanning in de afdeklaag hoger is dan de injectiedruk.
- De kans dat een lokale (tijdelijke) scheur ontstaat in het reservoir is 20% op het moment dat 60-70% van het veld gevuld is met CO₂.
- De kans dat een lokale (tijdelijke) scheur ontstaat in het reservoir is 50% aan het einde van de injectieperiode.
- De kans op scheurvorming in BRTZ is verwaarloosbaar door de hogere spanningen in het gesteente en de grotere kans op een reversibel spanningsverloop.

Mechanische integriteit met maximale reservoirdruk [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15, 16, 18 en 21]

Het oorspronkelijke projectplan gaat ervan uit dat zowel het Barendrecht als het Barendrecht-Ziedewij veld niet verder wordt opgevuld dan de initiële reservoirdruk. Er bevindt zich nog een resthoeveelheid CH₄ in de reservoirs. TNO heeft aangetoond dat het mogelijk is, dat er op de lange termijn (duizenden jaren) zeer geleidelijk een drukverhoging plaatsvindt als gevolg van het ontstane CO₂ en CH₄ mengsel. **Door deze drukverhoging kan de druk in het reservoir tijdelijk hoger worden dan de omgevingsdruk.**



Het risico van een hogere druk in het reservoir ten opzichte van de omgevingsdruk kan worden vermeden, door vooraf rekening te houden met eventuele drukverhogingen. Zo zijn er meer factoren waarmee rekening moet worden gehouden bij het bepalen van de maximale reservoirdruk tijdens de injectiefase. De verwachte drukveranderingen voor BRT en BRTZ na afronding van de CO₂-injectie, worden als volgt ingeschat:

- Geen netto verandering door een gelijkmatige drukverdeling binnen het CO₂-reservoir.
- Een mogelijke drukdaling van 0-5 bar door drukverdeling met de oliezone en een beperkte waterzone, die in verbinding staat met de gaszone (alleen in BRT).
- Er wordt op lange termijn geen of nauwelijks drukopbouw door de waterlaag (aquifer) verwacht. De geschatte onzekerheid is 0 tot circa 1 bar drukverhoging in 200 jaar na einde injectie.
- Er wordt hooguit een minieme drukverhoging van circa 1 bar over een periode van 700 jaren geschat door nog steeds bestaande gasgeneratie in de dieper liggende Limburg formatie.
- Als gevolg van volledige vermenging van het restgas en het CO₂ door diffusie wordt een uiteindelijke drukverhoging van circa 7 bar na honderden duizenden of miljoenen jaren verwacht.

Het verwachte injectievolume is voor het project reeds vastgesteld op 95% van het totaal beschikbaar volume in Barendrecht en 97,5% in Barendrecht-Ziedewij, wat in beide gevallen 8 bar minder dan de initiële druk in het reservoir betekent. Bij een druk van 4 bar minder dan de initiële druk, wordt een CO₂-stroming door een potentiële open verbinding met de eerst bovenliggende aquifer in Barendrecht voorkomen. Dit gaat er vanuit dat er in een open verbinding een volledige CO₂-kolom bestaat, die lichter is dan water. Hier is een additionele veiligheidsmarge van nog een keer 4 bar aan toegevoegd (voor een overzicht van de reservoirdrukken zie tabel 5.4).

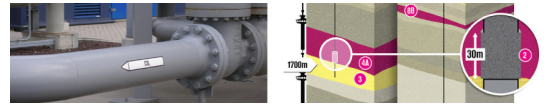
Chemische integriteit

Bij het toevoegen van CO₂ dient onderzocht te worden of er geen chemische reacties ontstaan, waardoor de permeabiliteit van de deklaag afneemt, of de afdeklaag chemisch degradeert.

Chemische verwerking: beschikbaarheid van water [Detailonderzoek ondergrond, referentie 10a, 10b, 23 en 24]

Chemische reacties van CO₂ met mineralen in het reservoir of de afdekkende bovenlaag zijn uitsluitend mogelijk, wanneer het geïnjecteerde CO₂ oplost in water (als bicarbonaat of cabonaationen), volgens onderstaande reactie:





Als gevolg van de toename van de waterstof ion (H^+) concentratie zal de zuurgraad van het water toenemen, zodat het reactiever wordt. BRT en BRTZ worden gekenmerkt door uiterst 'droge' omstandigheden, waarin water zich alleen in gebonden toestand bevindt. Toch zal dit gebonden water tot op zekere hoogte in aanraking komen met het CO₂. Op de plekken in het reservoir waar voldoende gebonden water beschikbaar is, zal chemische verwerking optreden. Het geïnjecteerde CO₂ zelf wordt gekenmerkt als puur en droog en zal dus weinig water bevatten.

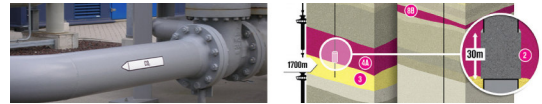
De migratiesnelheid van aanwezig water en de diffusiesnelheid van opgelost CO₂ naar het reactieoppervlak zijn bepalend voor de snelheid van het verweringsproces.

Chemische verwerking: reacties met mineralen

De afdekkende bovenlaag van BRT bestaat uit kleisteen en mergel. De afdekkende bovenlaag van BRTZ bestaat voornamelijk uit kleisteen. Op de lange termijn zorgen geochemische reacties met verschillende mineraalcomponenten in de beide afdekkende bovenlagen voor veranderde eigenschappen van deze laag. Om deze reactie te kunnen laten plaatsvinden is 'zuur' water nodig (H₂O en H₃O⁺). Het zure water is aanwezig op het contactvlak aan de bovenkant van het reservoir tegen de onderkant van de deklaag. Buiten dit contactvlak neemt de beschikbaarheid van zuur water af. Het is daarom te verwachten dat alleen een eerste dunne laag, direct boven het reservoir, aan deze verandering onderhevig zal zijn.

Door TNO is aangetoond dat de afsluitende bovenlaag van BRT en BRTZ minder poreus wordt door mineralen, die neerslaan als gevolg van geochemische reacties met opgelost CO₂. Dit betekent dat de reacties lokaal optreden en dat de verandering uiteindelijk een positieve bijdrage heeft op de ondoorlatendheid van de afdekkende laag.

Het netto effect op de totale afsluitende laag is te verwaarlozen. Scheurvorming zal dus niet optreden. Het risico op sijpelen van CO₂ door de afdekkende bovenlaag in BRT en BRTZ zal dus kleiner worden.



Korte en lange termijn effecten van CO₂ op de mineralen van reservoir en deklaag gesteentes

[Detailonderzoek ondergrond, referentie 10a en 10b]

De door CO₂-injectie veroorzaakte invloed op de mineralen in het reservoir en op de afdichtende deklaag wordt onderstaand beschreven.

Korte termijn

Op korte termijn is de voornaamste invloed dat de zuurgraad (pH) afneemt als gevolg van het oplossen van CO₂ in het aanwezige water. Op de lange termijn wordt dit grotendeels gecompenseerd door minerale reorganisatie; er is een bufferende capaciteit in het reservoir aanwezig. De evenwichtswaarde van de pH ligt uiteindelijk minder dan 1 pH punt vanaf de initiële waarde.

Voor de korte termijn worden er geen andere effecten verwacht behalve deze verandering in pH. Het reservoirgesteente, alsook de deklaag ondergaat als gevolg hiervan geen significante verandering in de periode van injectie.

De enige invloed die de verlaging van de pH-waarde kan hebben, is mogelijke aantasting van de integriteit van de putten (zowel injectie als monitoring) in het reservoir. Beheersing van deze risico's komt elders in dit deelrapport aan bod (paragraaf 5.6).

Lange termijn

Voor de lange termijn zorgen hermineralisaties van het gesteente (minerale reorganisatie) voor een toename van de pH dicht bij de initiële waarde.

Barendrecht veld lange termijn

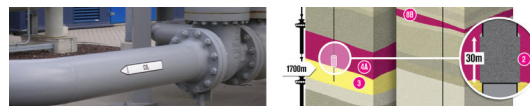
Onderzoek van TNO geeft een porositeitsafname voor het Barendrecht veld aan van maximaal 6%.

Voor de deklaag van het BRT veld betekent de minerale reorganisatie een afname in de porositeit van maximaal 6%. Deze afname in porositeit houdt in dat de toegankelijkheid, ofwel de penetratiediepte, vermindert. De minerale reorganisatie in dit gesteente remt zichzelf dus af.

Barendrecht-Ziedewij veld lange termijn

Voor het gesteente in het BRT-Z veld is ook sprake van een afname in de porositeit. De door TNO berekende afname in porositeit is 3% voor BRT-Z in geval van 100% watervulling, echter in het geval van de 20% watervulling (huidige werkelijkheid) is dit minder dan 1%. De invloed is hier dus kleiner dan in het geval van het reservoir van het BRT veld. Gezien het feit dat minerale reorganisaties langzame processen zijn die op een tijdschaal van > 100 – 1.000 jaar plaatsvinden, zal deze afname in porositeit geen consequenties hebben gedurende de injectiefase.

De deklaag van het BRT-Z veld ondergaat ook een verlaging van de porositeit. Op basis van de chemische reorganisatie zal in de evenwichtssituatie uiteindelijk een porositeit in het gesteente aanwezig zijn die gelijk is aan 0. Dit betekent dat er geen poriën meer aanwezig zijn. Dit zorgt er dus voor dat het gesteente volledig ondoorlaatbaar wordt. In de praktijk houdt dit in dat de eerste (dunne) laag van de deklaag deze verandering zal ondergaan, waarna deze laag de rest van de deklaag ontoegankelijk maakt voor het geïnjecteerde CO₂. Het afsluitend vermogen van deze deklaag wordt dus alleen maar beter als er minerale reorganisatie plaatsvindt onder invloed van CO₂.



Chemische verwerking: uitdroging van afdeklaag [Detailonderzoek ondergrond, referentie 22]

NAM heeft de effecten van een mogelijke uitdroging van het reservoir en de afdeklaag als gevolg van CO₂-injectie onderzocht.

Rond de injectieputten zal het geïnjecteerde droge CO₂ het aanwezige formatiewater opnemen, volgens bovengenoemde chemische reacties. Indien geen watertoevoer in het reservoir optreedt, zal er hierdoor uitdroging van het reservoir ontstaan. Tegen het einde van de injectieperiode zal het reservoirgesteente van het Barendrecht veld in een straal van circa 35 m rondom de injectieput nauwelijks of geen water bevatten. Voor Barendrecht-Ziedewij ontstaat een droog gebied met een straal van circa 85 m rondom de injectieput.

Er zal echter al tijdens de injectie water door capillaire krachten aangezogen worden, wat de uitgedroogde zone rond de injectieput zal verkleinen. Na afloop van de CO₂-injectie zal de wateraanzuiging doorgaan en wordt verwacht dat de oorspronkelijke hoeveelheid van het formatiewater op termijn weer wordt hersteld.

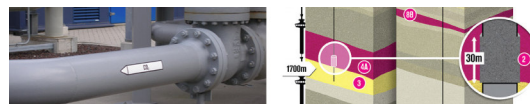
Ook een kleine zone van de deklaag rondom de injectieput wordt gedurende de injectiefase blootgesteld aan droog CO₂. Als gevolg hiervan zal hooguit een zeer dunne zone van enkele centimeters van de deklaag opdrogen. Metingen van CO₂ indringing in de deklaag laten zien dat CO₂-verplaatsing in een deklaag zeer langzaam verloopt [Detailonderzoek ondergrond, referentie 22] en in de buurt van diffusie snelheden ligt (enkele centimeters over tientallen van jaren).

Consequenties van lekkage door afdeklaag

De studies geven aan dat de kans dat CO₂ vanuit het reservoir door de deklaag heen dringt verwaarloosbaar klein is. Aansluitend op deze studies is echter ook onderzocht, wat er gebeurt als CO₂, om welke reden dan ook, toch door de deklaag heen dringt in de bovenliggende waterlaag. Hiervoor is eerst berekend wat de maximale hoeveelheid CO₂-uitstroom zou kunnen zijn. Vervolgens is bekeken, indien er een continue, onwerkelijke grote stroom CO₂ beschikbaar is in de bovenliggende waterlaag, waar het CO₂ naar toe zou migreren.

CO₂-uitstroom berekening [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12 en 13]

De omgevingsdruk neemt toe met de diepte. In de bovenliggende waterlaag zal daardoor van nature een lagere omgevingsdruk heersen, dan in het dieper gelegen reservoir. De initiële druk in het gasreservoir komt overeen met de omgevingsdruk op de diepte van het reservoir. Indien de druk in het reservoir oploopt tot de initiële druk, kan bij een open verbinding via de deklaag CO₂ uitstromen. In dat geval zal in totaal 0,03 miljoen ton CO₂ naar de eerst bovenliggende waterlaag kunnen stromen. Dit is de hoeveelheid CO₂ die de druk in het opslagreservoir weer in balans met de eerst bovenliggende waterlaag brengt. In de waterlaag zal het CO₂ door capillaire krachten vast blijven zitten en uiteindelijk oplossen in de waterlaag. Deze uitstroom berekening moet beschouwd worden als een zogenaamde 'worst case'.



Migratiepad in bovenliggende lagen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 14]

Indien om redenen die niet voorzien zijn toch CO₂ door de afdekkende laag komt, bevindt het CO₂ zich nog niet aan maaiveld. De bovenkant van de afdekkende laag bij de locatie Barendrecht bevindt zich op 1.670 meter beneden maaiveld en voor de locatie Barendrecht-Ziedewij op 2.630 meter beneden maaiveld. Het CO₂ komt gezien de temperatuur en druk in superkritische fase in de bovenliggende lagen.

In Appendix 2 van dit deelrapport is een overzicht opgenomen van de geologische opbouw van West-Nederland. Daarin zijn de verschillende bovenliggende lagen (samen aangeduid als overburden) beschreven.

Er zijn modelberekeningen uitgevoerd naar mogelijke CO₂-migratie door de bovenliggende lagen. Hierbij is tevens gebruik gemaakt van kennis met betrekking tot de mogelijke chemische processen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 31]. Met de onzekerheden die zich hierbij voordoen, is rekening gehouden door steeds met een slechtste situatie (worst case) te rekenen. De berekeningen worden gezien als een zogenaamde "consequentie analyse", waarbij ongeacht de oorzaak of waarschijnlijkheid in beeld wordt gebracht wat de mogelijke gevolgen zouden zijn van een ongewenste gebeurtenis.

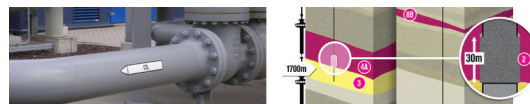
In Appendix 3 worden de bevindingen uitgebreid toegelicht. Bij de berekeningen is uitgegaan van een lekkage van een onwerkelijke een niet gelimiteerde hoeveelheid CO₂. De conclusie is dat het CO₂ dat theoretisch uit het reservoir lekt **niet** in de biosfeer terecht komt, maar in bovenliggende waterlagen oplost of onder andere afdichtende lagen blijft zitten.

5.3.4. Risico-inschatting

De bovengenoemde studies leveren samengevat het volgende beeld op:

- De studies bevestigen de initiële integriteit van de afdeklaag (mechanisch en chemisch) voor zowel Barendrecht als Barendrecht-Ziedewij.
- Bij de injectie van CO₂ blijft een voldoende hoge veiligheidsfactor aanwezig, om de bestaande barrières tegen lekkage in stand te houden.
- Bij een eventuele lekkage zal de verwachte massastroom zeer gering zijn en niet aan de oppervlakte komen.

De waarschijnlijkheid dat CO₂ via de deklaag lekt of wegsijpelt wordt als verwaarloosbaar gezien, zoals aangegeven in de risicomatrix in hoofdstuk 4. Indien dit toch plaatsvindt, zijn de mogelijke consequenties in het geval van een lekkage laag (vanwege de hierbij aangehouden hoeveelheden). In het geval van sijpelen zijn de mogelijke consequenties verwaarloosbaar aangezien de kleine hoeveelheden CO₂ in de direct bovenliggende waterlaag blijven.



Het risico van dit scenario wordt dan op basis hiervan voor zowel lekkage door de deklaag als voor het sijpelen van CO₂ door de deklaag als verwaarloosbaar geclassificeerd. Een verwaarloosbaar risico voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

5.3.5. Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan

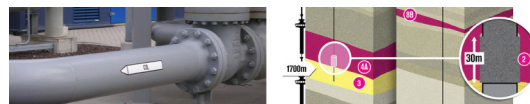
Bovenstaand is aangegeven dat het risico voor lekkage of sijpelen door de deklaag verwaarloosbaar klein is. In het project zijn mitigerende maatregelen opgenomen om dit te borgen en daar waar mogelijk nog aanvullende mitigerende maatregelen om het risico verder te verkleinen.

Alle mitigerende maatregelen die worden toegepast in het project, zijn opgenomen in de onderstaande tabel. De bovenstaand beschreven studies hebben er toe geleid dat in de tabel een aantal aanvullende maatregelen zijn toegevoegd, betreffende:

- de vulgraad blijft 8 bar onder de initiële reservoirdruk (maatregel 3 in de tabel);
- extra drukbeveiligingen worden aangebracht;
- verhoging van de injectietemperatuur tot boven de 36°C om faseveranderingen en de kans op scheuring (fracturing) te verlagen.

Tabel 5.5 Mitigerende maatregelen voor de deklaag

	Mitigerende maatregel	Maatregel/ plan in het project	Betrekking op Bedreiging of consequentie
1	Niet injecteren onder fracturing condities.	Continu monitoren en controleren (process control & safeguarding) van injectiedruk en debiet. Jaarlijks meten van ondergrondse putdruk voor correlatie en calibratie met bovengrondse druk. Regelmatig testen van de injectiviteit.	Bedreiging
2	Injecteren van puur en droog CO ₂ .	Continue meten van samenstelling (zie hoofdstuk 7).	Bedreiging
3	Druk tijdens en na injectie altijd lager dan de initiële reservoirdruk.	Monitor geïnjecteerde volume. Pas veiligheidsmarge van 8 bar toe op uiteindelijke injectiedruk Jaarlijks meten van ondergrondse putdruk.	Bedreiging
4	Lekkagedetectie via deklaag.	Met massabalans bepalen of grote lekkage optreedt. Migratie volgen via seismische metingen in waterlagen (reactief, als er afwijkingen zijn in massabalans). Er zal te allen tijde een seismische baseline meting worden uitgevoerd. Impactzone bepalen en monitoren, bijvoorbeeld CO ₂ -meting in grondwater of atmosferisch.	Consequentie
5	Beperken impact lekkage (in geval van grote lekkage).	Stoppen met injectie. Bepalen waar het CO ₂ naar toe gaat (seismiek) en of dit acceptabel is (zeer waarschijnlijk wel; zie App.3). En zo niet: druk van het veld halen door CO ₂ weer uit het reservoir te halen.	Consequentie



5.3.6. Resterend risico voor lekkage door afdekkende laag

Hoewel de risico-inschatting van paragraaf 5.3.4 resulteert in een verwaarloosbaar risico, zullen de aanvullende maatregelen het uiteindelijke risico nog verder reduceren. Het verwaarloosbaar risico van dit lekkagescenario voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

5.3.7. Sijpelen van CO₂

Het lekkagescenario waarbij lekkage door de deklaag wordt onderzocht, bestaat uit twee onderdelen. Onderzoek is uitgevoerd naar lekkage door de deklaag en het sijpelen van zeer geringe hoeveelheden CO₂ over een zeer lange periode. Bovenstaand is aandacht besteed aan beide mechanismen. De bevindingen voor het sijpelen van CO₂ worden hier nogmaals weergegeven. [Detailonderzoek ondergrond, referentie 16 en 19]

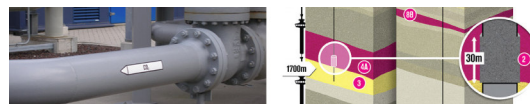
Uit het scenario van lekkage door de afdekkende laag blijkt dat het zeer onwaarschijnlijk is dat CO₂ via deze route zal ontsnappen en zelfs als het ontsnapt zal dit niet naar maaiveld migreren. Als alternatief scenario is gekeken naar de mogelijkheid dat een kleine hoeveelheid gedurende zeer lange tijd het reservoir verlaat (als sijpelen aangeduid). Geleidelijk sijpelen van CO₂ via de afdekkende laag zou kunnen ontstaan als gevolg van overschrijden van capillaire inpersdrukken, bijvoorbeeld door dichtheidsverschillen of lokale overdruk.

De capillaire inpersdruk van CO₂ is lager dan die van aardgas, maar nog steeds hoger dan water. Dit betekent dat CO₂, net als aardgas, een weerstand moet overkomen om in een met water gevulde porie te kunnen komen. Alleen is deze weerstand voor CO₂ iets lager. Gebaseerd op algemene capillaire metingen in deklagen is het echter niet waarschijnlijk dat de capillaire inpersdruk wordt overschreden. Bovendien blijft de druk in de deklaag in het algemeen hoger dan in het opslagreservoir. De druk in de deklaag wordt alleen tijdelijk overschreden in een kleine zone rond de injectieput tegen het einde van de injectiefase. Indien toch sijpelen plaatsvindt, zal het gaan om zeer geringe hoeveelheden en zeer lage snelheden. Voor lekkage is het risico verwaarloosbaar, dus zal dit voor sijpelen eveneens het geval zijn. Er is een verwaarloosbare impact op de bovenliggende lagen en biosfeer.

5.4 Lekkage langs overstromingspunt (spill-point)

5.4.1. Beschrijving scenario

Voor de opslag van CO₂ wordt gebruik gemaakt van het oorspronkelijke gasreservoir. Binnen de begrenzing van dit reservoir is de ondergrondse structuur bewezen gasdicht voor aardgas. Buiten de begrenzing is dit niet bewezen (hoewel zeer waarschijnlijk). Het is daarom van belang ervoor te zorgen dat bij het vullen van het leeggeproduceerde gasveld het CO₂ niet buiten deze begrenzing komt. De begrenzing wordt aangeduid met de term overstromingspunt (in het engels spill-point). Dit lekkagescenario onderzoekt of het mogelijk is dat CO₂ langs het overstromingspunt uit het gasreservoir lekt en wat de gevolgen zijn indien dit gebeurt.



5.4.2. Beschrijving bedreigingen en consequenties

Bedreigingen

Lekkage via een overstromingspunt kan optreden door:

- het overvullen van het veld, dus in het geval teveel CO₂ wordt geïnjecteerd;
- de aanwezigheid in het reservoir van voorkeursstroompaden;
- de oplossing van CO₂ in onderliggende waterlagen (aquifer);
- het ontstaan van drukverhogingen op lange termijn als gevolg van bijvoorbeeld menggedrag.

Overvullen van het veld

Indien teveel CO₂ wordt opgeslagen kan er sprake zijn van het overvullen van het reservoir. In het projectplan wordt hier expliciet rekening mee gehouden, door ervoor te zorgen dat de initiële druk niet wordt overschreden. Door onder de initiële druk te blijven zal er geen sprake zijn van het overvullen van het reservoir.

Voorkeursstroompaden

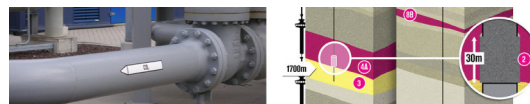
In het AMESCO-rapport [AMESCO, 2007] wordt aangegeven dat naast het hierboven genoemde teveel injecteren van CO₂, een dergelijke lekkage ook kan ontstaan door migratie van opgelost CO₂ binnen het reservoir. Heterogene eigenschappen binnen een reservoir kunnen er toe leiden dat CO₂, dat is opgelost in vloeistoffen in het reservoir, door de opbouwende druk langs het overstromingspunt wordt geperst.

Onderliggende waterlagen

De onderliggende waterlagen voor de Barendrecht velden zijn statisch, hier treedt geen stroming op. Indien CO₂ in deze waterlagen is opgelost, zal het niet verder worden verplaatst. Het CO₂ zal dus extra veilig opgeslagen zijn.

Drukverhoging lange termijn

In de reservoirs bevindt zich nog een resthoeveelheid CH₄. Op de lange termijn zal er een mengsel van CO₂ en CH₄ ontstaan. Zoals blijkt uit de TNO-studies is het mogelijk dat daardoor op de lange termijn een drukverhoging in het reservoir plaatsvindt. Door deze drukverhoging kan de druk in het reservoir hoger worden dan aanvankelijk de bedoeling is geweest, waardoor er een risico op lekkage via het overstromingspunt ontstaat. Dit aspect is eerder beschreven bij het lekkagescenario via de afdekkende laag (paragraaf 5.3.3, 'Mechanische integriteit met maximale reservoirdruk').



Consequenties

Een overstromingslekage in het BRT reservoir leidt tot mogelijke CO₂-migratie naar de Schieland/Delfland groep. CO₂ dat weglekt uit het dieper gelegen BRTZ veld, zal eerst door de kleistenen Altena groep moeten migreren, alvorens in de Schieland/Delfland groep te komen (zie Appendix 3).

De lekkage zal plaatsvinden met zeer langzame snelheden en kleine hoeveelheden. Het is waarschijnlijk dat CO₂ dat weglekt, zal oplossen in de omringende waterlagen. Doordat water met opgelost CO₂ relatief zwaarder is heeft dit CO₂-rijke water de neiging nog dieper te gaan.

Zoals uit bovenstaande blijkt, zal het CO₂ niet in de atmosfeer komen. De mogelijke effecten komen daarmee overeen met de eerder beschreven mogelijke effecten bij lekkage door de afdekkende laag (zie paragraaf 5.3.2). De effecten zijn verwaarloosbaar klein.

5.4.3. Onderzoeken en studies

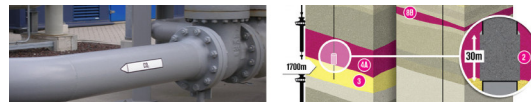
De bedreigingen voor dit scenario staan centraal bij het onderzoek in hoeverre het mogelijk is dat CO₂ via het overstromingspunt migreert naar de andere watervoerende lagen. Voor de onderbouwing van dit scenario zijn detailstudies uitgevoerd:

- Gevoeligheidsanalyse voor voorkeurspaden in het reservoir (modelberekeningen door NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 15 en 17].
- Mate en snelheid van oplossen van CO₂ in waterlagen (aquifers) en reservoirwater (connate water). De studie beschrijft de opslag van CO₂ in een waterlaag. Opslag van CO₂ verandert in de loop van de tijd van capillair gebonden CO₂ langzaam naar opgelost CO₂ in water en gebonden CO₂ door mogelijke chemische omzetting in een carbonaat mineraal, zoals ook in de AMESCO-studie is onderzocht.

Initiële integriteit van het opslagveld

Het gas heeft miljoenen jaren opgesloten gezeten in de reservoirs, tot aan de overstromingspunten, zonder te ontsnappen. Het gas heeft daarbij in contact gestaan met de onderliggende waterlagen. Daarnaast is het gas opgelost geweest in het water, dat zich bevindt in de poriën van het opslagreservoir.

Er wordt een maximale drukverhoging van circa 1 bar over een periode van 700 jaren geschat door nog steeds bestaande gasgeneratie in de dieper liggende Limburg formatie. Dit proces heeft gezorgd voor het ontstaan van de gasreservoirs in dit gebied en is al tientallen miljoen jaren gaande. Het is aardgas dat langzaam vrijkomt onder druk en temperatuur in gesteente met een verhoogd organisch materiaalgehalte. De generatie in dit gebied bedraagt ca. 20 tot 25 m³ gas/jaar per km². De opvulsnelheid is verwaarloosbaar.



Veiligheidsfactoren

Overvullen van het veld

Tijdens de productiefase van het BRT en BRTZ veld zijn de eigenschappen van deze velden gedetailleerd in kaart gebracht, waardoor er een betrouwbare schatting is van de opslagcapaciteit van het reservoir.

De instroom van CO₂ in het reservoir gebeurt vergelijkbaar met de uitstroom van het aardgas. Voor injectie van CO₂ wordt gebruik gemaakt van dezelfde put(ten) als tijdens de gasproductie. Het CO₂ zal zodoende op hetzelfde punt het reservoir binnenstromen als het gas naar buiten is gestroomd. Het BRT veld zal in 3 jaar worden opgevuld, vergelijkbaar met de productieduur van aardgaswinning uit dit reservoir. De CO₂-injectie leidt daarmee tot ongeveer dezelfde stroomsnelheid in het reservoir als de aardgaswinning. Voor het opvullen van Barendrecht-Ziedewij is een periode van 25 jaar voorzien, wat veel langer is dan de gasproductie van het veld.

Bovenstaande zal ertoe bijdragen dat de velden op vergelijkbare plaatsen en met vergelijkbare of lagere snelheid zullen worden opgevuld. Dit verlaagt de kans op overvullen en voorkeursstroming, aangezien er meer tijd is voor goede verdeling van CO₂ in het reservoir.

Aanwezigheid van voorkeursstroompaden met hoge permeabiliteit

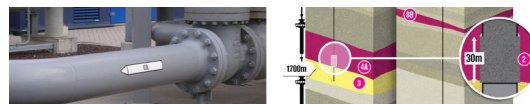
Stromingsmodellen, gekalibreerd op basis van historische gasproductie, laten zien dat preferente stroming via hoog permeabele lagen ver buiten het reservoir uiterst onwaarschijnlijk is, zelfs voor niet realistische hoogpermeabele lagen. Deze hoog permeabele lagen zijn niet op de putregistraties (logs) gezien.

Oplossing in onderliggende waterlagen (aquifer)

Berekeningen hebben aangetoond dat slechts een klein volume CO₂ in het reservoir zal oplossen. Na oplossing zal de vloeistof nauwelijks mobiel zijn.

Drukverhogingen op lange termijn als gevolg van menggedrag

Het risico van een lekkage als gevolg van onvoorziene drukverhoging door menging van CO₂ met methaan is eenvoudig te minimaliseren door rekening te houden met eventuele drukverhogingen bij het bepalen van de maximale reservoirdruk tijdens de injectie fase (zie ook 'Mechanische integriteit met maximale reservoirdruk', onderdeel van 5.3.3).



5.4.4. Risico-inschatting

De bovengenoemde studies leveren samengevat het volgende beeld op:

- De studies bevestigen de initiële integriteit van overstromingspunten voor zowel Barendrecht als Barendrecht-Ziedewij.
- Bij de injectie van CO₂ blijft er ten aanzien van mogelijke overstroming langs de randen van het reservoir een voldoende hoge veiligheidsfactor aanwezig.
- Bij een eventuele lekkage zal de verwachte massastroom zeer gering zijn en niet aan de oppervlakte komen.

De waarschijnlijkheid dat CO₂ via overstromingspunten lekt uit het reservoir wordt als verwaarloosbaar gezien, zoals aangegeven in de risicomatrix in hoofdstuk 4. Indien dit toch plaatsvindt, zijn de mogelijke consequenties in het geval van een lekkage verwaarloosbaar, gezien de kleine hoeveelheden CO₂.

Het risico van dit scenario wordt dan op basis hiervan als verwaarloosbaar geclassificeerd. Een verwaarloosbaar risico voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

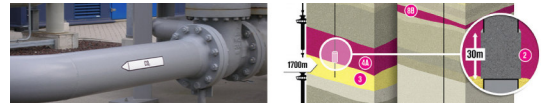
5.4.5. Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan

Bovenstaand is aangegeven dat het risico voor lekkage langs het overstromingspunt verwaarloosbaar klein is. In het project zijn mitigerende maatregelen opgenomen om dit te borgen en daar waar mogelijk nog aanvullende mitigerende maatregelen om het risico verder te verkleinen.

Alle mitigerende maatregelen die worden toegepast in het project, zijn opgenomen in tabel 5.6. De bovenstaand beschreven studies hebben er toe geleid dat in de tabel een aanvullende maatregel is toegevoegd. Dit betreft:

Tabel 5.6 Overzicht mitigerende maatregelen overstromingspunt

	Mitigerende maatregel	Maatregel/ plan in het project	Betrekking op Bedreiging of consequentie
1	Massabalansberekeningen	Jaarlijks meten van ondergrondse putdruk voor correlatie en calibratie met geïnjecteerde volume (massabalans) en modelverificatie. Het geplande injectievolume en simulatiemodel kunnen hierdoor worden aangepast.	Bedreiging
2	Druk tijdens en na injectie altijd lager dan de initiële reservoirdruk.	Monitor geïnjecteerde volume. Pas veiligheidsmarge van 8 bar toe op uiteindelijke injectiedruk Jaarlijks meten van ondergrondse putdruk.	Bedreiging
3	Lekkage detectie en effectbeperking	Zie maatregelen onder punt 4 en 5 van de tabel uit 5.3.5.	Consequentie



5.4.6. Resterende risico voor lekkage via overstromingspunt

De risico-inschatting in paragraaf 5.4.4 heeft aangegeven dat hier sprake is van een verwaarloosbaar risico. Aanvullende maatregelen zijn zinvol om het uiteindelijke risico nog verder te reduceren. Voor het lekkagescenario blijft gelden dat hier sprake is van een verwaarloosbaar risico, dat voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

5.5 Lekkage langs breukzones

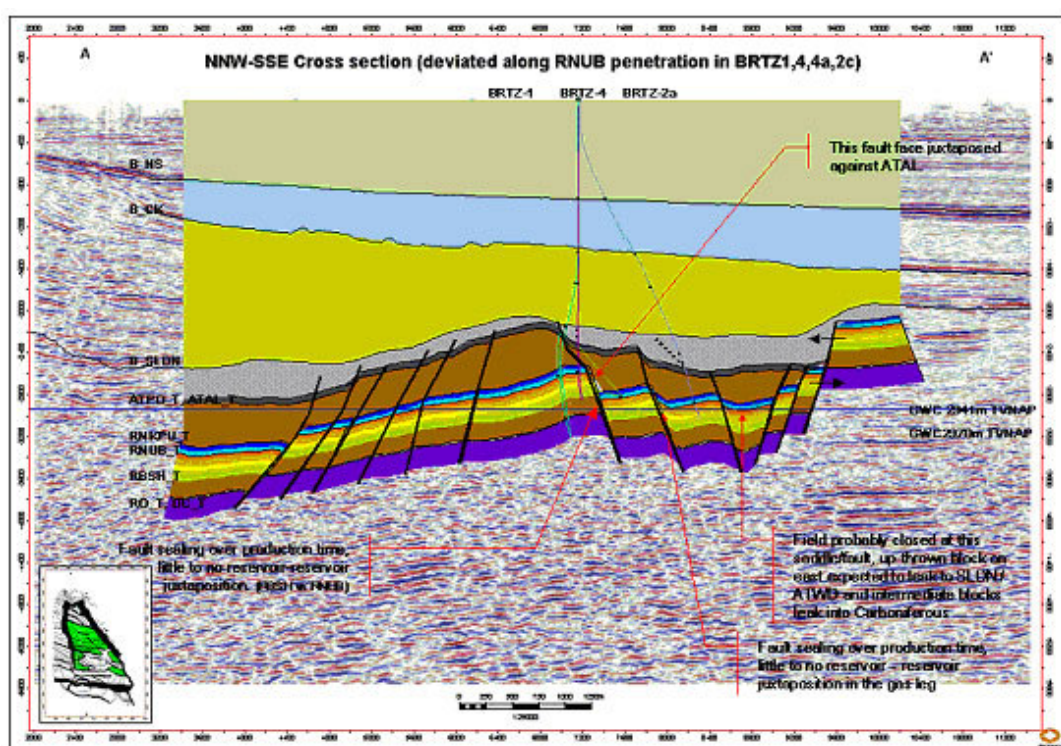
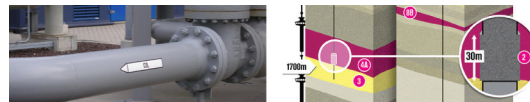
5.5.1. Beschrijving scenario

Voor het opslagreservoir wordt gebruik gemaakt van het oorspronkelijke gasreservoir. In het reservoir bevinden zich van nature breukzones. In sommige gevallen vormen de breukzones de begrenzing van het reservoir zelf. De bestaande breuken in gasvelden hebben er in het verleden niet toe geleid dat het aardgas uit het reservoir is ontsnapt. Daarmee zijn de breuken bewezen gasdicht. Dit lekkagescenario houdt zich bezig met de vraag of de breukzones door de gasproductie beïnvloed zijn en in hoeverre CO₂-injectie de aanwezige breuken zal beïnvloeden. Is het mogelijk dat door gaswinning of door CO₂-injectie de breuken niet meer gasdicht zijn? Indien dit het geval blijkt te zijn, kan lekkage van CO₂ uit het reservoir optreden. Hierdoor kan CO₂ terechtkomen in bovenliggende en naburige formaties.

5.5.2. Beschrijving van bedreigingen en consequenties

Breuken zijn meestal vlakke zones waarlangs de oorspronkelijk doorlopende gelaagdheid is verplaatst of onderbroken. De verplaatsing van de oorspronkelijk doorlopende laag langs een breuk wordt aangeduid met de term 'spronghoogte'. Breuken kunnen optreden als verticale verplaatsingen, maar ook als horizontale verplaatsingen. Veelal is er sprake van zowel een horizontale als verticale component bij een breuk.

De doorlatendheid van breuken in schaliepakketten is meestal laag. Breuken in kalksteenpakketten zijn echter veelal zeer doorlatend voor vloeistoffen of gassen. De doorlatendheid van breuken in zandsteenpakketten hangt af van de spronghoogte en van de aanwezigheid van schalielagen in de buurt van de breuk. In zout komen geen breuken voor omdat zout reeds onder geringe druk langzaam blijft vloeien en onregelmatigheden vanzelf weer worden dichtgedrukt.



Bij het Barendrecht veld is sprake van één breukzone, terwijl bij het Barendrecht-Ziedewij veld meerdere breukzones voorkomen, zoals blijkt uit figuur 5.2. In paragraaf 5.5.3 wordt nader ingegaan op deze breukzones.

Bedreigingen

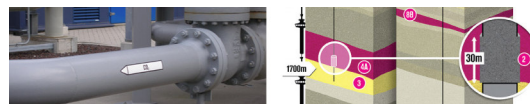
Re-activatie door gasproductie of injectie van CO₂: verplaatsing of deformatie

In het AMESCO rapport staat beschreven dat verplaatsing langs een breuk en de daaropvolgende omzettingen in het verplaatste gesteente kunnen leiden tot een veranderde (een lagere of een hogere) doorlatendheid van de breukzone. Deze verplaatsing kan mogelijk tijdens gasproductie zijn opgetreden of kan optreden tijdens opvullen van het veld met CO₂.

Tijdens de winning van koolwaterstoffen of de injectie van CO₂, kan ook deformatie (vervorming) van het reservoir optreden, waardoor breuken kunnen worden gereactiveerd.

Chemische interacties

De aanwezigheid van neergeslagen carbonaat of calcië in de breukzone kan mogelijk een risico opleveren. Er zouden chemische reacties kunnen optreden tussen carbonaten en water waarin CO₂ is opgelost, waardoor de breuk doorlatend wordt en eventueel lekkagepaden zouden kunnen ontstaan.



Consequenties

De doorlatendheid en de breedte van een breukzone zijn de voornaamste parameters die zowel het CO₂-stroomvolume als de totale uitstroming langs een breukzone bepalen. Indien de doorlatendheid in de breukzone toeneemt, kan het CO₂ langs de breukzones uit het reservoir weglekken en terechtkomen in de bovenliggende lagen. Bij een breukzone vanaf het reservoir tot ondiepe lagen, kan hierdoor een verbinding tussen het reservoir en de ondiepe ondergrond ontstaan.

5.5.3. Onderzoeken en studies

De bedreigingen voor dit scenario staan centraal bij het onderzoek in hoeverre het mogelijk is dat CO₂ via een breukzone migreert naar door bovenliggende lagen. Voor de onderbouwing van dit scenario zijn door TNO en NAM detailstudies uitgevoerd:

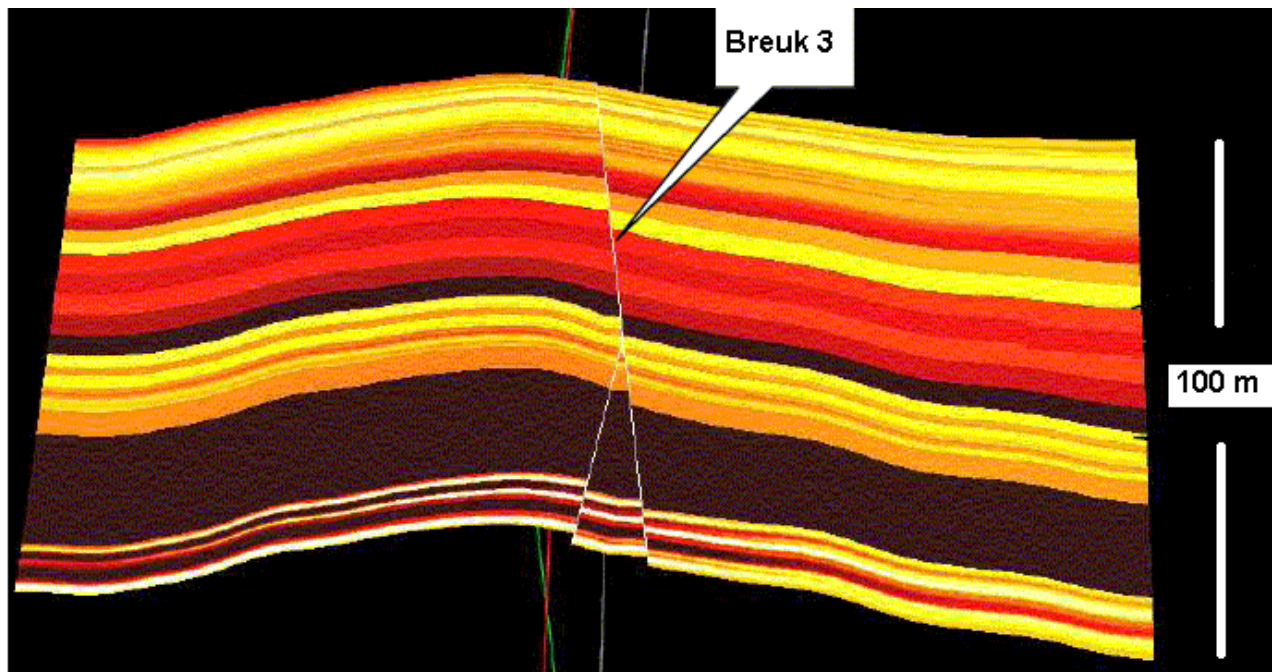
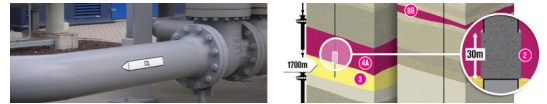
- Karakterisering van de breukzones in Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij (NAM); [Detailonderzoek ondergrond, referentie 2, 3 en 4]. Basis is de beschikbare data, karakterisering (seismiek) en modellen op basis van de afgeronde gasproductie.
- Petrografische analyse van beschikbare monsters van het reservoirgesteente (Panterra) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 8 en 9].
- Onderzoek naar mogelijke chemische reacties van CO₂ en het opslagreservoir (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 10a en 10b].
- Onderzoek naar mogelijke mechanische reacties van druk op de breukzones (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 7].
- Onderzoek naar de integriteit van de breukzones voor het De Lier veld na de volledige cyclus van 'blow-down en re-pressurisation' (als basis voor het BRT veld) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 26].
- Mogelijke migratieroutes van CO₂, indien dit buiten de reservoirs komt, ongeacht de bestaande barrières en het lekkagedebiet (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 14].
- Onderzoek naar een realistisch lekkagedebiet/ hoeveelheid (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12 en 13].

Karakterisering breukzones

De breukzones bij de locaties Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij zijn goed bekend [Detailonderzoek ondergrond, referentie 2, 3 en 4]. Onderstaand worden ze toegelicht.

Breukzones bij Barendrecht

BRT heeft één breukzone vanaf het reservoir (De Lier zandsteenformatie) naar de Holland Greensand groep, zoals onderstaand weergegeven in figuur 5.3. De Holland Greensand groep bevindt zich circa 100 meter boven het CO₂-reservoir, op een diepte van ruim 1.500 meter onder maaiveld. Het opslagreservoir zelf wordt niet begrensd door breuken.

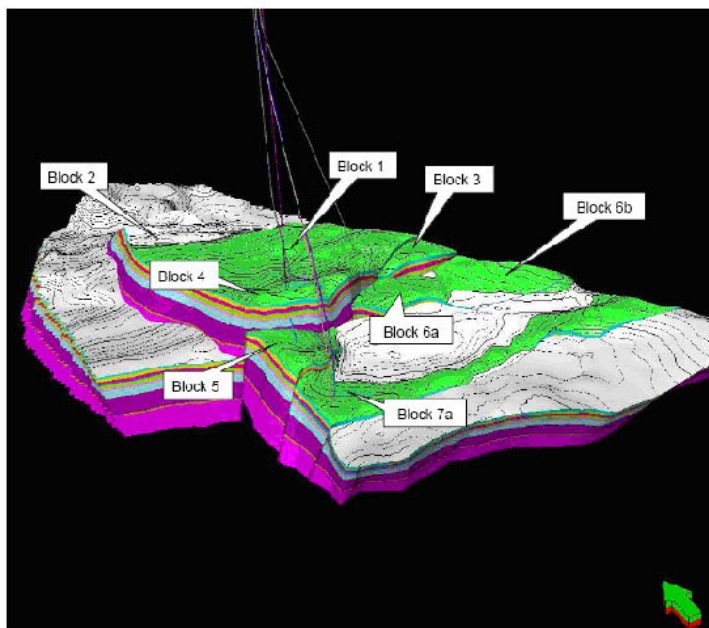
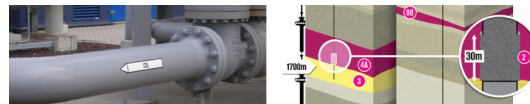


Figuur 5.5 Breukzone in een dwarsdoorsnede (N-Z) van het Barendrecht veld (BRT). Bron: TNO.

Breuken in dit gebied eindigen in de Holland Greensand groep en niet in ondiepe lagen. Daarbij zijn breuken in klei of schalie (deklagen) dicht omdat het materiaal als het ware over de breukzone gesmeerd wordt. Ook in dit gebied is te zien waar de breuken in de deklaag afdichtend zijn.

Breukzones bij Barendrecht-Ziedewij

BRTZ heeft meerdere breukzones, zoals onderstaand is weergegeven in figuur 5.6. Het veld wordt tevens begrensd door een aantal van deze breukzones. Binnen dit reservoir wordt echter één breuk geïdentificeerd waarlangs mogelijk een CO₂-lekkage zou kunnen plaatsvinden. Dit is de Noordoost georiënteerde breuk die de blokken 1-3-4 scheidt van de blokken 5-6a-6b. Eventuele lekkages in de overige breukzones zullen opgevangen worden door de afdekkende bovenlaag van het BRTZ veld.



Figuur 5.6 3D beeld van het NAM rekenmodel van het Barendrecht-Ziedewij veld. (bron: TNO).

Initiële integriteit breukzones

De meetgegevens tijdens de gasproductie wijzen uit dat de breuken in de Barendrecht gasvelden gasdicht zijn.

Afsluitende capaciteit van de breukzones

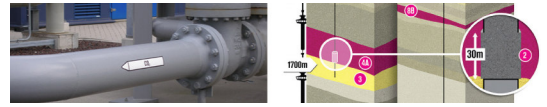
In BRT is een breuk aanwezig die een mogelijke bedreiging vormt voor migratie van CO₂. Uit een gedetailleerde geologische analyse van TNO blijkt echter dat de breukzone afsluitend is.

Een analyse naar de afsluitende capaciteit van de breukzones in BRTZ heeft uitgewezen dat, van de verschillende breuken in BRTZ, er één breuk is die de afdekkende bovenlaag doorkruist tot aan het bovenliggende gesteente (de Schieland Groep). Echter, doordat deze breukzone in schalie van de Altena Groep ligt, zal de permeabiliteit van deze breukzone zeer klein zijn. De rest van de breuken komen niet tot de afdekkende bovenlaag en zijn daardoor afsluitend.

Veiligheidsfactoren ten opzichte van lekkage via breukzones

Geomechanische aspecten bij mogelijke reactivering van breuken

De mechanische integriteit van de breukzones in Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij is onderzocht door TNO. Hierbij is gekeken naar de gehele cyclus van verlaging van de reservoirdruk tijdens de productie van aardgas en olie (blow-down) tot verhoging van de druk tot vrijwel de initiële druk door het injecteren van CO₂ in hetzelfde reservoir (re-pressurisation).



Een analyse van de integriteit van de breukzones in Barendrecht na de volledige cyclus van 'depletie en weer op druk brengen' was niet nodig, omdat hierbij gebruik gemaakt kon worden van een eerdere studie voor het De Lier veld [Detailonderzoek ondergrond, referentie 26]. In deze eerdere studie aan het De Lier veld is geconcludeerd dat na de volledige cyclus van 'depletie en weer op druk brengen' de kans op re-activatie van de breuken laag is. Vanwege significante overeenkomsten met Barendrecht (de beide reservoirs bevinden zich in en om dezelfde geologische structuren) geeft TNO aan dat deze conclusie ook voor Barendrecht geldig is. Het tektonische spanningsregime in een sedimentair bekken als West Nederland is over groter afstanden (tientallen kilometers of meer) vrij constant. Verder gaat het hier om dezelfde formatie (deklaag), welke honderden vierkante kilometers bedekt. De deklaag bestaat onderin uit een vrij zuivere kleisteen, welke naar boven toe iets meer zilt bevat. In het gebied De Lier/Barendrecht toont de samenstelling weinig variatie. Er is wel vastgesteld dat zowel de zuivere kleilaag als ook de meer 'silt' (zeer fijn zand) bevattende klei bovenin bij Barendrecht iets dikker zijn dan in De Lier.

Voor BRTZ gelden de overeenkomsten met het De Lier veld niet en is met behulp van een geomechanisch model (DIANA finite element model) de stabiliteit en integriteit van de breukzones in BRTZ bepaald. Met dit model kan de spanning op het reservoir en de omgeving gesimuleerd en geanalyseerd worden.

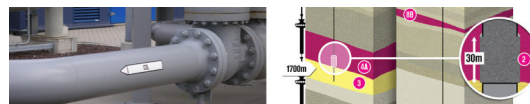
Gedurende de productiefase neemt de schuifspanning toe op de breukvlakken. Modelresultaten geven echter aan dat de toename van deze spanning niet de sterktelimiet overschrijdt, waardoor de breuken waarschijnlijk niet gereactiveerd zijn gedurende de productieperiode. Ook is geconstateerd dat gedurende de productie van BRTZ er geen bevingen zijn waargenomen door de waarnemingsstations (geofoons) van het KNMI. Ook dit vormt een bewijs dat het niet waarschijnlijk is dat de breuken gereactiveerd zijn.

Tijdens de injectiefase gebeurt precies het omgekeerde. Door de opbouwende druk vermindert de schuifspanning op de breukzones totdat de initiële druk situatie weer wordt bereikt. Hierin zijn de spanningeigenschappen van het BRTZ veld weer hetzelfde als voor de aanvang van de gasproductie. Het is dus van essentieel belang dat de druk na injectie niet hoger is dan de initiële druk van voor de extractie van gas en olie uit het reservoir.

Geochemische aspecten bij mogelijk reactivering van breuken

Het is waarschijnlijk dat de mineraalsamenstelling in de breukzones hetzelfde is als het omgevingsgesteente van de breukzone. Hiermee kunnen dan ook dezelfde conclusies worden getrokken voor de gevolgen van chemische verandering op de sterkte en doorlatendheid (permeabiliteit) van het gesteente in de breukzone. De porositeit zal afnemen op de lange termijn waardoor de breukzone minder doorlatend wordt en waarschijnlijk ook sterker.

Tevens wordt ook geen extra compactie in het reservoir verwacht op de lange termijn wat dus niet leidt tot een grotere kans op breukreactivatie.



5.5.4. Risico-inschatting

Studies wijzen uit dat de initiële integriteit goed is, ook na productie. De veiligheidsfactor is zeer hoog omdat gedurende de injectie de spanningssituatie stabiel wordt waardoor de kans op re-activatie kleiner wordt.

De waarschijnlijkheid dat CO₂ via de breukzones lekt uit het reservoir wordt als verwaarloosbaar gezien, zoals aangegeven in de risicomatrix in hoofdstuk 4. Indien dit toch plaatsvindt zijn de mogelijke consequenties in het geval van een lekkage laag (vanwege de directe verbinding met hoger gelegen lagen). Bij een eventueel lek zal de verwachte hoeveelheid CO₂ zeer gering zijn en niet aan de oppervlakte komen.

Het risico van dit scenario wordt als verwaarloosbaar geclassificeerd. Een verwaarloosbaar risico voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

5.5.5. Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan

Hoewel het risico als verwaarloosbaar is geclassificeerd, is bekeken in hoeverre nog aanvullende maatregelen mogelijk zijn om het risico verder te verlagen. Daarbij is vastgesteld dat de seismische nulmeting voorafgaand aan injectie mede kan worden gebruikt om vast te stellen of er in de operationele fase geen breuken ontstaan of geactiveerd zijn.

5.5.6. Resterend risico voor lekkage via breukzones

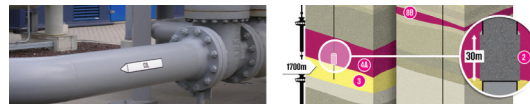
De risico-inschatting van paragraaf 5.5.4 geeft een verwaarloosbaar risico. Met aanvullende maatregelen ten behoeve van risicobeheersing in het project wordt het uiteindelijke risico nog verder gereduceerd. Een verwaarloosbaar risico voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

5.6 Lekkage langs de putwand

Voor de drie voorgaande scenario's is getoond dat lekkage via de deklaag, langs het overstromingspunt en via een breukzone onwaarschijnlijk is. Mochten de lekkages toch optreden dan zijn de consequenties verwaarloosbaar. Dit komt overeen met de verwachtingen in de AMESCO studie [AMESCO, 2007]. Daarin wordt als meest gevoelige route de mogelijke lekkage langs de putwand genoemd. Onderstaand wordt deze lekkageroute nader uitgewerkt in het scenario voor lekkage langs de putwand.

5.6.1. Beschrijving scenario lekkage langs de putwand

De put vormt een kritisch punt, aangezien hier de afdekkende werking van de deklaag is doorbroken. De put vormt daarnaast een rechtstreekse verbinding tussen het reservoir en het maaiveld. Ook na afronding van de opslagperiode blijft de put aanwezig in de diepe ondergrond (volgens de regels wordt de put op 3 meter –mv afgesneden), zodat zowel de put als de directe omgeving van de put als een mogelijk risico voor lekkage kan worden gezien. In het scenario 'lekkage via de putwand' worden de verschillende mogelijke lekpaden bij de putwand in beeld gebracht. Centraal daarbij staat dat het



een ongewenste gebeurtenis is, indien CO₂ via de buitenkant van de put of binnen in de put terecht komt en langs de putwand uit het reservoir weglekt.

5.6.2. Beschrijving van bedreigingen en consequenties

Bedreigingen

De bedreigingen voor lekkage langs de putwand zijn onderzocht voor zowel de toekomstige injectieputten als de overige aanwezige putten. De overige putten zijn mogelijk inzetbaar als monitoringsputten. De bedreigingen zijn in beeld gebracht voor de injectiefase en na afloop van de injectiefase, wanneer op lange termijn de putten zijn verlaten en voorgoed afgesloten. De volgende oorzaken zijn onderzocht:

1. Constructieve eigenschappen

Door bijvoorbeeld slecht vakwerk en materiaalgebruik kan het risico op lekkage vergroot worden.

2. Mechanische verwerking

Normaal gesproken bestaat de put uit staal. Het omhulsel en de afdichting of plug bestaan uit cement. Aantasting van het cement en staal van de put door drukverschillen, temperatuurverschillen die kunnen ontstaan in het reservoir of spanningen als gevolg van het produceren van gas en het opvullen met CO₂, zouden mogelijk tot kwaliteitsvermindering kunnen leiden.

3. Chemische verwerking

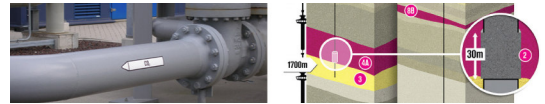
Het belangrijkste aspect van chemische verwerking wordt veroorzaakt door de gecombineerde aanwezigheid van CO₂ en water in een reservoir met hoge druk en temperaturen. Puur CO₂ zal het staal en cement van de put niet aantasten, maar zodra CO₂ oplost in water, leidt dit tot een lagere pH en zure omstandigheden. De ontstane zure oplossing kan invloed hebben op het staal (corrosie) en cement (degradatie) van de put. Dit kan leiden tot lekkage vanuit het opslagreservoir via de put (tussen binnenste en buitenste verbuizing) of langs de cementlaag om de buitenste verbuizing naar de bovenliggende lagen en wellicht naar de atmosfeer.

Het cement kan reageren met CO₂, waardoor degradatie van het cement kan optreden. Calcium Hydroxide, Ca(OH)₂, fungeert als een soort lijm in het cement. Dit wordt in combinatie met CO₂ omgezet in CaCO₃. Door deze omzetting neemt de porositeit van het cement af, aangezien het CaCO₃ meer volume inneemt dan Ca(OH)₂. Met de porositeit zal ook de doorlaatbaarheid (permeabiliteit) van het cement afnemen. Door de chemische reactie wordt de stabiliteit van het cement minder. Dit heeft echter nauwelijks effect. De omgevingsdruk ter plaatse van de cementprop is dermate groot, dat het extra volume van de mineralen leidt tot verdichting van het cement en daarmee juist tot een extra afsluitende werking.

Kader chemische degradatie cement

Cementdegradatie als gevolg van CO₂-injectie gebeurt in twee stappen:

- 1) Degradatie door carbonatie; hierbij wordt het cement minder poreus en sterker maar wel wat



doorlatender. De degradatiesnelheid neemt geleidelijk af. Er is water nodig voor deze stap. Dit mechanisme treedt langzaam op en degradatie wordt verder gelimiteerd door de statische omgeving en de gelimiteerde hoeveelheid aanwezig water. Dit leidt niet tot CO₂-stroming door cementplug.

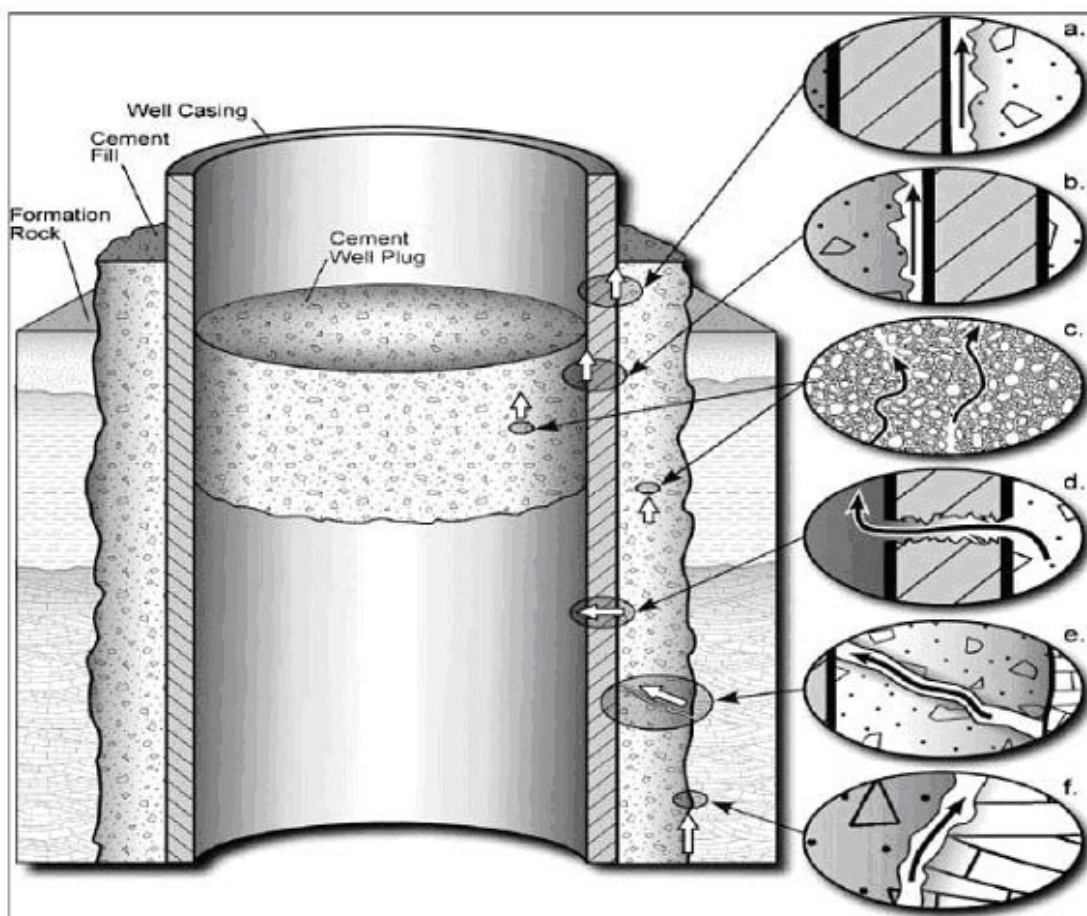
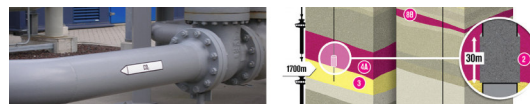
- 2) Degradatie door oplossing; indien er veel vrij water (continue fase) aanwezig is dan kunnen vervolgens de carbonaten oplossen. Hier is echter veel te weinig water voor in gasvelden. Dit water zou door het reservoirgesteente naar het cement moeten bewegen; een dergelijk diffusieproces is erg langzaam. Dit is een traag proces waarbij in het meest conservatieve (theoretische) geval na minimaal 100.000 jaar degradatie of oplossing van een 50 m cementplug optreedt. Daarboven zitten nog een aantal cementpluggen van dezelfde lengte.

Consequenties

Lekkagepaden langs de putwand

In het AMESCO rapport wordt aangegeven dat de genoemde verweringsprocessen mogelijk kunnen leiden tot het ontstaan van verschillende lekkagepaden, waarbij CO₂ weglekt uit het reservoir. Het gaat hier om lekkage van CO₂:

- a. Tussen de buis en het cement waarmee de ruimte tussen de buis en het gesteente van de afsluitende bodemlaag is gevuld.
- b. Tussen de afsluitende cementplug en de buis.
- c. Door het cement van de afsluitende plug als gevolg van degradatie van het cement.
- d. Door de buis als gevolg van corrosie.
- e. Door scheurtjes in het cement waarmee de ruimte tussen de buis en het gesteente van de afsluitende bodemlaag is gevuld.
- f. Tussen het cement en de afsluitende bodemlaag.



Figuur 5.7 Mogelijke lekkageroutes langs een afgesloten put (Bron: AMESCO / Gasda et al., 2004).

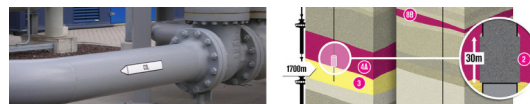
Migratie bij lekkage

Het vrijkomen van CO₂ uit reservoirs kan leiden tot directe ontsnapping via de put naar de atmosfeer of ontsnapping naar de bovenliggende gesteentelagen. De snelheid waarmee het CO₂ naar boven stroomt, hangt af van de snelheid waarmee het CO₂ in de put terechtkomt en van de manier waarop de put is verlaten. Wanneer de put volledig is volgestort met beton, duurt het langer dan wanneer dit niet het geval is.

5.6.3. Onderzoeken en studies

De bedreigingen voor dit scenario staan centraal bij het onderzoek in hoeverre het mogelijk is dat CO₂ via het overstromingspunt migreert naar bovenliggende lagen. Voor de onderbouwing van dit scenario zijn detailstudies uitgevoerd:

- Onderzoek naar huidige putintegriteit (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 5].
- Onderzoek naar mogelijke chemische reacties van CO₂ met aanwezige putonderdelen (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 6 en 24].



- Putintegriteitsstudie (TNO); onderzoek naar verschillende bedreigingen en mitigerende maatregelen. [Detailonderzoek ondergrond, referentie 6].
- Mogelijke migratieroutes van CO₂, indien dit buiten de reservoirs komt, ongeacht de bestaande barrières en het lekkagedebiet (TNO) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 14].
- Onderzoek naar een realistisch lekkagedebiet/ hoeveelheid (NAM) [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12, 13 en 30].

Initiële integriteit van de putten

Het project zal voor zowel de locatie Barendrecht als voor de locatie Barendrecht-Ziedewij gebruik maken van bestaande putten. Gezien de bovenstaande mogelijke bedreigingen is de huidige staat van het materiaal van de putten in BRT en BRTZ van groot belang. Er is een analyse uitgevoerd naar de kwaliteit van het materiaal van de putten in BRT en BRTZ.

Status van de BRT putten

Voor de injectie van CO₂ in het Barendrecht veld is de put BRT-2B geselecteerd. Over het grootste gedeelte van de put is sprake van goed cement. Ten hoogte van de injectiereservoirs in de diepe ondergrond, is het cement van de put echter van gebrekkige kwaliteit.

De put BRT-1 zal volgens planning gebruikt worden voor monitoring. Deze put is van vergelijkbare kwaliteit als de BRT-1 put. Dat betekent grotendeels van goede kwaliteit, maar ter hoogte van het reservoir is de kwaliteit gebrekkig.

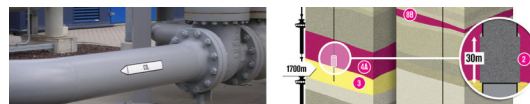
Overige putten die destijds zijn geboord zijn de putten BRT-2 en BRT-2A, waarvan alleen BRT-2A het geplande CO₂-opslagreservoirs doorboort. Beide putten zijn nooit in gebruik genomen en zijn verlaten met cement van goede kwaliteit.

Status van de BRTZ putten

De putten BRTZ-1 en BRTZ-3 zijn beoogd voor respectievelijk CO₂-injectie en monitoring in het Barendrecht-Ziedewij veld. De kwaliteit van het cement van deze putten is goed over de gehele diepte van de putten.

Het Barendrecht-Ziedewij veld wordt daarnaast doorboord door de putten BRTZ-4 en BRTZ-4A. BRTZ-4 is verlaten en BRTZ-4A loopt door naar een dieper gelegen gasreservoir. Het cement van deze putten is van goede kwaliteit. Het is de bedoeling dat put BRTZ-4 voorafgaand aan de CO₂-injectie wordt geperforeerd in het CO₂-opslagreservoir om zo de gasproductie te maximaliseren. Tijdens de CO₂-injectieperiode zal deze put dan samen met BRTZ-3 als monitoring van CO₂-opslag worden gebruikt.

In de omgeving van het Barendrecht-Ziedewij veld bevinden zich de putten BRTZ-2, -2A, -2B en -2C. Van deze putten staat BRTZ-2C in verbinding met een deel van het Barendrecht-Ziedewij veld dat niet



voor CO₂-injectie in aanmerking komt. Het beoogde injectiereservoir wordt niet doorboord. Het cement van deze putten is van goede kwaliteit.

Veiligheidsfactoren

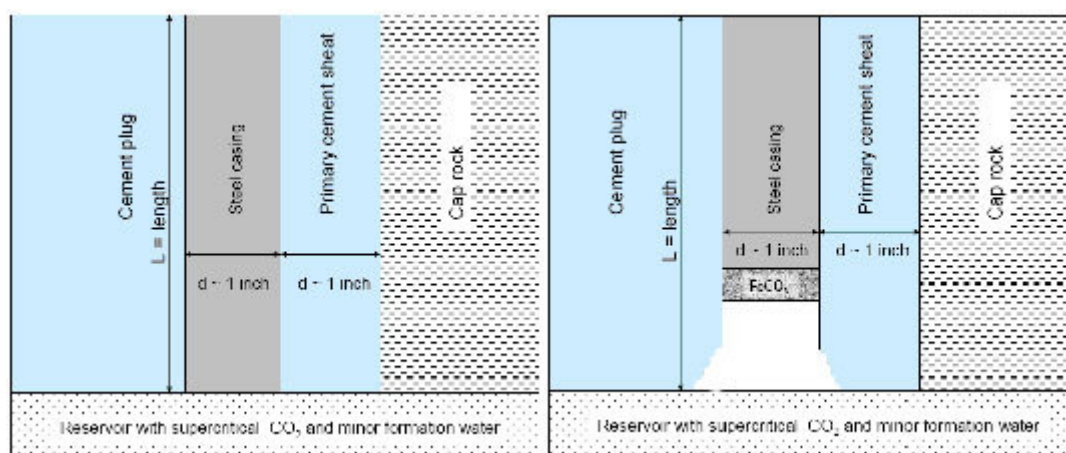
De chemische en mechanische verwerking van het staal en cement in de put bepalen de veiligheidsfactoren. De chemische verwerking is gerelateerd aan de hoeveelheid aanwezig water.

Chemische verwerking: beschikbaarheid van water

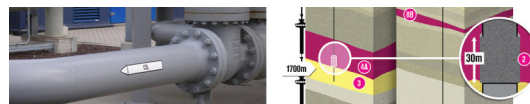
Chemische reacties aan de stalen behuizing of de primaire cementkoker van de put zijn uitsluitend mogelijk wanneer het geïnjecteerde CO₂ oplost in water. BRT en BRTZ worden gekenmerkt door uiterst 'droge' omstandigheden, waarin water zich alleen in gebonden toestand bevindt. Toch zal dit gebonden water tot op zekere hoogte in staat zijn CO₂ te bevochtigen, waardoor alleen op de plekken waar genoeg gebonden water beschikbaar is, chemische verwerking zal optreden. Daarnaast wordt de geïnjecteerde CO₂ gekenmerkt als puur en droog, en zal dus weinig water bevatten. Over het algemeen zal de migratiesnelheid van aanwezig water naar het reactieoppervlak de snelheidsbepalende stap in het verweringsproces zijn.

Chemische verwerking: degradatie van cement

De degradatiesnelheid van het cement wordt door structurele eigenschappen van het cement bepaald en niet per sé door de chemische reactiesnelheid. Met andere woorden: de diffusiesnelheid van CO₂ in de poriën van het cement is de remmende factor. Laboratoriumonderzoeken die uitgaan van relatief extreem hoge drukken en temperaturen laten zien dat er maximaal 12,5 m cement afgebroken kan worden in 10.000 jaar. De omstandigheden, waarin deze afbraaksnelheden worden gehaald, zijn niet te vergelijken met de omstandigheden in BRT en BRTZ, waardoor het zeer aannemelijk is dat de degradatiesnelheden in BRT en BRTZ vele malen lager zijn. De pH van de omgeving van het cement is dus niet van invloed op de snelheid waarmee de CO₂-oplossing het cement afbreekt. Ook al zou de zure CO₂-oplossing de gehele put in het reservoir doen verwerken, dan zouden de tientallen meters dikke cementpluggen een barrière veroorzaken en ervoor zorgen dat er zeker geen sprak is van lekkage.



Figuur 5.8 Chemische verwerking in cementpluggen



TNO concludeert dat verwerking van pluggen een te langzaam proces is om een reëel risico te vormen, behalve als er al breuken of scheuren in het cement aanwezig zijn. Als er scheurtjes of andere onvolkomenheden in het cement aanwezig zijn, zal dit de diffusiesnelheid sterk verhogen (de scheurtjes zullen in de loop der tijd steeds groter worden door chemische degradatie). Hieruit blijkt dat de kwaliteit van het cement in en om de put en van de plug uiterst belangrijk is. TNO benadrukt het belang van een goede afsluiting van de put wanneer deze verlaten wordt en geeft een aantal adviezen:

- Bij het permanent verlaten van putten in CO₂-opslagprojecten dient een pannenkoekplug geplaatst te worden.
- Dit is niet meer mogelijk voor put BRT-2A, die reeds is afgesloten conform de conventionele richtlijnen. De kwaliteit van het cement (met name het cement aan de buitenkant van de putwand) is van voldoende hoge kwaliteit. Er is een statische omgeving rondom het cement aanwezig, aangezien er geen stroming van CO₂ en water wordt voorzien. De afgesloten status van BRT-2A blijft ongewijzigd.

Tijdens de injectiefase zijn de injectieput en de monitoringsputten niet afgesloten, wat extra risico met zich mee kan brengen. Door regelmatig de kwaliteit van de cementlaag achter de putbuis te monitoren ("cementbond log") en door regelmatig te meten of er CO₂-lekkage achter de putbuis plaatsvindt ("belletjes meter"), kan dit risico geminimaliseerd worden.

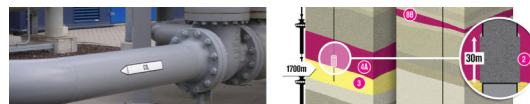
Chemische verwerking: corrosie van stalen behuizing

Uit literatuurstudie door TNO blijkt dat de druk en temperatuur in BRT in theorie een corrosiesnelheid van 1,8 – 3,2 mm/jaar kunnen veroorzaken. Voor BRTZ zijn geen bruikbare schattingen gevonden. Hoewel corrosie van de behuizing van de put zeker een rol speelt in BRT en BRTZ, zorgen de unieke eigenschappen (beschikbaarheid van water, zuurgraad, druk, temperatuur en zoutgehalte) van deze reservoirs ervoor dat de corrosiesnelheid afgeremd wordt.

In tegenstelling tot de chemische verwerking van cement, is de pH van de directe omgeving van de put een bepalende factor in de corrosiesnelheid van de stalen behuizing. In het AMESCO rapport wordt beschreven dat onder bepaalde omstandigheden (pH>5 en een minimale temperatuur 60 °C) een FeCO₃-laag wordt gevormd, hetgeen als beschermlaagje fungeert en de corrosiesnelheid aanzienlijk vermindert. Qua pH verschillen BRT en BRTZ van elkaar, waardoor de effecten als gevolg van corrosie ook verschillend zullen zijn.

In BRT is de corrosiesnelheid vooral direct na de injectie hoog, als de pH nog de minimale waarde van 3 heeft. Naarmate de tijd vordert, zorgen verschillende mineraalreacties met CO₂ ervoor dat de pH langzaam richting een evenwicht van 5,3 gaat. Op de langere termijn zal in BRT dus de vorming van FeCO₃ plaatsvinden, wat als corrosieremmende beschermlaag neerslaat op het reactieoppervlak.

Het BTRZ lijkt echter te zuur te zijn (pH van 4,4) om de vorming van een FeCO₃ beschermlaag mogelijk te maken. De temperaturen in beide reservoirs zijn > 60 °C. Het hoge zoutgehalte in BRTZ vormt een andere karakteristieke eigenschap. Laboratoriumstudies hebben namelijk aangetoond dat



een extreem zout milieu (zoals in BRTZ) ook een remmende werking heeft op de corrosiesnelheid van staal. Ondanks het niet vormen van een FeCO₃ beschermlaag in BRTZ, zorgt het relatief hoge zoutgehalte toch voor een regulerende werking op corrosiesnelheid.

Door de geringe ruimte die kan ontstaan door chemische verwerking zal een eventuele lekkage gekenmerkt worden door kleine hoeveelheden weglekkend CO₂ over een tijdschaal van tientallen tot honderden jaren.

Parallel aan de degradatie van cement, geldt hier ook dat de corrosie van de behuizing in het reservoir niet de primaire zorg heeft. De hoofdzorg is, zowel tijdens de injectieperiode als voor de lange termijn, de integriteit van de plug, die verticale migratie van corrosie en degradatie voorkomt.

Tijdens injectie wordt droog CO₂ geïnjecteerd in de injectieput. Hierbij is geen water aanwezig, zodat er geen corrosief milieu heerst. De monitoringsput wordt na testproductie gevuld met stikstof. Voor alle putten geldt een monitoringsprogramma om de integriteit te toetsen.

Mechanische verwerking [Detailonderzoek ondergrond, referentie 6]

Door (de)-compactie kunnen zowel horizontale als verticale scheurtjes in het cement ontstaan, maar dan alleen in de reservoirsectie en niet op andere (ondiepere) locaties.

Het potentieel voor vervorming van de behuizing als gevolg van mechanische verwerking is door TNO als erg laag bevonden in beide reservoirs, omdat de compactie rekken kleiner zijn dan de kritische sterkte rekken van staal en cement.

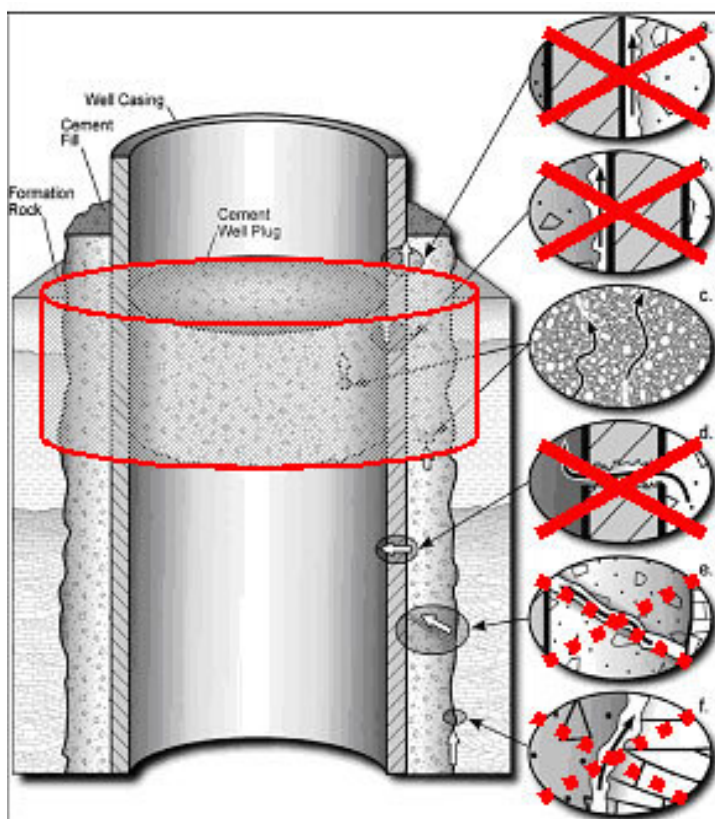
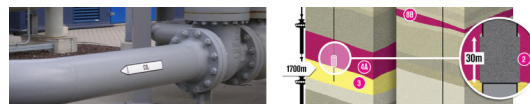
Schade aan de putten door spanningsveranderingen [Detailonderzoek ondergrond, referentie 6]

Door (de)-compactie kunnen spanningen in en rondom het reservoir veranderen. TNO heeft deze spanningsverandering berekend middels eindige-elementen-berekeningen. Op basis van deze berekeningen wordt geconcludeerd dat de spanningsveranderingen te gering zijn om mechanische schade aan het cement en/of verbuizingen te veroorzaken.

Pannenkoekplug / pancake plug

Het plaatsen van een 30 m pannenkoekplug zal het risico van chemische en mechanische verwerking, met als mogelijk gevolg de genoemde lekkagepaden, nog verder verlagen. Het enige overgebleven lekmechanisme is categorie c, zoals weergegeven in figuur 5.9 (de verhouding van diameter put en lengte van de plug is illustratief). De afmetingen van de plug en de hierboven liggende reeds aanwezige pluggen, gecombineerd met de zeer lage en tot nul reducerende degradatiesnelheid (zoals blijkt uit het studiewerk), zal het risico op dit lekmechanisme verwaarloosbaar maken.

Pancake plug scenario



Figuur 5.9 Plaatsing pannenkoekplug en de mogelijke lekkageroutes. De figuur is niet op schaal. De verticale lengte van de plug bedraagt circa 30 meter, de diameter van de buis is circa 15 cm.

Consequenties

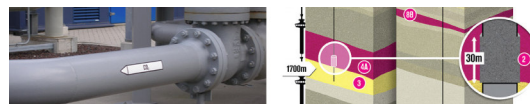
Berekening mogelijke lekstroom [Detailonderzoek ondergrond, referentie 12]

Er zijn modelberekeningen uitgevoerd naar de mogelijk maximale CO₂-stroom langs een putwand. Indien langs de buitenkant van de put een lekstroom ontstaat, kan dat in de orde grootte van 1 m³ per jaar zijn en onder de meest extreme omstandigheden is 60 m³ per jaar denkbaar. In de modellen die zijn gebruikt in de onderzoeken, is gerekend met maximale waarden, tot 2.300 m³ per jaar. Het volume per jaar is beperkt omdat de stromingsweerstand (frictie) in scheuren van cement hoog is. Een dergelijke maximale lekkage met een CO₂-debiet van 2.300 m³ per jaar komt overeen met de CO₂-productie van een Toyota Prius, welke 45.000 km per jaar rijdt, of de CO₂-uitstoot door het verkeer op een redelijk drukke weg. Dit mogelijke lekkagescenario is alleen tijdelijk van toepassing, tijdens de operationele fase van CO₂-injectie. Na het einde van injectie wordt een pannenkoekplug geplaatst.

Secundaire CO₂-ophoping [Detailonderzoek ondergrond, referentie 27]

Secundaire CO₂-ophoping kan optreden als CO₂ langs de put zou lekken tot een relatief ondiepe barrière en hier vervolgens lateraal migreert. In de loop van de tijd zou CO₂ onder bijvoorbeeld een andere afdekkende laag of een ondiepe dikke kleilaag kunnen accumuleren. Bij het plaatsen van een boring of andere ondergrondse werkzaamheden zou men plotseling op een dergelijke CO₂-ophoping kunnen stuiten.

Uit de berekende lekstromen blijkt dat geen secundaire CO₂-ophoping wordt verwacht. Indien er een CO₂-lekkage zou optreden, gaat het om erg beperkte hoeveelheden en dit zal oplossen in waterlagen. Er is daardoor geen mechanisme



denkbaar waardoor een CO₂-ophoping ontstaat, laat staan een volume met veel CO₂ en onder hoge druk.

Toch is bekeken wat de gevolgen zijn mocht bij een boring in de omgeving van de injectielocaties door een boorploeg een CO₂-ophoping buiten het gebruikte reservoir worden aangetroffen. Hierbij is onderscheid gemaakt naar een diepe boring, in het kader van bijvoorbeeld aardwarmtewinning, en een wat ondiepere boring in het kader van bijvoorbeeld grondwaterwinning.

Een CO₂-ophoping in de diepe ondergrond heeft bij een boring vergelijkbare gevolgen als een aanwezig gasvolume. Een boorploeg zal bedacht moeten zijn op het aantreffen van gasachtige volumes en daar met de werkwijze rekening mee moeten houden. Indien een dergelijke laag wordt aangeboord geeft dit een reactie in de boorinstallatie (bekend als "kick"), waarna volgens standaardprocedures de boring moet worden ingesloten. Indien dit niet gebeurt, bestaat het risico van een blow-out. Een blow-out van een CO₂-volume leidt niet tot significante risico's voor de omgeving, zoals uit het onderzoek naar externe veiligheid al is gebleken (zie deelrapport 2, hoofdstuk 11). Dit betekent dat boorploegen die in de omgeving van het CO₂-reservoir diepe boringen plaatsen, zich kunnen beperken tot de reguliere veiligheidsaspecten met betrekking tot het aanboren van mogelijke gasvolumes.

Als tweede optie wordt gekeken naar de situatie waarbij in de omgeving van de beide winlocaties een ondiepere boring wordt geplaatst, bijvoorbeeld voor de winning van grondwater, waarbij CO₂ wordt aangeboord. Ondiep onder kleilagen zal het CO₂ opgelost zijn in de waterlaag, zodat hierin CO₂ opgelost water zal worden onttrokken. Dit levert geen risico op voor de boorfirma of de omgeving. Indien zich grote hoeveelheden CO₂ onder de kleilaag bevinden, in gasvorm, zal deze vrijkomen bij de boring en in de atmosfeer terecht komen. Het vrijkomen van gas bij een boring vindt wel vaker plaats, zoals bij ondiepe aardgasaccumulaties. Voor een boorploeg is het direct merkbaar dat er een gas vrij komt en men kan zorgen dat de put wordt afgesloten of het gas geleidelijk vrij gelaten in de atmosfeer.

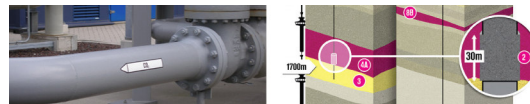
Op langere termijn lost een deel van het CO₂ ook op of wordt in een mineraal omgezet, waarbij mogelijk een secundaire CO₂-ophoping kan plaatsvinden.

5.6.4. Risico-inschatting

De bovengenoemde studies leveren samengevat het volgende beeld op:

- De putten zijn veilig, indien vooral bij Barendrecht de genoemde stappen worden ondernomen. Verder kan in veel gevallen op eenvoudige wijze de hoogte van risico's ingeperkt worden.
- Indien de putten goed zijn afgesloten, vormen chemische en mechanische verwerking van het cement en staal van de put geen risico op de integriteit van de putten.
- Hoewel de corrosiesnelheid in een waterrijke omgeving hoog kan zijn, zullen de relatief droge omstandigheden in BRT en BRTZ ervoor zorgen dat de corrosiesnelheid geremd wordt.
- Risico's op lekkage van CO₂ via de put kunnen sterk ingeperkt worden door een goede voorbereiding en een voorzichtige werkwijze tijdens de injectiefase en het afsluiten van de putten.

Voor de locatie Barendrecht geldt dat een eerste risico-inschatting van de beide te gebruiken putten aangeeft dat de waarschijnlijkheid van een lekkage laag is en de consequenties als medium worden ingeschat. De minder goede huidige staat van het cement rondom de put ter plaatse van het reservoir veroorzaakt deze classificatie. Dit leidt tot een laag risico, zoals aangegeven in de risicomatrix in hoofdstuk 4. In paragraaf 5.6.5 wordt beschreven welke maatregelen er genomen worden om er voor te zorgen dat het risico verlaagd kan worden tot een verwaarloosbaar risico.



Voor de locatie Barendrecht-Ziedewij geldt dat de waarschijnlijkheid van een lekkage als verwaarloosbaar wordt gezien. Indien dit toch plaatsvindt zijn de mogelijke consequenties in het geval van een lekkage laag (vanwege de hierbij aangehouden hoeveelheden). Het risico van dit scenario wordt voor de locatie Barendrecht-Ziedewij als verwaarloosbaar geclassificeerd. Een verwaarloosbaar risico voldoet aan de gestelde acceptatiecriteria.

5.6.5. Mitigerende maatregelen voor lekkage langs de putwand

Bovenstaand heeft geleid tot de volgende aanvullende beheersmaatregelen bij de aanwezige putten:

- de afdichting van de put, zowel tijdens de injectie als op lange termijn;
- onderzoek via monitoring naar mogelijke chemische reacties nabij de put, zowel tijdens de injectie als op lange termijn.

De beheersmaatregelen moeten er voor zorgen dat mogelijke risico's niet zullen optreden. De volgende aanpassingen zijn opgenomen in het ontwerp.

Afdichting van de putten

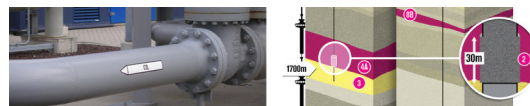
De beheersmaatregelen bestaan er uit dat de put in goede staat blijft (de integriteit van de put moet goed zijn) en dat alle mogelijkheden voor corrosie zoveel mogelijk worden voorkomen.

- **Injectieperiode:** Bij de putten op de locatie Barendrecht vindt hercompletering van injectieput BRT-2 voorafgaand aan injectie plaats. Mogelijk wordt als gevolg van een gedetailleerde integriteitstudie van BRT-1 besloten tot abandonnering voor aanvang injectie.
- **Lange termijn:** Alle putten worden afgesloten met een zogenaamde pannenkoekplug. Deze plug elimineert vrijwel alle relevante lekmechanismen die voor het puts scenario zijn geïdentificeerd, en biedt chemische verwerking tegen de mogelijke degradatiereacties. Risico op lekkage door het cement van deze plug op lange termijn is onwaarschijnlijk en verwaarloosbaar. Eén van de putten in zowel het Barendrecht-veld als het Barendrecht-Ziedewij-veld zal na installatie van de plug niet verder worden afgesloten om de integriteit van de plug gedurende een periode te monitoren. Hierna wordt de put volledig afgesloten.

Monitoring in en nabij de putten

De originele integriteit van de putten is bekend uit de operationele fase en van putconstructiegegevens. Verder is er een uitgebreid monitoringsplan opgezet om de conditie van de putten met hoge frequentie (veel hoger dan normaal bij gasproductie of -injectie) te monitoren. Voor dit demonstratieproject wordt uitgegaan van een intensief meetprogramma, om inzichtelijk te maken dat het CO₂ permanent blijft opgeslagen. Het aantonen van integriteit door middel van metingen is van belang voor het beheersen van de risico's en voor de emissiecredits.

Het monitoren van de putintegriteit voor, tijdens en na injectie vindt plaats door middel van meting van annulaire drukken, het meten met verschillende soorten ondergrondse meetinstrumenten in de put



(meten van integriteit van de verbuizingen en cementlaag en akoestische lekmeting). Indien onacceptabele putintegriteit wordt geobserveerd kan er tot een hercompletering of zelfs tot vroegtijdig verlaten worden overgegaan. Ook wordt er een ondergronds meetinstrument in de putten toegepast om de CO₂-concentratie rondom de put te meten.

Monitoring is er op gericht de verandering in CO₂-concentratie voor en na injectie in de bovenliggende reservoirlaag (Greensand) te kunnen meten. Dit is bepalend voor mogelijke lekkage vanuit de De Lier opslag reservoir naar de Greensand. Tevens worden voor en tijdens de injectie periodiek gasmonsters genomen (met name in de eerste jaar/jaren redelijke frequent). Dit gebeurt door een korte productietest van de monitoringsput(ten) uit te voeren, waarna monsters worden genomen. Hiermee wordt bekeken hoe de distributie van het CO₂ in het reservoir zich vergelijkt met het model.

Gedurende een work-over en bij het verlaten van de putten zullen er voor put BRT-2B met behulp van een meetinstrument metingen worden verricht om de CO₂-concentratie in het reservoir te bepalen. Tussentijds zullen er in de monitoringsputten gasmonsters worden genomen waaruit de CO₂-concentratie kan worden bepaald.

Meting kwaliteit van het te injecteren CO₂

Kwaliteit- en dauwpuntmetingen van te injecteren CO₂ om corrosie van verbuizing te voorkomen. Regelmatige monsternamen en analyses.

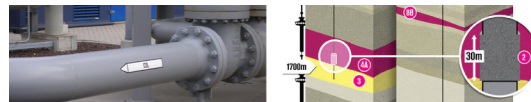
Monitoring van de omgeving van de putten

Naast maatregelen om te zorgen dat CO₂ niet kan ontsnappen via de put, worden monitoringsmaatregelen getroffen nabij de put, waaruit moet blijken dat het CO₂ daadwerkelijk in het reservoir blijft. Het betreft de volgende maatregelen:

- Door het monitoren van de reservoirdruk en geïnjecteerd volume kan een grote ontsnapping worden gedetecteerd (massabalans berekening).
- Er zal voorafgaand aan injectie een seismische acquisitie van de bovenliggende lagen worden uitgevoerd (als 'baseline'). Er kan worden besloten om een vervolg acquisitie te doen wanneer bepaalde monitoringsgegevens, zoals bijvoorbeeld een massabalans sterk afwijken van de verwachte gegevens.
- Continue CO₂-metingen in het grondwater op de locaties nabij de putten.
- Voorafgaand aan injectie zullen nabij de locatie enige metingen worden verricht (verschillende tijden en seizoenen) om het CO₂-gehalte in de lucht te meten (als 'baseline').

Vervolgmaatregelen naar aanleiding van meetresultaten

Indien bovenstaande maatregelen leiden tot de indicatie dat er ontsnapping van CO₂ optreedt, zal (afhankelijk van de grootte van de ontsnapping) de volgende maatregelen worden genomen om de effecten verder te monitoren:



- Vervolg seismische acquisities om potentiële CO₂-verplaatsingspaden te checken en/of CO₂ te lokaliseren.
- Aanleggen van monitoringsputten naar de bovenliggende ondiepere (water)lagen waarmee monsters op CO₂ kunnen worden geanalyseerd.
- Additionele grondwater- en luchtkwaliteitanalyses.

5.6.6. Resterende risico voor lekkage langs de putwand

De waarschijnlijkheid van lekkage en de consequenties zijn per put ingeschat in de risicomatrix in hoofdstuk 4.3. Na het toepassen van mitigerende maatregelen, hebben de beide putten van de locatie Barendrecht een verwaarloosbare waarschijnlijkheid voor lekkage en lage consequentie bij lekkage, vergelijkbaar met de putten van de locatie Barendrecht-Ziedewij.

De consequenties van dit lekkagescenario vallen nog in de categorie “laag”. Dit geldt voor een lekkagepad van reservoir tot maaiveld, indien een zeer klein stroompje naar boven komt op de puttenlocatie waar monitoring plaatsvindt. De situatie is zeer tijdelijk omdat de monitoring (“belletjes meter”, grondwater concentratie metingen) dit meteen op zullen pikken.

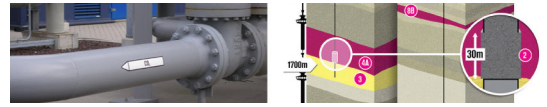
Het resulterende risico van puttenlekkage is, na aanpassing van de Barendrechtputten en uitbreiding van de monitoring, geclassificeerd als verwaarloosbaar.

5.7 Samenvatting onderzoek bedreigingen bodembeweging en trilling

Indien bodembeweging (bodemstijging of –trilling) optreedt kan dit effecten aan maaiveld hebben. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 2 van deelrapport 2, waarin als onderdeel van milieueffecten het aspect bodem specifiek wordt beschreven. Daarnaast kan bodembeweging of –trillingen leiden tot aantasting van het met CO₂ gevulde opslagreservoir.

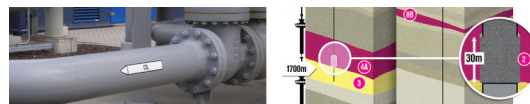
De belangrijkste aspecten van bodembeweging zijn onderstaand samengevat:

- Studiewerk geeft aan dat de kans op trillingen ten gevolge van CO₂-opslag zeer klein is.
- De gemeten bodemdaling voor de velden Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij is kleiner dan 2 cm. Dit houdt in dat de bodemstijging ook maximaal 2 cm kan bedragen.
- De metingen van mogelijke bodemstijging zal worden opgenomen in de meetplannen voor dit gebied (3-jaarlijkse metingen).



5.8 Samenvatting onderzoek bedreigingen chemische reacties

Studiewerk van TNO en NAM laat zien dat de cement- en staaldegradatie de belangrijkste bedreiging vormt voor lekkage van CO₂ uit het reservoir vormt (zie verder onder risico 1). Berekeningen aan de interacties van CO₂ met de deklaag laten zien dat de deklaag eerder meer zal afsluiten dan doorlaten, als gevolg van het netto neerslaan van mineralen. Het oplossen van mineralen op korte termijn in het reservoir als gevolg van de lage pH-waarde zal niet leiden tot verzakkingen in het gesteente. Verder zijn de effecten van mineraalreacties te gering om merkbaar effect op de injectiviteit van het reservoir te veroorzaken. Ook is aangetoond dat extra compactie door aantasting van het reservoirgesteente te verwaarlozen is.



6. Lange termijn

6.1 Inleiding

Gedurende de periode van CO₂-injectie vindt monitoring plaats van ondermeer de druk in het reservoir en ander gedrag van het opgeslagen CO₂. Nadat het reservoir is opgevuld, zal gedurende een periode de monitoring blijven doorgaan, totdat een stabiele situatie is bereikt. Daarna zal de put veilig worden afgesloten, zodat via de put geen CO₂ kan ontsnappen. Nadat de putten zijn afgesloten is het niet meer mogelijk rechtstreeks in het reservoir te meten. Dit hoofdstuk gaat nader in op de verwachte situatie in de beide reservoirs nadat deze zijn afgesloten. Daarbij wordt speciaal aandacht besteed aan de afsluitingsfase, de mogelijke lange termijn veranderingen van het opgeslagen CO₂ en mogelijke veranderingen bij de put. Het betreft een lange termijn tot zeer lange termijn, aangezien de opslag als permanent wordt gezien.

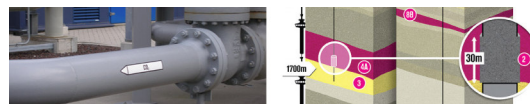
6.2 Stabiele eindsituatie

Nadat de injectieperiode is afgerond, vindt alleen nog maar monitoring plaats in het gevulde reservoir. Het is de verwachting dat in het reservoir geleidelijk geen meetbare veranderingen meer zullen optreden. Druk en temperatuur zullen een stabiele waarde worden en metingen in de omgeving zullen naar verwachting aangeven dat het CO₂ het reservoir niet verlaat. De mogelijke voorziene effecten na de injectieperiode treden zeer langzaam op over een lange periode.

Zodra de meetgegevens duidelijk maken dat er geen meetbare veranderingen meer optreden in het reservoir en dit ook niet meer verwacht wordt, kan met behulp van de pannenkoekpluggen de putten worden afgesloten. Dan volgt er nog een periode waarin rondom de put wordt gemeten om te bevestigen dat geen CO₂ via de putwand kan ontsnappen. Als ook dit duidelijk is dan kan de locatie weer worden overgedragen aan de oorspronkelijke eigenaar. Daarvoor zullen de putten tot een paar meter onder maaiveld worden verwijderd, zodat de bovenste meters grond weer bruikbaar zijn voor andere toepassingen.

Voor de beide afsluitende fasen, monitoring na afloop van de injectiefase en monitoring na sluiting van de putten, wordt in dit project uitgegaan van één of twee jaar. Daarna kan de overdracht naar de overheid plaatsvinden. Het is van belang dat er tussen de initiatiefnemer en de overheid nog afspraken worden gemaakt hoe wordt vastgesteld dat een stabiele eindsituatie is bereikt en na welke periode vervolgens de overdracht plaatsvindt.

In het verlengde hiervan wordt vanuit de Europese Unie richtlijnen voor CO₂-opslag opgesteld, waarbij deze overdrachtsituatie eveneens benoemd wordt. Vooralsnog is hiervoor echter nog geen vastgesteld beleid.



6.3 Lange termijn effect bij opgeslagen CO₂

Bij de beschrijving van de lekkagescenario's in hoofdstuk 5 zijn lange termijn effecten al regelmatig aan bod gekomen. Hoewel hoofdstuk 5 zich vooral richt op de periode van CO₂-injectie tot aan de insluiting en overdracht van het reservoir, dient in deze periode toch al rekening gehouden te worden met mogelijke lange termijn effecten. In deze paragraaf worden de belangrijkste bevindingen nog een keer bijeen gebracht.

Menging van CO₂ en resterend methaan

Met behulp van de reservoirmodellen is de interactie berekend van CO₂ met de resterende gassen in het reservoir, de vloeibare koolwaterstoffen (condensaat) in het reservoir en de waterlaag onder het reservoir. De berekeningen geven aan dat op korte termijn het CO₂ het resterende gas en condensaat zal verdringen, vanaf de injectieput richting de randen van het veld. Het geïnjecteerde CO₂ in het gasreservoir zal langzamerhand met het overgebleven aardgas vermengd raken tot een CO₂-methaan mengsel ontstaat.

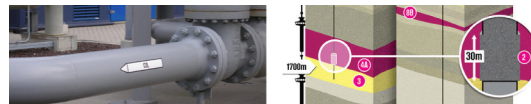
In eerste instantie zal het lichtere gas langzaam terugstromen naar de top van het reservoir. Dit duurt naar verwachting honderden jaren. Zo ontstaat er dus een laag van methaan met daaronder het CO₂. Dit leidt er toe dat op deze termijn door de dichtheidsstroming het risico dat CO₂ weglekt via de afdekkende laag zal afnemen. Immers, de afdekkende laag heeft bewezen ondoorlatend te zijn voor het bovenliggend methaangas. Ook de blootstelling van cement (de pannenkoekplug) aan CO₂ zal hierdoor verminderd worden.

Daarna zal door middel van diffusie een verdere menging optreden. Dit duurt naar verwachting duizenden tot miljoenen jaren. Dit laatste heeft effect op de druk in het reservoir. Er zal een toename van druk ontstaan. De extra druk wordt mogelijk uitgedempt in de omgeving.

Andere factoren die kunnen leiden tot vergroting van de druk in het reservoir zijn:

- Een mogelijke drukdaling van 0-5 bar door drukverdeling met de oliezone en een beperkte waterzone, die in verbinding staat met de gaszone (alleen in BRT).
- Er wordt op lange termijn geen of nauwelijks drukopbouw door de waterlaag (aquifer) verwacht. De geschatte onzekerheid is 0 tot circa 1 bar drukverhoging in 200 jaar na einde injectie.
- Er wordt hooguit een minieme drukverhoging van circa 1 bar over een periode van 700 jaren geschat door nog steeds bestaande gasgeneratie in de dieper liggende Limburg formatie.
- Als gevolg van volledige vermenging van het restgas en het CO₂ door diffusie wordt een uiteindelijke drukverhoging van circa 7 bar na honderden duizenden of miljoenen jaren verwacht.

Door het reservoir niet volledig tot aan de initiële druk op te vullen, maar bijvoorbeeld 95% of 97,5%, zal ook op de lange termijn de toenemende druk met zekerheid niet boven de oorspronkelijke druk uitkomen. [Detailonderzoek ondergrond, referentie 18]



Binding CO₂ aan water en gesteente

Een mechanisme dat op beperkte schaal ook een rol zou kunnen spelen bij het opsluiten van CO₂ in gasvelden in Nederland is geochemische opsluiting ('geochemical trapping'). Dit mechanisme kan in de loop van de geologische tijd een rol gaan spelen. Hieronder vallen oplossingsopsluiting ('solubility trapping') en mineralisatieopsluiting ('mineral trapping'). De hoeveelheid formatiewater, die aanwezig is in het reservoir, bepaalt in welke mate deze processen verlopen. Indien het CO₂ op wat voor manier dan ook uit het reservoir zou bewegen naar omringende (meestal watergevulde) lagen gaan deze mechanismen zeker wel een rol spelen. [Detailonderzoek ondergrond, referentie 17]

- 'Solubility trapping' houdt in dat CO₂ oplost in water. Het voordeel van 'solubility trapping' is dat eenmaal opgeloste CO₂, niet langer als vrije fase bestaat en de opwaartse druk er geen vat meer op heeft. Doordat er CO₂ in is opgelost krijgt het water een hogere dichtheid en zakt langzaam naar beneden. (IPCC, 2005).
- 'Mineral trapping' is het meest permanente opslagmechanisme voor CO₂. Vrije ionen in het formatiewater kunnen een binding aangaan met het omringende gesteente en carbonaat mineralen vormen.

Distributie en Trapping mechanismen op korte en lange termijn

Als het CO₂ door watervoerend gesteente stroomt, onder invloed van drukverschillen en opwaartse druk, blijft als gevolg van capillaire krachten, een deel van het CO₂ opgesloten zitten in de poriënruimtes. Dit wordt achterblijvingsopsluiting ('residual trapping of capillary trapping') genoemd.

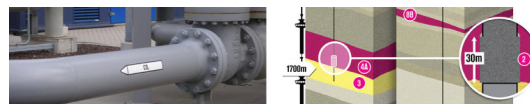
Het CO₂ zal voor zowel Barendrecht als Barendrecht-Ziedewij op lange termijn voor meer dan 90% als CO₂ opgeslagen blijven in de poriën van het zandsteen opslagreservoir, gevangen onder de afsluitende deklaag en afdichtende breuken. Ongeveer 1 tot 5% van het CO₂ zal worden opgeslagen door middel van oplossing in aanwezig water. Slechts < 5% van het CO₂ zal worden opgeslagen door middel van mineralogische binding met de formatie van het opslagreservoir.

6.4 Lange termijn effect bij putten

Alle putten worden afgesloten met een zogenaamde pannenkoekplug. Deze plug voorkomt vrijwel alle relevante lekmechanismen, die voor het puts scenario zijn geïdentificeerd. Risico op lekkage door het cement van deze plug op lange termijn is onwaarschijnlijk en verwaarloosbaar. Alle putten in zowel het Barendrecht-veld als het Barendrecht-Ziedewij-veld zullen na installatie van de plug tijdelijk niet verder worden afgesloten om de integriteit van de plug gedurende een periode te monitoren. Hierna wordt de put volledig afgesloten. [Detailonderzoek ondergrond, referentie 5, 6 en 24]

Chemische verwerking: degradatie van cement

De degradatiesnelheid van het cement wordt door structurele eigenschappen van het cement bepaald en niet per sé door de chemische reactiesnelheid. Met andere woorden: de diffusiesnelheid van CO₂ in de poriën van het cement is de remmende factor. Laboratoriumonderzoeken die uitgaan van relatief extreem hoge drukken en temperaturen laten zien dat er maximaal 12,5 m cement afgebroken kan worden in 10.000 jaar. De omstandigheden, waarin deze afbraaksnelheden worden gehaald, zijn niet te vergelijken met de omstandigheden in BRT en BRTZ, waardoor het zeer aannemelijk is dat



de degradatiesnelheden in BRT en BRTZ vele malen lager zijn. De pH van de omgeving van het cement is dus niet van invloed op de snelheid waarmee de CO₂-oplossing het cement afbreekt. Ook al zou de zure CO₂-oplossing de gehele put in het reservoir doen verweren, dan zouden de tientallen meters dikke cementpluggen een barrière veroorzaken en ervoor zorgen dat er zeker geen sprak is van lekkage.

TNO concludeert dat verwerking van pluggen een te langzaam proces is om een reëel risico te vormen, behalve als er al breuken of scheuren in het cement aanwezig zijn. Als er scheurtjes of andere onvolkomenheden in het cement aanwezig zijn, zal dit de diffusiesnelheid sterk verhogen (de scheurtjes zullen in de loop der tijd steeds groter worden door chemische degradatie). Hieruit blijkt dat de kwaliteit van het cement in en om de put en van de plug uiterst belangrijk is. TNO benadrukt het belang van een goede afsluiting van de put wanneer deze verlaten wordt en geeft een aantal adviezen:

- Bij het permanent verlaten van putten in CO₂-opslagprojecten dient een pannenkoekplug geplaatst te worden.
- Dit is niet meer mogelijk voor put BRT-2A, die reeds is afgesloten conform de conventionele richtlijnen. De kwaliteit van het cement (met name het cement aan de buitenkant van de putwand) is van voldoende hoge kwaliteit. Er is een statische omgeving rondom het cement aanwezig, aangezien er geen stroming van CO₂ en water wordt voorzien. De afgesloten status van BRT-2A blijft ongewijzigd.

6.5 Lange termijn effecten op het reservoir en deklaaggesteente

Voor de lange termijn zorgen hermineralisaties van het gesteente (minerale reorganisatie) voor een toename van de pH dicht bij de initiële waarde.

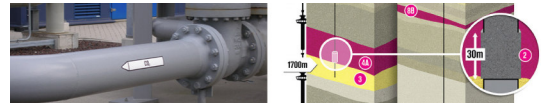
Barendrecht veld lange termijn

Onderzoek van TNO geeft een porositeitsafname voor het Barendrecht veld aan van maximaal 6%.

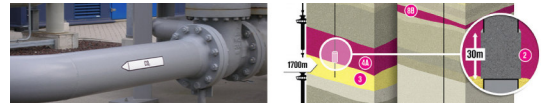
Voor de deklaag van het BRT veld betekent de minerale reorganisatie een afname in de porositeit van maximaal 6%. Deze afname in porositeit houdt in dat de toegankelijkheid, ofwel de penetratiediepte, vermindert. De minerale reorganisatie in dit gesteente remt zichzelf dus af.

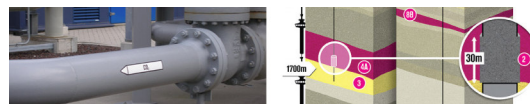
Barendrecht-Ziedewij veld lange termijn

Voor het gesteente in het BRT-Z veld is ook sprake van een afname in de porositeit. De door TNO berekende afname in porositeit is 3% voor BRT-Z in geval van 100% watervulling, echter in het geval van de 20% watervulling (huidige werkelijkheid) is dit minder dan 1%. De invloed is hier dus kleiner dan in het geval van het reservoir van het BRT veld. Gezien het feit dat minerale reorganisaties langzame processen zijn die op een tijdschaal van > 100 – 1.000 jaar plaatsvinden, zal deze afname in porositeit geen consequenties hebben gedurende de injectiefase.



De deklaag van het BRT-Z veld ondergaat ook een verlaging van de porositeit. Op basis van de chemische reorganisatie zal in de evenwichtssituatie uiteindelijk een porositeit in het gesteente aanwezig zijn die gelijk is aan 0. Dit betekent dat er geen poriën meer aanwezig zijn. Dit zorgt er dus voor dat het gesteente volledig ondoorlaatbaar wordt. In de praktijk houdt dit in dat de eerste (dunne) laag van de deklaag deze verandering zal ondergaan, waarna deze laag de rest van de deklaag ontoegankelijk maakt voor het geïnjecteerde CO₂. Het afsluitend vermogen van deze deklaag wordt dus alleen maar beter als er minerale reorganisatie plaatsvindt onder invloed van CO₂.





7. Monitoring

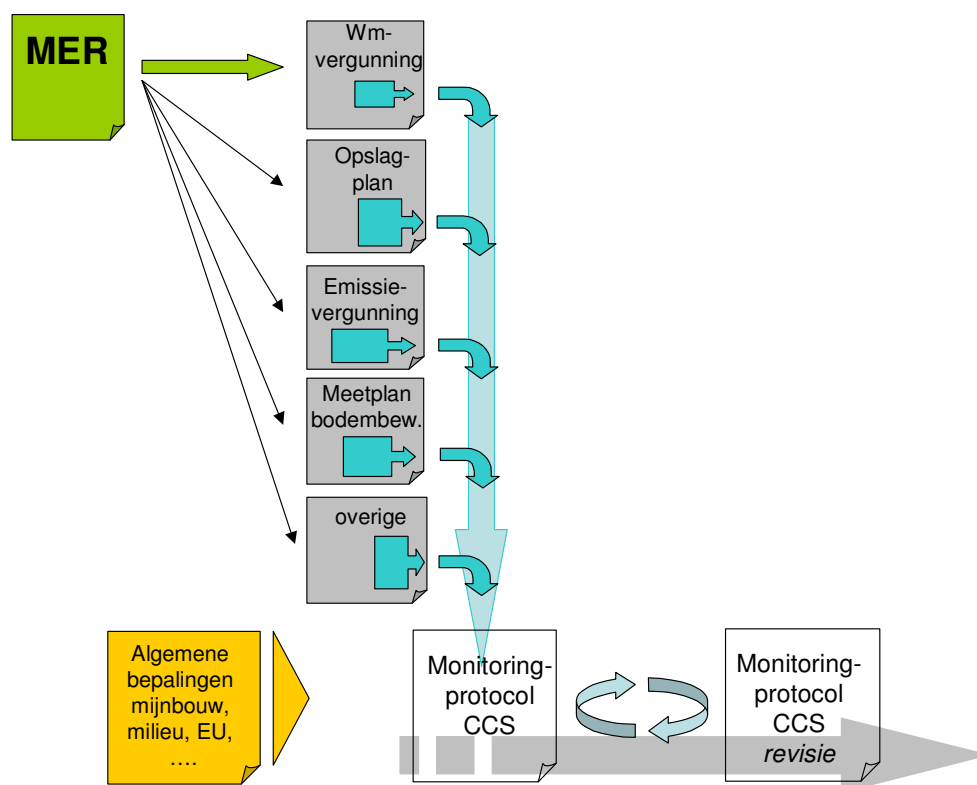
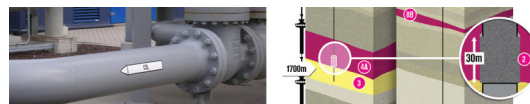
7.1 Inleiding

Het monitoringsplan [Detailonderzoek ondergrond, referentie 25 en 29] voor het Barendrecht CO₂-opslag project zal bestaan uit drie categorieën. Een categorie 'traditioneel', waarmee de overgedragen procesemissie vanaf de bron tot en met de injectieput wordt bepaald (deel 1). Monitoring met betrekking tot veiligheid van de bovengrondse installaties en putten ten opzichte van de omgeving vormt de tweede categorie. Monitoring waarmee het reservoir en meer specifiek de opslag in het reservoir wordt vastgesteld is de derde categorie. Dit laatste deel is met name van toepassing in dit deelrapport 3 van het MER en wordt in dit hoofdstuk in meer detail beschreven. De eerste 2 categorieën komen in de deelrapporten 1 en 2 van dit MER aan de orde. Het gehele monitoringsplan wordt begrensd tot de zuivere CO₂ vanaf het leverpunt bij Pernis tot het gedrag in en de mogelijke lekpaden vanuit het reservoir.

Er is bij het samenstellen van het plan gestreefd naar de hoogst mogelijke nauwkeurigheid, waarbij de risico's en kosteneffectiviteit nadrukkelijk in beschouwing zijn genomen. Bijvoorbeeld voor de monitoring van het reservoir is een hoge nauwkeurigheid wenselijk vanuit milieukundig en maatschappelijk leereffect, maar niet elke monitoringsvariant zal deze gecombineerde risico- en kosteneffectiviteittoets doorstaan. Onderstaand worden deze (over)wegingen verder uitgewerkt.

7.2 Opzet monitoringsplan

Het monitoringsplan voor dit CO₂-opslagproject zal afzonderlijk worden opgesteld en ingediend bij de bevoegde gezagen. Bij dit type project zijn verschillende bevoegde gezagen betrokken die verschillende monitoring eisen stellen. Het doel van het monitoringsplan is om de verschillende monitoringwensen te combineren tot een samenhangend geheel. Hiermee kunnen de meetinspanningen efficiënter worden uitgevoerd, maar een gecombineerde rapportage heeft tevens als voordeel dat steeds een compleet beeld kan worden gegeven.



Figuur 7.1 Overzicht integraal karakter monitoringsprotocol

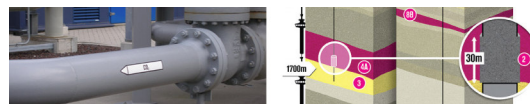
Onderstaand wordt eerst kort ingegaan op categorie 1 en 2. Daarna komen de ondergrondse aspecten van het monitoringsplan uitgebreid aan de orde.

7.2.1. Categorie 1: Traditionele monitoring van overgedragen procesemissies van bron tot injectieput.

Voor de traditionele categorie wordt aansluiting gezocht bij de monitoringsprincipes, -instrumenten en richtsnoeren van de EU-richtlijn met betrekking tot de regeling voor emissiehandel (2003/87/EG) en de daarop gebaseerde EU-beschikking met richtsnoeren voor de monitoring en rapportage van broeikasgassen (2007/589/EG). Voor de eerste stappen in de keten (afvang, transport en bovengrondse injectiefaciliteiten) zijn mede de richtsnoeren voor een continue emissiemeting aan de orde. Voor het reservoir wordt een toegesneden 'no-tier' monitoring opgezet, die in de basis echter aansluit op de algemene monitoringsprincipes.

Door de toepassing van deze regelingen wordt niet alleen een consistent en transparant meetsysteem bereikt met de bestaande werkwijze en emissievergunning van SNR, maar kan het opslagsysteem (als opt-in) tevens een zelfstandig onderdeel gaan vormen van het systeem van emissiehandel.

Continue, discontinue en diffuse emissies vanuit het proces zullen volgens de geldende procedures worden gerapporteerd en gemeten. De afgeleverde CO₂-stroom aan de injectieput wordt gemeten met een flow meter met een nauwkeurigheid en calibratieprogramma wat voldoet aan de bovengenoemde richtlijnen.



7.2.2. Categorie 2: Monitoringsplan met betrekking tot veiligheid van de bovengrondse installaties en putten ten opzichte van de omgeving

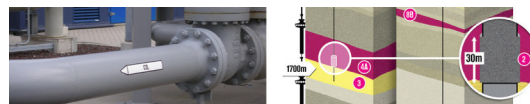
De volgende monitoring maatregelen zullen worden genomen met betrekking tot veiligheid van bovengrondse installaties (zie ook deelrapporten 1 en 2):

- Regelmatige inspectie door middel van ragen van de pijpleiding.
- Regelmatige inspectiestops van de compressorfaciliteiten op plot 16, Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij.
- Continue water dauwpunt metingen en alarmering aan de inlaat van het transportsysteem en bij aflevering op Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij. Bij een te hoog dauwpunt zal de installatie worden ingesloten omdat er een risico is op vrij water wat in combinatie met CO₂ kan leiden tot ernstige corrosie.
- On-line meting van 7 kritische componenten en per kwartaal monsternamen van het CO₂ van de SGHP op 8 kritische componenten.
- CO₂-detectie en alarmering op de Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij locatie (met name in gesloten ruimten).
- Persoonlijke CO₂-detectors gedragen door personen op plot 16, Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij locatie.
- Lage en hoge druk beveiligingen in de compressor installatie. Waar nodig zullen ook lage en hoge temperatuur beveiligingen worden geplaatst.
- Drukverschil meting en alarm over de pijpleiding (lekdetecties).
- Flow meting verschil meting (verschil tussen meting aan ingang pijpleiding en afleverpunt bij de injectieput).
- Periodieke geluidsmetingen ter verificatie van operatie binnen de milieuvergunning.
- Pulsatie en conditie monitoring van compressor installaties.
- On-line data systeem met continue beschikbaarheid van de belangrijkste proces data.

7.2.3. Categorie 3: Risicogedreven monitoringsplan; Monitoring om 'containment' van CO₂ in het opslagreservoir vast te stellen.

Het specifieke monitoring plan categorie 3 voor Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij wordt beheerst door de risico's van ontsnapping van CO₂ uit het opslagreservoir. De belangrijkste lekkagescenario's die de basis vormen voor het monitoringsplan staan beschreven in hoofdstuk 4 en 5, zijnde:

1. Lekkage door of langs de afdichtende bovenlaag (caprock) (zie paragraaf 5.3).
2. Lekkage via een overstromingspunt (spill-point) van het reservoir (zie paragraaf 5.4).
3. Lekkage langs of via geologische breuken (zie paragraaf 5.5).
4. Lekkage langs of door de putten (zie paragraaf 5.6).



Veruit het belangrijkste risico is ontsnapping van CO₂ via de aanwezige gasputten als gevolg microstructuren in de cement of lokale degradatie van cement en staal onder invloed van CO₂, opgelost in aanwezig water (lage pH, zuur) en hogere drukken. Dit kan leiden tot lekkage vanuit het opslagreservoir via de put (tussen binnenste en buitenste verbuizing/ putwand) of langs de cementlaag om de buitenste verbuizing / putwand naar de bovenliggende lagen en/of naar de atmosfeer. Een potentiële lekkage zou echter heel klein zijn in verband met de smalle opening van micro structuren en de langzame en afnemende snelheid van cement degradatie.

Het monitoringsplan zal er allereerst op gericht zijn de oorzaken en barrières voor ontsnapping zoveel mogelijk te meten en confirmeren, aansluitend met de risico analyse en beheersing. Het monitoringsplan en haar maatregelen zullen ook worden gebruikt om de modelberekeningen uitgevoerd binnen de haalbaarheidsstudies te verifiëren. De voorgestelde maatregelen zijn geëvalueerd op basis van vergelijking van acceptabele kosten ten opzichte van de hoogte van het risico.

7.2.4. Monitoringsgebieden

Monitoringsmaatregelen worden uitgevoerd voor metingen op verschillende gebieden of delen van de ondergrond danwel biosfeer. Hieronder staat de onderverdeling weergegeven:

- Putten en opslagreservoir; bijvoorbeeld ondergrondse meetinstrumenten ('logging tools'), drukken, debieten, massabalansberekeningen, injectietesten, productietesten van monitoringsputten.
- CO₂-migratie in bovenliggende en naburige formaties ('Overburden'); bijvoorbeeld putten in ondiepe (water)lagen, logging tools, seismiek.
- Atmosfeer/biosfeer: bijvoorbeeld CO₂-concentraties in de lucht en het grondwater.

7.2.5. Classificatie noodzaak van Monitoringsmaatregelen

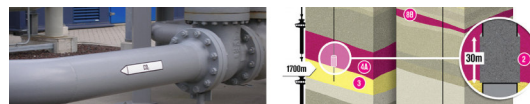
De maatregelen van het monitoringsplan zijn onderverdeeld in de volgende categorieën:

Technisch minimaal benodigd

Monitoringsmaatregelen die vereist zijn vanwege de procesbeheersing en dus de haalbaarheid van het opslagproject. Dit betreft met name het monitoren van procesparameters (drukken, temperaturen, stromen) en de maatregelen die informatie geven over de status van mogelijke oorzaken en barrières voor ontsnapping van CO₂, aansluitend met de risicoanalyse en -beheersing (zie hoofdstukken 4 en 5).

Publieke acceptatie

Betreft met name maatregelen voor het monitoren van CO₂ om te bevestigen dat er zoals verwacht daadwerkelijk geen CO₂ ontsnapt.



Leerdoeleinden

Er zijn geen specifieke maatregelen geïdentificeerd bovenop de eerste twee categorieën daar deze maatregelen reeds zorgen voor voldoende kennis en ervaring. Wel is het mogelijk dat extra monitoring wordt uitgevoerd in het kader van het CATO-2 onderzoeksproject. Het is op het moment van schrijven niet bekend of dit programma doorgaat.

7.2.6. Fasen in de levensduur

De geplande monitoringsmaatregelen zullen worden uitgevoerd over de levensduur van het project, dat kan worden onderverdeeld in de volgende fasen:

- Voorafgaand aan CO₂-injectie en -opslag ('baseline monitoring').
- Gedurende CO₂-injectie.
- Periode kort na injectie (zonder plug en deelafluiting met plug).
- Monitoring na volledige insluiting van de putten.

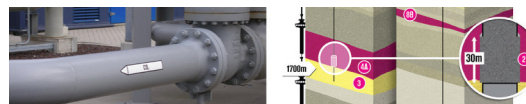
7.2.7. Afweging tussen acceptabele risico's en kosten

De technisch minimaal benodigde maatregelen (zie 7.3.2) zijn zonder uitvoerige analyse naar acceptabele kosten aan het plan toegevoegd, daar deze nodig zijn vanwege procesbeheersing en dus haalbaarheid van het project.

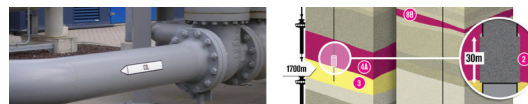
De maatregelen ten behoeve van publieke acceptatie zijn eerst bekeken vanuit een noodzaak met betrekking tot risico en de benodigde kosten. Een deel van alle geïdentificeerde maatregelen uit deze categorie zijn hierdoor niet opgenomen in het plan. Een goed voorbeeld zijn het aanbrengen/ boren van ondiepe monitoringsputten in de ondiep gelegen 'Brussels sands' om hier eventuele CO₂ te detecteren. Omdat het risico van migratie van CO₂ naar deze lagen als verwaarloosbaar is geclassificeerd (zie hoofdstuk 2) en de kosten van deze maatregel substantieel kunnen zijn is deze maatregel achterwege gelaten.

7.3 Beschrijving voorstel monitoringsplan

Op basis van bovenstaande categorie-indeling en de risicoanalyse en -beheersing uit hoofdstuk 2 zijn de volgende monitoringsonderdelen geïdentificeerd. De monitoringsput voor Barendrecht is BRT-1 en voor Barendrecht-Ziedewij de putten BRTZ-3 en 4. De injectieput voor Barendrecht is BRT-2B en voor Barendrecht-Ziedewij put BRTZ-1.


Tabel 7.1: Voorstel monitoringsplan

Nr	Onderdeel en beschrijving	Toepasbaar op BRT en/of BRTZ	Risicoscenario nummer (zie nummering paragraaf 7.3)	Gebied (O = ondergrond; put en reservoir, L = lagen boven/buiten het opslagreservoir, A = atmosfeer, grondwater, oppervlaktewater)	Classificatie noodzaak (T= technisch minimum, P= Publieke acceptatie)	Fase in levensduur (V = voor injectie, I = Injectiefase, N = kort na injectie, A = fase na insluiting)	Frequentie
A	Ondergrondse meetinstrumenten ('logging, methoden) voor de put integriteit (putverbuizingen en cementlaag om buitenste verbuizing) 4 verschillende instrumenten. 4 methoden zullen worden gebruikt voor de injectieputten, en twee op de monitoringsputten.	BRT / BRTZ	5,1	O	T	V,I,N	Jaarlijks (BRT), 1 keer per 4 jaar (BRTZ)
B	Meten annulaire drukken (alle putten)	BRT / BRTZ	5,1	O	T	V,I,N	Wekelijks, maandelijks
C	'Work-over' om integriteit van put BRT-2 voor injectie en latere put metingen te realiseren.	BRT	5,1	O	T	V	Enmalig
D	Test de monitoringsput op CO ₂ aanwezigheid en doorbraak (monstername).	BRT/BRTZ	5,1,2	O	T	V,I	Jaarlijks, meer frequent rond het verwachte doorbreekpunt
E	Injectietesten van injectieputten.	BRT / BRTZ	5,1,4	O	T	V,I	Jaarlijks
F	Monitoring van 'pancake plug' – drukken, monstername.	BRT / BRTZ	5,1	O	T	N	Maandelijks
G	Ondergrondse meetinstrument ('RST') om aanwezigheid/ distributie van CO ₂ nabij de put te monitoren. Alleen BRT-2.	BRT (put 2)	5,1,2	O, L	T	V, I, N	1 keer voor en 1 keer na injectie BRT
H	Akoestische ondergrondse meting voor detectie van kleine lekkages rondom alle verbuizingen in de injectie en monitoringsputten.	BRT/BRTZ	5,1	O	T	V,I,N	Jaarlijks (BRT), 1 keer per 4 jaar (BRTZ)
I	Continu meten van bovengrondse injectiedebieten, drukken en temperaturen ('massabalans-berekeningen, confirmeren van voldoende injectiviteit en operatie op veilige afstand van frac gradient).	BRT / BRTZ	1 t/m 5	O	T	I	Continu
J	Meten ondergrondse injectie put-/ reservoirdruk en temperatuur ('SPGT') om te corelleren met bovengrondse drukmeting. Dit kan, in combinatie met I. leiden tot het limiteren van druk en debiet, met name in de laatste fase van injectie om breuken in reservoir en deklaag te voorkomen.	BRT / BRTZ (injectie putten)	1,2,4	O	T	V,I,N	Jaarlijks
K	Meten van CO ₂ -kwaliteit (monstername) en continue dauwpuntmetingen in de faciliteiten.	BRT / BRTZ	1,4	O	T	I	Continu (dauwpunt en 7 componenten) Per kwartaal (monsternames)
L	Seismische metingen voorafgaand aan injectie ('baseline survey').	BRT	1 t/m 5	L	P	V	Enmalig (nulmeting)



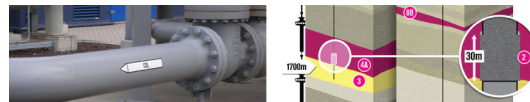
Tabel 7.1: Voorstel monitoringsplan

Nr	Onderdeel en beschrijving	Toepasbaar op BRT en/of BRTZ	Risicoscenario nummer (zie nummering paragraaf 7.3)	Gebied (O = ondergrond; put en reservoir, L = lagen boven/buiten het opslagreservoir, A = atmosfeer, grondwater, oppervlaktewater)	Classificatie noodzaak (T= technisch minimum, P= Publieke acceptatie)	Fase in levensduur (V = voor injectie, I = Injectiefase, N = kort na injectie, A = fase na insluiting)	Frequentie
M	Baseline meting CO ₂ -concentraties in de lucht nabij de putten (op de bovengrondse installaties).	BRT / BRTZ	1 t/m 5	A	P	V,	Eenmalig (nulmeting)
N	Meting CO ₂ -concentraties in grondwater nabij de putten.	BRT / BRTZ	1 t/m 5	A	P	V,I,N,A	Eens per jaar
O	Meetplan bodembeweging (bodemdaling/-stijging & Seismische activiteit)	BRT / BRTZ	1,4,5	A	T, P	V,I,N,A	3-jaarlijks bodemdaling/stijging Continue seismische activiteit metingen (KNMI meet stations)

* De genoemde monitoringstechnieken worden in het basisplan niet toegepast op put BRTZ-2 omdat deze put niet in verbinding staat met het Barendrecht opslag reservoir.

Vervolg seismische acquisities, atmosferische metingen en het aanbrengen van ondiepe putten om CO₂ te kunnen meten in de lagen boven het opslagreservoir zijn geen onderdeel van het basisplan. Deze maatregelen zullen alleen worden overwogen wanneer de andere technieken een mogelijke ontsnapping van CO₂ uit het opslagreservoir laten zien.

Op basis van kennis en ervaring van de monitoring op Barendrecht (fase 1) zal de meetfrequentie voor Barendrecht-Ziedewij worden aangepast en geoptimaliseerd.



7.3.1. Maatregelen bij afwijkende meetwaarden

De risico analyse geeft aan dat geen lekkage wordt verwacht en dat uitstroom van CO₂ naar de atmosfeer ook onder de meest onwaarschijnlijke situatie als zeer gering wordt gezien. Het monitoringsplan is opgesteld om vast te stellen dat dit daadwerkelijk als verwacht optreedt. Mocht echter toch een afwijking optreden van datgene wat wordt verwacht of is voorzien, dan zal hier op gereageerd moeten worden. Voor de verschillende te meten parameters is daarom vastgesteld wat de te verwachten meetwaarden zijn (aangeduid als groene zone). Indien deze daadwerkelijk worden gemeten, vindt de uitvoering van het project plaats conform plan. Daarnaast is een oranjezone voor de parameters vastgesteld. Indien de meetwaarde in deze zone terecht komt, zijn aanvullende maatregelen nodig. Hierbij kan worden gedacht aan meer frequent meten, aanvullende metingen uitvoeren zoals een seismisch onderzoek of het aanpassen van de CO₂-injectiehoeveelheid. Er is nog een derde zone gedefinieerd voor de meetparameters, de rode zone. Indien de metingen zich in deze zone bevinden, zijn dwingendere maatregelen nodig, zoals het stoppen met CO₂-injectie.

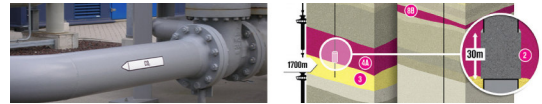
Het monitoringsprotocol zal uitgebreid ingaan op alle meetparameters, de meetfrequenties en de signaal- en actiewaarden voor de meetparameters. Onderstaand worden een aantal kenmerkende parameters toegelicht. Daarbij wordt de stoplichtindeling aangehouden, groen voor een gewenste situatie, oranje betekent waakzaamheid en rood betekent ingrijpen.

Drukmeting reservoir

- Groen – gewenste waarde
Er is een berekende relatie tussen de hoeveelheid geïnjecteerde CO₂ en de druk in het reservoir. Hier kan een kleine afwijking inzitten door inhomogeniteiten in het reservoir. Indien de druk binnen deze bandbreedte blijft, vult het reservoir zich naar verwachting.
- Oranje - signaalwaarde
Een te hoge druk zou kunnen aangeven dat CO₂ zich niet gelijkmatig verspreid door het reservoir. Een te lage druk betekent dat mogelijk CO₂ weglekt uit het reservoir. Dit betekent op korte termijn een aanpassing van de injectie van CO₂ en intensivering van de metingen.
- Rood - actiewaarde
Bij grote afwijkingen zal gestopt worden met injectie en onderzoek worden uitgevoerd. Indien de initiële druk wordt overschreden zal CO₂ gecontroleerd uit het reservoir worden gelaten.

Flowmeting langs putwand

- Groen – gewenste waarde
De verwachting is dat de flowmeter langs de putwand geen CO₂-stroming registreert. Dat wil zeggen dat als er al een CO₂-lekkage is dit zo gering is, dat het onder de detectielimiet blijft.
- Oranje - signaalwaarde
Indien er toch een stroming wordt gemeten, maar deze binnen de hoeveelheden van berekende maximale scenario's blijft, zal aanvullende monitoring worden uitgevoerd om vast te stellen hoe deze stroming tot stand is gekomen en hoe deze kan worden gerepareerd.
- Rood - actiewaarde
Indien de stroming groter is dan maximaal berekend, wordt gestopt met de injectie van CO₂.



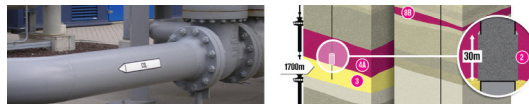
CO₂-concentraties nabij put aan maaiveld en ondiepe ondergrond

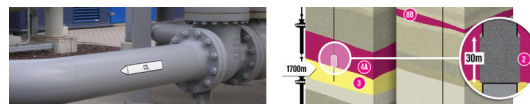
- Groen – gewenste waarde
Luchtmetingen nabij de putten, grondwater- en bodemmetingen in de directe omgeving van de put worden regelmatig genomen. De metingen worden getoetst aan de waarden in de nulmeting.
- Oranje - signaalwaarde
Indien verhoogde concentraties worden vastgesteld, vindt een intensivering van het meetprogramma plaats. Dit heeft tot doel de bron van de verhoogde CO₂-concentraties vast te stellen. Daarbij worden in de omgeving ter referentie aanvullende metingen uitgevoerd.
- Rood - actiewaarde
Zodra de concentraties ontoelaatbaar hoog zijn, wordt actie naar de omgeving ondernomen.

7.3.2. Technische haalbaarheid monitoringsplan

Het monitoringsplan bestaat voor een groot deel uit technieken die de mijnbouwindustrie reeds toepast of laat toepassen op gas en olievelden. Dit betreft maatregelen A,B,C,D,E,F,G,I,J,K,L en O. Het 'nieuwe' aspect van deze bestaande technieken is dat ze worden gebruikt in het kader van CO₂-opslag in plaats van gas of olie.

Een ander nieuw aspect is dat de ondergrondse 'logging' technieken (A,G,H) periodiek zullen worden toegepast (inclusief nulmeting als referentie) zodat in de tijd, door middel van vergelijking van de resultaten, verschillen en veranderingen kunnen worden gedetecteerd.





8. Bevindingen risico evaluatie

8.1 Inleiding

In het begin van dit rapport is gesteld dat de nadruk zal liggen, voor de specifiek Nederlandse situatie, op de verschillen tussen:

- opslag van aardgas versus opslag van CO₂;
- lange termijn opslag versus korte termijn opslag voor buffering en versus CO₂-injectie voor EOR;
- onshore versus offshore;
- Nederlandse situatie versus ondergrond andere landen.

Het verschil tussen aardgasopslag en CO₂-opslag is onderzocht aan de hand van mogelijke chemische reacties in en om het reservoir en vooral nabij de putwand. In hoofdstuk 5 blijkt dat geen effecten worden verwacht, mits vooral de putwand goed worden afgewerkt.

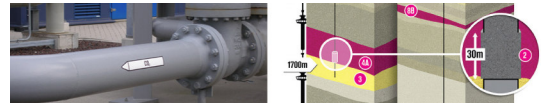
Ten aanzien van de lange termijn is uit berekeningen gebleken dat zelfs als het CO₂ geleidelijk uit het reservoir verdwijnt en niet oplost in bovenliggende lagen, geen uitstroom naar het aardoppervlak plaatsvindt maar een geleidelijke stroming naar andere ondergrondse reservoirs. Hoofdstuk 6 beschrijft (op basis van detailstudies uit hoofdstuk 5) dat op lange termijn een stabiele situatie mag worden verwacht.

Voor onshore CO₂-opslag is gebruik gemaakt van kennis uit de gas- en olieindustrie op dit gebied. Een belangrijk verschil bestaat in de nabijheid van bewoning bij de winlocaties. De risico evaluatie voor de ondergrond geeft aan dat de voorgenomen activiteit daadwerkelijk veilig kan plaatsvinden.

De specifieke Nederlandse ondergrond, zoals beschreven in appendix 2, blijkt bij uitstek geschikt voor CO₂-opslag. Dit komt door de continue gelaagdheid van de sedimentaire gesteenten, het ontbreken van breukzones tot aan of bijna bij maaiveld, het ontbreken van vulkanische gesteenten en de zeer beperkte seismische activiteit van de diepe ondergrond.

8.2 Varianten

De onderzoeken hebben aangegeven hoe op een veilige wijze de CO₂ kan worden opgeslagen in de geselecteerde reservoirs. Als belangrijkste aandacht punt is daarbij naar voren gekomen de eindafdichting van de put met behulp van de pannenkoekplug.



Hoewel er geen significante risico's worden voorzien, zijn er suggesties de mogelijke risico's verder te beperken door:

- Ten allen tijde een onderdruk in het reservoir te houden. Dit gebeurt door niet geheel tot de initiële druk het reservoir te vullen. Als variant kan een nog lagere einddruk worden onderzocht.
- Onderzoek doen naar de mogelijkheid het voor afsluiting nabij de put een lichter en potentieel minder corrosieve vloeistof te injecteren, zodat CO₂ niet bij de putwand komt.

8.3 Samenvatting risico-beoordeling Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij velden

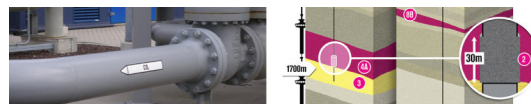
Bewezen technologie

CO₂ in de diepe ondergrond stoppen is niet nieuw en niet complex. Het wordt al op vele plaatsen wereldwijd gedaan. De techniek en beheersmiddelen zijn hetzelfde wanneer je CO₂ in een oliereservoir pompt voor "enhanced oil recovery" als dat je CO₂ in een gasreservoir stopt voor emissiereductie.

Veiligheid geselecteerde velden

Waarom is CO₂-opslag in deze velden veilig:

- 1) De velden beschikken over bekende en geschikte **gasreservoirs**:
 - geologisch bewezen gasdicht (miljoenen jaren);
 - studies en onderzoeken tonen aan dat de velden ook CO₂ dicht zullen zijn tot in de verre toekomst (b.v.: geen problemen t.g.v. chemische reacties mede doordat er weinig water in gasvelden zit, geen "schade" tijdens de gasproductiefase). Belangrijke punten uit deze studies zijn:
 - er zijn weinig putten en deze zijn redelijk nieuw en toegankelijk;
 - locatie gasreservoirs: uit modellering blijkt dat zelfs als het CO₂ op een of andere manier zou kunnen ontsnappen (via andere routes dan de putten) dat deze dan nooit in de biosfeer terecht zal komen (maar in nabij en bovengelegen waterlagen en olie/gasreservoirs).
- 2) In het gasreservoir zal altijd een **lagere CO₂-druk** heersen dan de vloeistofdruk in het gesteente rond het reservoir; dit betekent dat als er al een lekpad uit het reservoir zou zijn dat het dan meer waarschijnlijk is dat water het reservoir in sijpelt dan dat CO₂ het reservoir uit sijpelt.
- 3) Ontwerp: Shell heeft veel nadruk gelegd op het **vermijden van risico's** door middel van ontwerpkeuzes. Goede voorbeelden hiervan zijn dat de operaties zo zijn opgezet dat er geen fase-overgangen zullen plaatsvinden in het systeem en dat de temperaturen in de putten en het reservoir redelijk constant zijn. Door deze twee besluiten worden enkele belangrijke risico's en onzekerheden in feite irrelevant.



- 4) Operaties: ook in de operationele fase is **gekozen voor zekerheid** en vermijden van risico's, bijvoorbeeld het besluit de injectiedrukken en debieten laag genoeg te houden zodat er geen enkel risico is op "fracking" van het reservoir.
- 5) Afsluiten putten na de injectie: de putten worden allemaal afgesloten met zogenaamde **pannenkoekpluggen**; deze bieden extra zekerheid voor de permanente afsluiting.
- 6) Monitoring: een uitgebreid **monitoringsprogramma** is opgesteld om mogelijke bedreigingen van CO₂-lekkage te kunnen bewaken (en te corrigeren) ruim voordat de lekkage op zal treden; verder zal er ook monitoring in de bodem en atmosfeer plaatsvinden (om aan te tonen dat daar inderdaad geen CO₂ ontsnapt). Met name in en rondom de putten omdat dit eigenlijk de enige mogelijke lekpaden zijn.

Veiligheid omwonenden

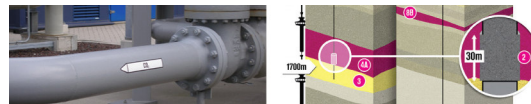
Scenario's voor externe risico's (en risico's voor personeel) zijn op de gebruikelijke manier berekend (QRA) en geëvalueerd (criteria voor Plaatsgebonden Risico en Groepsrisico). Dit betreft met name de lekkagescenario's voor de bovengrondse installaties (pijpleiding, compressoren), maar ook het zogenaamde blow-out scenario waarin CO₂ uit het reservoir via de put hoog de lucht in spuit. De overige lekkagescenario's voor de ondergrond geven geen verdere bijdrage aan de risico's voor omwonenden doordat het CO₂ in de diepe ondergrond blijft of doordat de hoeveelheden zeer klein zijn (alleen mogelijk bij lekkage via de put) en niet in de buurt van de bebouwing. Zie Deelrapport 2 voor meer informatie hierover.

8.4 Kernboodschappen Ondergrondse opslag van CO₂ in Barendrecht

Vanuit de gedachte dat maatregelen moeten worden genomen om de CO₂-emissie terug te brengen, kan dit project gezien worden als het juiste project op het juiste moment. Dit wordt onderstaand toegelicht.

CO₂-opslag bij Barendrecht vormt het juiste project:

- De beide velden zijn uitermate geschikt, vanwege
 - tijdig uitgeproduceerd;
 - veilig:
 - gasvelden zijn (geologisch) bewezen gasdicht, zoals blijkt uit de TNO studies ook voor CO₂ veilig;
 - er zijn weinig putten, en alle putten zijn toegankelijk;
 - er zijn veel secundaire barrières ("traps") langs theoretische lekpaden;
 - de beschikbare CO₂ heeft een zeer hoge kwaliteit (chemisch zuiver).
- De eerste stap is een relatief klein veld (het Barendrecht veld), en is een logisch vervolg op het al lopende K12b project dat naar veel kleinere volumes kijkt.

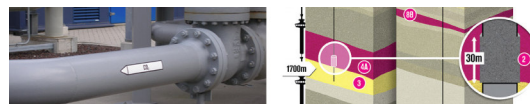


- Er zijn veel leereffecten, en deze komen snel beschikbaar:
 - met name heel brede leereffecten, bijvoorbeeld CCS in ETS (opt-in regeling), publieke acceptatie, MER/vergunningen (allemaal leereffecten die niet uit het offshore K12b project zijn te halen);
 - eerste veld is al in 3 jaar vol en doorloopt dus de hele levenscyclus (met cruciale afsluit- en overdrachtfases) in een zeer korte tijd.
- Belangrijke schakel (eerste stap) in beoogde CO₂-infrastructuur voor het Rijnmond gebied:
 - maakt gebruik van ervaring van OCAP die al jarenlang probleemloos CO₂ naar de kassen in het Westland transporteerd;
 - mogelijkheid van opslag is een belangrijke aanvulling voor de seizoensgebonden vraag naar CO₂ (in kassen).

Dit is het juiste moment voor een demonstratieproject:

- a) Het klimaatprobleem is urgent, er is breed draagvlak voor maatregelen, zoals blijkt op de reactie op de film 'An Inconvenient Truth' van Al Gore.
- b) Veel kleine gasvelden komen beschikbaar in de komende 5 à 10 jaar. Gezamenlijk kunnen ze een significante hoeveelheid CO₂ veilig opslaan. Indien de velden echter eerst worden afgesloten, zal het weer aansluiten duur en moeilijk zijn.
- c) Er is al heel veel en breed onderzoek gedaan. Hierbij is brede consensus ontstaan onder de experts, dat verdere ontwikkeling in de praktijk via demonstratieprojecten een logische volgende stap is (zie bijvoorbeeld AMESCO, 2007). Met name voor lege gasvelden zijn de lekkage risico's verwaarloosbaar.
- d) Via de ETS-regeling is het nu mogelijk om het CO₂ die opgeslagen wordt mee te tellen als emissiereductiemaatregel (via de opt-in regeling). Omdat Shell Pernis al onderdeel is van het ETS, betekent dit dat er inkomsten (of verminderde kosten) kunnen komen uit dit project.
- e) De overheid heeft "Schoon Fossiel" een icoon gemaakt in het beleid ("Schoon en zuinig" programma). Het doel is om voor 2020 voldoende ervaring te hebben opgedaan met CCS en ook alle relevante regelgeving moet er dan zijn. Om deze doelstelling te halen is het essentieel om zo spoedig mogelijk te beginnen met kleinere demo's die dan vervolgens rond 2015 gevolgd kunnen worden door wat grootschaliger integrale (capture techniek, transport en opslag) projecten.

De belangrijkste reden om nu nog geen grootschalige demonstratieprojecten te doen, is voornamelijk dat bij de afvang van CO₂ nog wat verder onderzoek en ontwikkeling nodig is, alvorens men CCS op grotere schaal kan gaan.



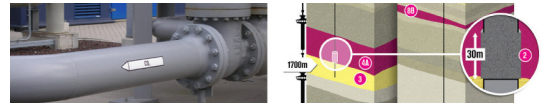
9. Referenties

Algemene referenties

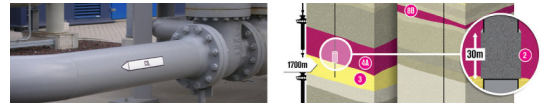
- Provincie Zuid-Holland (2008). Geothermie Provincie Zuid-Holland, Potentieelstudie en 10 haalbaarheidsanalyses, 2e concept, juni 2008.
- AMESCO (2007). Algemene Milieu Effecten Studie CO₂-opslag (AMESCO). Royal Haskoning, Ecofys, CE, TNO en Golder Associates, 1 juli 2007, Final Report, 9S0742.
- Commissie voor de m.e.r. (2007). Oordeel Commissie voor de m.e.r. op AMESCO, september 2007.

Detailonderzoek ondergrond

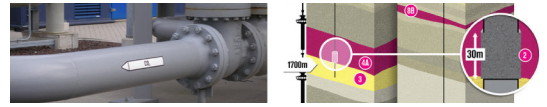
1. van Eijs, R. (2007). Risk management for stored CO₂; Migration from the Barendrecht (BRT) and Barendrecht-Ziedewij (BRTZ) fields. Shell EPE, report nr. EP200803210833.
2. Newstead, J. (2007). Barendrecht Field Review (Petrel Model) Audit Trail (CO₂ Injection Project). Shell EPE, report nr. EP200702202451.
3. Newstead, J. (2007). Barendrecht Ziedewij Field Review (Petrel Model) Audit Trail (CO₂ Injection Project). Shell EPE, report nr. EP200703209123.
4. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Paragraphs 5.2 - 5.7: Geophysics & Geology, Seismic interpretation and T/Z conversion, Petrophysics, Static model, Volumetrics: Deterministic HCIP calculation). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
5. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Chapter 7: Well integrity & abandonment design). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
6. Mulders, F.M.M., Gouwen, R., Orlic, B., Benedictus, T. (2007). Well Integrity for CO₂ storage in the fields Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B.
7. Orlic, B., Fokker, P., Geel, K. (2007). Cap rock and fault integrity for CO₂ Storage in Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B.



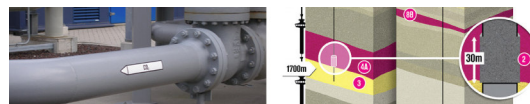
8. Dobrzinski, N. and Nortier, J.W. (2007). Sedimentology, petrography & reservoir quality of cores 1-3, in well BRT-1. PanTerra Geoconsultants B.V, report nr G610.
9. Baunack, C., Dobrzinski, N. and Nortier, J.W. (2007). Petrographical review of report G064 (GAPS, 1993) on well BRTZ-1 (Triassic middle and upper Bunter formations). PanTerra Geoconsultants B.V., report nr. G616.
- 10a. van Bergen, F., Tambach, T., Hofstee, C., David, P. (2008). Geochemical consequences of CO₂ injection in the Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B – revised.
- 10b. de Bruijn, J. (2008). Geochemical consequences for CO₂ storage in the BRT(-Z) fields; Summary. Shell EPE, report nr. EP200810202805.
11. van Eijs, R. (2008). Barendrecht (BRT) CO₂ sequestration: consequence from an irreversible stress path. Shell EPE, report nr. EP200803212403.
12. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Paragraph 13.7: Leak rate assessment and detection). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
13. Seeberger, F. (2008). Estimation of CO₂ expansion in case of vertical CO₂ leaks. Shell EPE, report nr. EP200810202508.
14. Pluymakers, M.P.D., Hofstee, C. (2007). Qualitative study of the fate and transport of CO₂ in the overburden of the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B.
15. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Paragraph 5.8: Reservoir engineering and dynamic modelling). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
16. Hofstee, C. & Seeberger, F. (2006). Assessment of the validity of the (De Lier) MoReS simulation model for CO₂ injection. Shell EPE/ TNO Built Environment and Geoscience, report nr. EP200701204646.



17. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Paragraph 5.85: Spill Risk Study / assessment). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
18. Hofstee, C. & Seeberger, F. (2007). The effect of CO₂ /CH₄ mixing on the reservoir pressure. Shell EPE/ TNO Built Environment and Geoscience, report nr. EP200706216714.
19. Hildenbrand, A., Schlomer, S., Krooss, B.M. (2002). Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks. Geofluids tijdschrift, juni 2005.
- 20a. Finlayson, L. (2007). Petrophysical Evaluation of the Barendrecht Field. Shell EPE, report nr. EPE200612208450.
- 20b. Finlayson, L. (2007). Petrophysical Evaluation of the Barendrecht-Ziedewij Field. Shell EPE, report nr. EPE200702202021.
21. Seeberger, F. (2008). Estimation of long-term pressure increase due to ongoing gas charge in Barendrecht. Shell EPE, report nr. EP200810203728.
22. Seeberger, F. (2008). Estimation of De-hydration effects due to injection of dry CO₂ in Barendrecht and Barendrecht Ziedewij. Shell EPE, report nr. EP200810202504.
23. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Chapter 6: Chemical interaction study). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
24. de Bruijn, J. (2008). Well cement degradation for CO₂ injection fields. Shell EPE, report nr. EP200710220925 – revision.
25. Newstead, J., Priebe, H., Sluijk, A., Lorenzo, M., Slaats, M., Seeberger, F., Bisschop, R., van Ojik, K., Trompert, R., de Bruijn, J., van Eijs, R., Finlayson, L., Haron, L. (2008). Technical Field Development Plan; Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage (Chapter 13: Monitoring plan & Leak detection). Shell EPE, report nr. EP200801218447.
26. Orlic, B., Fokker, P., Geel, K. (2006). Feasibility of CO₂ storage in De Lier Holland Greensand: Cap Rock and Fault integrity study. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2006-U-R0144/C.
27. Hugonet, V. (2008). Shallow gas considerations. Shell, Oct-08.

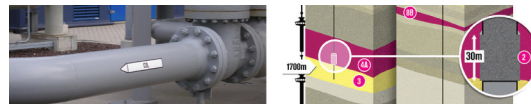


28. Wildenborg, T. van Bergen, F., Hofstee, C., Benedictus, T., Mulders, F., Orlic, B., Neele, F. (2007). Technical Investigations supporting the feasibility of effective and safe storage of CO₂ in the Barendrecht (BRT) and Barendrecht-Ziedewij (BRTZ) gas fields - Executive Summary. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B.
29. Neele, F.P. (2007). Monitoring plan for CO₂ injection in the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO Built Environment and Geoscience, report nr. 2007-U-R1057/B.
30. Hofstee, C., Seeberger, F. (2006). Discussion of possible CO₂ leakage dynamics via (abandoned) De Lier wells. Shell EPE/ TNO Built Environment and Geoscience, report nr. EP200701204438.
31. de Bruijn, J. (2007). CO₂ interaction with chalk. Shell EPE, report nr. EP200709215852.
32. NAM, 2008. Onderzoek naar het mogelijke oplossen van kalkgesteente en de mogelijke gevolgen ervan.

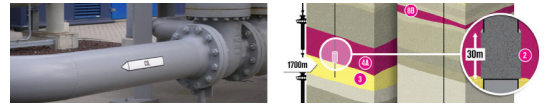


Afkortingen en begrippen

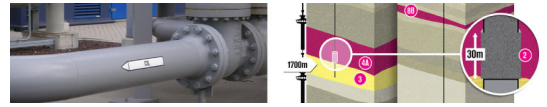
AMESCO	Algemene Milieu Effecten Studie CO ₂ Opslag
AMvB	Algemene Maatregel van Bestuur
BBR	Best Beschikbare Regelgeving
BBT	Best Beschikbare Techniek
Bevi	Besluit externe veiligheid inrichtingen
BRT	(locatie of veld) Barendrecht
BRTZ	(locatie of veld) Barendrecht-Ziedewij
BRT-x	put op locatie Barendrecht, nummer x
BRTZ-y	put op locatie Barendrecht-Ziedewij, nummer y
Brzo	Besluit risico's zware ongevallen
CATO	CO ₂ Afvang, Transport en Opslag
CCS	Carbon dioxide Capture and Storage
CDM	Clean Development Mechanism
DCMR	Dienst Centraal Milieubeheer Rijnmond
ECO	Exposure Concentration Obligation = stedelijke achtergrondconcentratie
EOR	Enhanced Oil Recovery
ETS	Emission Trading System
EU	Europese Unie
EZ	Minister(ie) van Economische Zaken
GBI	Gas Behandelings Installatie
GR	Groepsrisico
JI	Joint Implementation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
KISS	Keep It Smart and Simple, mobiele installatie met regelinstrumentatie
KWO	Koude Warmte Opslag (ook als WKO)
LAP	Landelijk Afvalbeheer Plan
m.e.r.	milieu effect rapportage
mer-commissie	Commissie voor de milieu effect rapportage
MER	Milieu Effect Rapport
MMA	Meest Milieuvriendelijk Alternatief
NAM	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
NEa	Nederlandse Emissieautoriteit

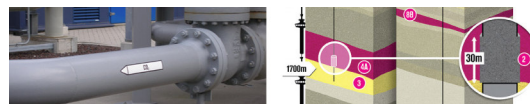


OCAP	Organic Carbon dioxide for Assimilation of Plants (OCAP v.o.f.), alsmede andere aan OCAP gelieerde ondernemingen, waaronder OCAP CO ₂ Transport BV.
PGS3	Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen 3
PR	Plaatsgebonden risico
QRA	Quantitative Risk Assessment
RCI	Rotterdam Climate Initiative
RGSP2	tweede Regionaal Groenblauw Structuurplan
RR2020	Ruimtelijk Plan Regio Rotterdam
SBN	Stichting Buisleidingenstraat Nederland
SCS	Shell CO ₂ Storage B.V.
SGHP	Shell Gasification Hydrogen Plant
SIEP	Shell International Exploration & Production
SNR	Shell Nederland Raffinaderij
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek
VG-document	Veiligheids- en Gezondheidsdocument
VN	Verenigde Naties
VROM	ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
Wabo	Wet algemene bepalingen omgevingsrecht
WKO	Warmte Koude Opslag (ook als KWO)
Wm	Wet milieubeheer
WVO	Wet Verontreiniging Oppervlaktewater



Appendix 1 Overzicht ervaringen met CO₂ en CO₂-opslag





1. Inleiding

Het huidige klimaatbeleid streeft ernaar om de uitstoot van broeikasgassen, zoals CO₂, terug te dringen. Een interessante mogelijkheid om dit op middenlange termijn (10-20 jaar) te realiseren is om de CO₂-uitstoot van grote puntbronnen (bijvoorbeeld elektriciteitscentrales) af te vangen en vast te leggen. Dit principe wordt carbon capture and storage, carbon capture and sequestration (CCS) of CO₂-opslag genoemd (voor meer informatie over CO₂-opslag, zie AMESCO, 2007). In dit document ligt de nadruk vooral op CO₂-opslag; de technieken en ervaringen met het afvangen en transporteren van CO₂ zullen minder uitvoerig besproken worden. De Nederlandse overheid zet fors in op CO₂-opslag om de doelstelling van 30% CO₂-emissie reductie ten opzichte van 1990, vastgesteld in het Coalitieakkoord 2007, te bereiken. Ook op andere locaties in de wereld speelt CO₂-opslag een belangrijke rol in het terugdringen van de CO₂-uitstoot. Hoewel er vrij veel kennis is op dit gebied, is er relatief weinig praktijk ervaring. Daarom is het van groot belang om goed op de hoogte te zijn van de praktische ervaring van CO₂-opslag projecten in het buitenland. Deze appendix geeft daarom een overzicht van de meest relevante internationale CO₂-opslag projecten.

1.1. Opties voor CO₂-opslag

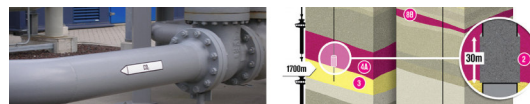
In Nederland richt men zich vooral op opslag van CO₂ in lege gasvelden. Omdat er vele andere opties zijn om CO₂ op te slaan volgt hieronder een kort overzicht van de beschikbare opties.

1. Oceaan. CO₂ wordt in de diepzee gepompt, waarna het oplost. Deze vorm van CO₂ opslag wordt door milieubewegingen hevig bekritiseerd, doordat mogelijk negatieve milieueffecten optreden als gevolg van verzuring van het zeewater.
2. Gemineraliseerd. CO₂ wordt vastgelegd (gefixeerd) in inorganische carbonaten, bijvoorbeeld silicaten. Dit proces bevindt zich in een onderzoeksfase, en is momenteel nog relatief inefficiënt omdat er op grote schaal mijnbouw is vereist.
3. Geologisch. Zowel onshore als offshore. Hier wordt pure (>95%) CO₂ onder druk naar geologische reservoirs gepompt. Binnen deze opslag vorm zijn verscheidene mogelijkheden. De meest gebruikte en geplande opties zijn opslag van CO₂ in lege gas- en olievelden en in aquifers, en in mindere mate opslag in niet-winnbare kolenlagen.

Door de relatief lage kosten, geringe milieueffecten en hoge mate van veiligheid, geniet geologische CO₂-opslag in vooral leeggeproduceerde olie- en gasvelden en aquifers momenteel de voorkeur.

Opslag in leeggeproduceerde olie- en gasvelden

Het voordeel van gas- en olievelden als CO₂-opslag reservoir komt voort uit het feit dat er al lange tijd (miljoenen jaren) aardgas heeft ingezet. Het injecteren van een ander gas brengt deze velden in principe dus weer in hun oude staat. In vergelijking met aquifers zijn deze gasvelden en olievelden goed bestudeerd, doordat er al jaren actief gewerkt (=gas geproduceerd) wordt. Bovendien wordt CO₂ al jaren de ondergrond ingepompt (vooral in de VS), omdat hiermee de productiviteit van een olieveld sterk verhoogd kan worden. Dit wordt EOR (enhanced oil recovery) genoemd.



Opslag in aquifers

Aquifers zijn met water gesatureerde (zandsteen) formaties. Voor CO₂-opslag zijn slechts de zogenaamde gesloten aquifers geschikt, omdat deze dezelfde eigenschappen hebben als een gasveld met betrekking tot de afdichting (caprock) en veiligheid van opslag. Deze gesloten aquifers staan dus niet in contact met andere aquifers, waardoor het water in deze lagen geen actief deel van het grondwatersysteem is. Verder is het water in deze diepe lagen niet geschikt voor consumptie vanwege het hoge zoutgehalte.

Opslag in niet winbare kolen lagen

Het is ook mogelijk om CO₂ op te slaan in niet-winbare kolenlagen, wat bijvoorbeeld wordt gedaan in Polen (RECOPOL: <http://recopol.nitg.tno.nl/index.shtml>).

Opslagcapaciteit

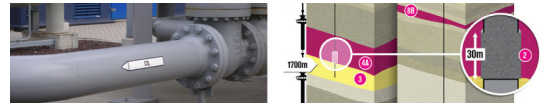
De potentiële opslagcapaciteit van aquifers is vele malen groter dan die van olie- en gasvelden. Dit wordt veroorzaakt door de grootschalige aanwezigheid van aquifers. In de Europese Unie (plus Noorwegen) is de totale opslagcapaciteit van aardgasvelden en olievelden geschat op 30 Gton (5 Gton voor olievelden en 25 Gton voor gasvelden). In dezelfde regio wordt de opslagcapaciteit van aquifers geschat op 800 Gton (EcoFys, 2003). Globaal gezien is de opslagcapaciteit van olie en gasvelden 920 Gton en voor aquifers 240 – 10 000 Gton. Niet-winbare kolenlagen in de EU hebben een opslagcapaciteit van 40 – 270 Gton. Uiteraard zijn deze schattingen onderhevig aan verschillende onzekerheden, maar duidelijk is dat aquifers meer opslagcapaciteit bieden.

1.2. Doel van deze appendix

Het doel van deze appendix is het bieden van een overzicht van CO₂-opslag projecten en hierbij opgedane ervaringen. Tevens wordt een overzicht gegeven van de natuurlijke analogieën aan CO₂-opslag reservoirs en incidenten veroorzaakt door het vrij komen van veel CO₂.

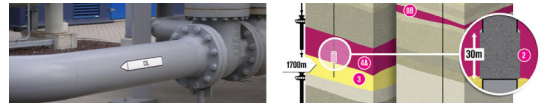
1.3. Afbakening

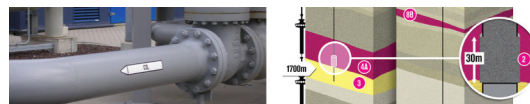
De geselecteerde projecten in dit overzicht zijn gericht op CO₂-opslag in uitgeputte gas- en olievelden en saline aquifers. Gezien het feit dat de meeste CO₂-opslag projecten zich richten op CO₂-opslag in aquifers of leeggeproduceerde gas- en olie reservoirs, wordt in deze bijlage niet ingegaan op CO₂-opslag in niet-winbare kolenlagen. Vanwege de grote hoeveelheid EOR (enhanced oil recovery) projecten, wordt een kleine selectie van deze projecten besproken. Een aantal van de besproken CO₂-opslag projecten is al afgerond, waardoor een grote hoeveelheid aan informatie beschikbaar is gekomen, bijvoorbeeld over milieueffecten en betrouwbaarheid van het opslag reservoir. Een verslaglegging van deze resultaten valt buiten het blikveld van deze appendix, maar waar mogelijk wordt een weblink bijgevoegd waarop meer informatie te vinden is.



1.4. Leeswijzer

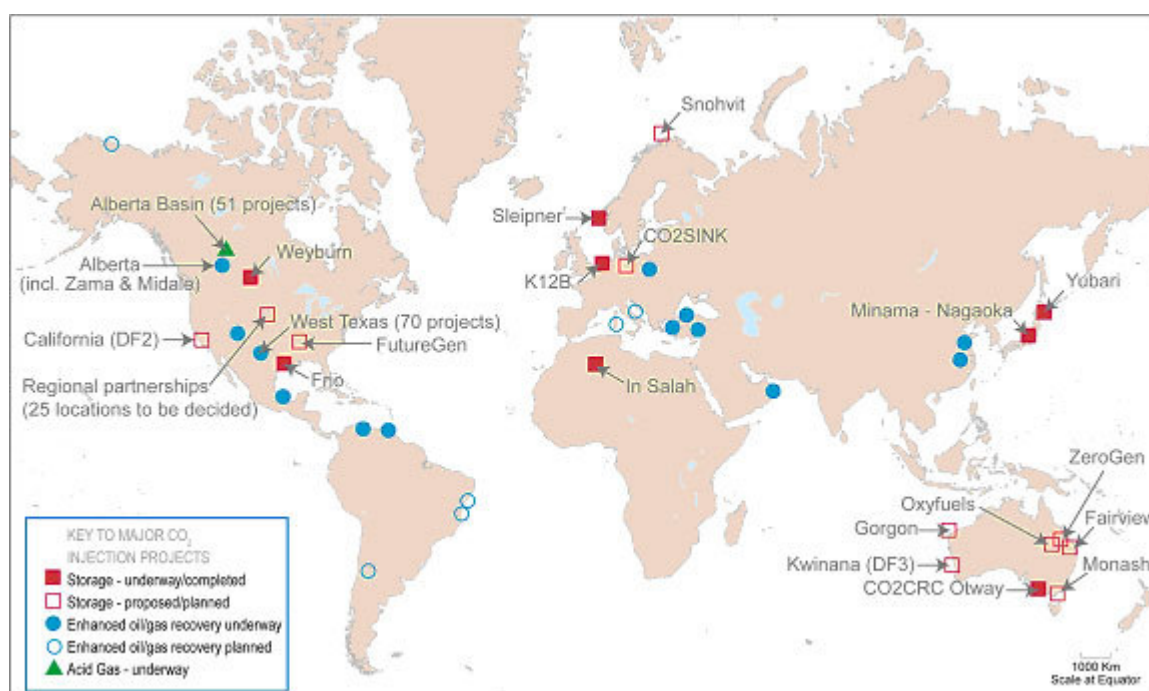
In het voorgaande stuk van deze appendix is uitgelegd wat de rol van CO₂-opslag is en op welke manieren CO₂-opslag kan worden toegepast. Na het definiëren van de afbakening wordt in hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van verschillende CO₂-opslag projecten in de wereld. Deze wordt gevolgd door een korte beschouwing over de overeenkomsten en verschillen die op het gebied van milieueffecten en monitoring in de literatuur te vinden zijn (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de natuurlijke analogieën aan CO₂-opslag reservoirs. Deze wordt gevolgd door een algemene discussie (hoofdstuk 5) en uiteindelijk zullen de ervaring samengevat worden (hoofdstuk 6).





2. Overzicht van CO₂-opslag projecten

Door de toenemende aandacht voor CO₂-opslag is wereldwijd het aantal CO₂-opslag projecten de laatste jaren enorm gegroeid. Omdat CO₂-opslag een relatief nieuw verschijnsel is, bevinden veel van deze projecten zich nog in de planningfase. Figuur A1-1 geeft een overzicht van de meest belangrijke voorbeelden van CO₂-opslag projecten die momenteel aangewezen kunnen worden. Let wel dat in deze figuur niet alle projecten die in dit document besproken worden staan aangegeven.



Figuur A1-1: Overzicht van CCS activiteiten in de wereld (bron: CO2CRC).

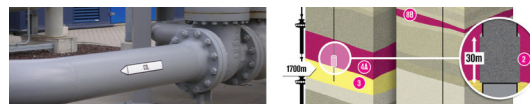
Hieronder volgt een karakterisering van verschillende relevante CO₂-opslag projecten.

2.1. Algerije (In Salah)

Projectinformatie: Dit is een van de CO₂-opslag projecten opgestart door StatoilHydro.

Projectstatus: Operationeel sinds 2004.

Locatie/reservoir: CO₂ dat wordt gescheiden van het aardgas, wordt in de buurt van één van de gasvelden opnieuw geïnjecteerd in een dieper hellingafwaarts gelegen, watergevuuld deel van de formatie waaruit het gas wordt gewonnen. Deze locatie is gelegen in de centrale Sahara regio van Algerije.



Technische informatie: CO₂ wordt afgevangen bij de aardgasproductie. Vanaf 2004 wordt er 1,2 Mton per jaar opgeslagen. De geplande injectiehoeveelheid was meer dan 0,9 Mton per jaar, met een totale injectie van 17 Mton over de gehele productieperiode.

Milieuaspecten: Het reservoir ligt in dezelfde lagen als het aardgas dat gewonnen wordt, maar wordt op een veilige afstand van dit gas geïnjecteerd. Omdat het reservoir een aardgasveld met een deklaag is, waarin het gas al miljoenen jaren veilig opgeslagen lag, wordt de opslag van CO₂ in dit reservoir als veilig beschouwd.

Bijzonderheden: Naar verluidt is men hier begonnen met injectie (augustus 2004) voordat er een monitorstrategie was vastgesteld.

Meer informatie:

<http://www.statoilhydro.com/en/TechnologyInnovation/ProtectingTheEnvironment/CarbonCaptureAndStorage/Pages/CO2InjectionInSalahAlgeria.aspx>

http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php?project_id=71

2.2. Australië

Wetgeving: combinatie van olie-, gas-, milieu- en veiligheidswetgeving. Verschillende wetgeving is van toepassing op verschillende aspecten van CO₂-opslag. CO₂-opslag projecten van geval tot geval toegestaan tot er CO₂-opslag wetgeving beschikbaar is (AMESCO, 2007). In 2005 is een beleidsrapport opgesteld, waarin specifiek wordt ingegaan op het reguleren van CO₂-opslag projecten in Australië (Regulatory Guiding Principles for Carbon Dioxide Capture and Geological Storage; te downloaden van:

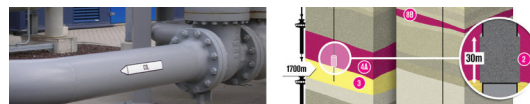
<http://www.monashenergy.com.au/pdfs/ccsregulatoryprinciples.pdf>).

2.2.1. Gorgon

Projectinformatie: Het Gorgon Gaswinningsproject is een samenwerking tussen Chevron (50%), Shell (25%) en ExxonMobile (25%).

Projectstatus: Gaswinning en CO₂-injectie starten rond 2012-2013.

Locatie/reservoir: De Dupuy laag is gelegen op een diepte van ongeveer 2.700 - 3.000 meter onder Barrow Island. Dit eiland ligt ongeveer 130 km uit de kust van het vasteland van de staat West-Australië.



Technische informatie: Het is de bedoeling om het CO₂, die wordt gescheiden van het aardgas dat in de off-shore velden wordt gewonnen, te injecteren in de Dupuy watervoerende laag. Transport van dit afgevangen CO₂ gebeurt per onderzeese pijpleiding. Per jaar zal 3 tot 4 Mton CO₂ geïnjecteerd worden in het reservoir, dat een totale opslagcapaciteit van 125 Mton heeft. De CO₂-opslag periode zal ongeveer 40 jaar zijn.

Milieuaspecten: Voor dit project is een milieueffectrapportage gemaakt en deze is ook gepubliceerd. Onlangs is ook een eerste dataput geboord en een omvangrijke studie naar de ondergrond in het gebied is ook gestart.

Bijzonderheden: Het Gorgon gasveld is het grootste gasveld van Australië en het project wordt het grootste CCS project met betrekking tot aardgas.

Meer informatie:

<http://www.co2crc.com.au/>

<http://www.doir.wa.gov.au/4415.aspx>

<http://www.gorgon.com.au/>

2.2.2. Latrobe Valley

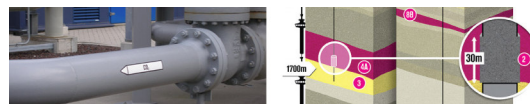
Projectinformatie: De partners in dit project zijn Monash Energy, Anglo American en Shell.

Projectstatus: De start van dit project is gepland in 2015, maar door mogelijke problemen met olieproducenten in de regio van het reservoir, wordt de injectie waarschijnlijk uitgesteld

Locatie/reservoir: Het reservoir voor CO₂-opslag is een leeg gasveld dat ligt in het Gippsland Basin op 2750-3000m diepte. CO₂ wordt door middel van pijpleidingen naar dit offshore reservoir getransporteerd.

Technische informatie: Bruinkool uit Latrobe Valley (de goedkoopste kool in Australië) wordt gedroogd en vergast voor de productie van synthetische diesel (uiteindelijk is waterstof productie gepland). Hierbij wordt CO₂ afgevangen (tot 10 Mt per jaar) en getransporteerd naar een leeg gasveld dat is gelegen in het Gippsland Basin.

Milieuaspecten: Dit is een groot project en is opgebouwd uit fases en voor elke fase wordt een meer gedetailleerde milieueffectenrapportage gemaakt.. Voor dit project is een uitgebreide scenario-studie gedaan naar de ontwikkeling van het reservoir (inclusief milieueffecten en risico's) bij verschillende CO₂-injectiesnelheden (2 Mton/jaar, 15 Mton/jaar en 30 Mton/jaar). Uit de analyses die tot nu toe zijn gedaan is gebleken dat het transport en de betrouwbaarheid van het reservoir ruimschoots voldoen aan de eisen, en dat het project dus groen licht heeft gekregen om zich verder te ontwikkelen.



Bijzonderheden: Door de gunstige locatie heeft dit project de potentie om als katalysator werken als de kosten van CO₂-afvang omlaag gaan, omdat overige elektriciteitscentrales en andere processen op bruinkool in of nabij Latrobe Valley gebruik kunnen maken van de opgebouwde infrastructuur.

Meer informatie:

<http://www.monashenergy.com.au/>

Cook, 2007 en Hooper et al., 2005.

2.2.3. Otway Project

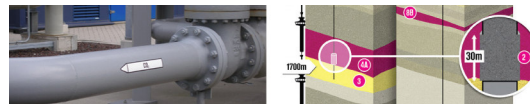
Projectinformatie: Grootschalige pilot studie welke door CO₂CRC wordt uitgevoerd onder de naam CRC-1.

Projectstatus: injectie gestart in april 2008.

Locatie/reservoir: Het Otway basin ligt in zuidoost Australië, waar zich een reservoir met CO₂ en methaan bevindt. Het CO₂ zal worden afgevangen en door middel van een pijpleiding in vloeibare toestand worden getransporteerd naar een injectieput 2,25 km verderop. Vanuit deze put wordt het CO₂ geïnjecteerd in een uitgeput gasveld (het Naylor-veld, gelegen in de Waare formatie) op 2100m diepte. Dit gebied bevindt zich op het land in een dunbevolkt gebied, Nirranda South.

Technische informatie: Dit project bestaat uit 2 fases. In fase 1 wordt het opgepompte gas zonder bewerking direct terug geïnjecteerd in het lege gasveld. Fase 2 wordt CO₂ afgevangen en 97% pure CO₂ wordt geïnjecteerd. In 2008 begint de injectie die duurt tot in 2009, in totaal 100 000 ton CO₂.

Milieuaspecten: Dit project wordt gekenmerkt door een uitgebreid monitoringsprogramma (monitoring & verification; M&V), begeleid door observaties en modelering. Met dit project wil men belanghebbenden demonstreren dat CO₂-opslag een duurzame lange termijn optie is die publiekelijk geaccepteerd kan worden. Dit project stimuleert de ontwikkeling en optimalisatie van monitoring technieken voor, tijdens en na de CO₂-injectie. Men hoopt het vertrouwen in CO₂-opslag te verhogen door aan te tonen dat de ontwikkelingen van het project prima voorspelbaar zijn, door middel van gedetailleerde modellen. Tijdens de gehele projectfase loopt tevens een 'QRA' (quantified risk assessment) en deze wordt bij elke ontwikkeling bijgewerkt. Naast deze technische aspecten wordt ook het publiek zo veel mogelijk betrokken en op de hoogte gehouden, om de acceptatie van het project te stimuleren.



Bijzonderheden: Er is niets bekend over eventuele bezwaren van landeigenaren en bewoners en hoe hiermee omgegaan is. Wel is bekend dat alle belanghebbenden nauw bij de planning van het project betrokken zijn geweest. Deze samenwerking wordt uitgebreid uitgevoerd onder de naam 'Otway Basin Pilot Project Community Consultation Plan'.

Meer informatie: <http://www.co2crc.com.au/>

2.2.4. ZeroGen

Projectinformatie: Primair initiatiefnemer en uitvoerder is ZeroGen Pty Ltd, eigendom van de staat Queensland.

Projectstatus: Start gepland eind 2011.

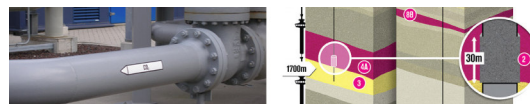
Locatie/reservoir: Het is de bedoeling om het gas op te slaan in zoutwatervoerende lagen in de ondergrond van de staat Queensland (Dension Through), 220 km van de kolenvergasser. Transport door middel van pijpleidingen. Er zijn twee putten geboord ten behoeve van CO₂-opslag. Als het uittesten van de putten gunstig verloopt, zal er een besluit over de verdere voortgang van het project worden genomen.

Technische informatie: Het Zerogen project in Australië wordt waarschijnlijk een van de eerste grote CO₂-afvang en -opslagprojecten dat gekoppeld is aan een kolenvergassingselektriciteitscentrale die 300 MW kan opwekken.

Milieuaspecten: Mens en milieu worden expliciet genoemd in het project en het is dan ook de bedoeling dat er een uitgebreide samenwerking met alle belanghebbenden tot stand komt om de uitvoering van het project zo goed mogelijk te laten verlopen. Voor, tijdens en na de CO₂-injectie fase ligt er ook een sterke nadruk op het identificeren en monitoren van eventuele risico's.

Bijzonderheden: Het reservoir is een onshore reservoir, waardoor de samenwerking met de lokale belanghebbenden sterk benadrukt wordt.

Meer informatie: <http://www.zerogen.com.au/>



Naast deze uitgebreide projecten zijn er in Australië nog meer CCS demonstratie projecten gepland (CO₂CRC, 2008)

- Callide OxyFuel project (Queensland)
- DF3 Kwinana project (West-Australië)
- Fairview project (Queensland)
- Coolimba Power project (West-Australië)
- FuturGas project (Zuid-Australië)
- Hazelwood en Loy Yang PCC project (Victoria)
- HRL IDGCC project (Victoria)
- Moomba Carbon Storage project (Zuid-Australië)
- Munmorah PCC project (New South Wales)

Omdat het hier uitsluitend om plannen gaat wordt hier verder niet op in gegaan. Voor meer informatie: www.co2crc.com.au.

2.3. Canada (Weyburn-Midale, Saskatchewan)

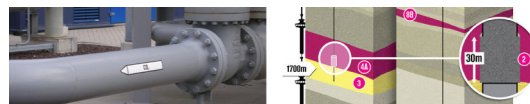
Wetgeving: De wetgeving in de staat Saskatchewan beperkt zich voornamelijk tot wetgeving betreffende CO₂-EOR en zuurgasinjectie. Specifieke wetgeving voor CO₂-opslag projecten wordt in de loop van 2008 verwacht (AMESCO, 2007).

Projectinformatie: CO₂-EOR (EOR = Enhanced Oil Recovery) geïnitieerd door EnCana (voorheen Pan Canadian), resulterend in huidige samenwerking tussen verschillende industriële- en overheidspartijen.

Projectstatus: Olie wordt gewonnen sinds 1954, CO₂-EOR operationeel sinds 2000.

Locatie/reservoir: CO₂ wordt geïnjecteerd in een gedeeltelijk leeggeproduceerd olieveld (Weyburn-Midale) op een diepte van 1.500 meter, waar al sinds 1954 olie gewonnen wordt. CO₂ is afkomstig van een kolenvergassingsinstallatie in Dakota (USA) en wordt via een 320 km lange pijpleiding naar Weyburn getransporteerd.

Technische informatie: Het Weyburn veld in Canada is technisch gezien een project voor verbeterde oliewinning (EOR), maar wordt ook beschouwd als voorbeeld van CO₂-sequestratie en wordt voortdurend gemonitord en geëvalueerd met dit doel voor ogen. Afwisselend worden CO₂ en water geïnjecteerd in het gedeeltelijke leeg geproduceerde olieveld. De CO₂-injectiehoeveelheid bedroeg 0,18 Mton per jaar. Naar verwachting zal de komende 30 jaar 30 Mton CO₂ kunnen worden opgeslagen. Dit is ongeveer tweederde van de totale geïnjecteerde hoeveelheid, want de rest komt, samen met de gewonnen olie, weer naar boven. Dit deel wordt echter opnieuw afgescheiden en geherinjecteerd, zodat aan het einde van de EOR periode, al het geïnjecteerde CO₂ is opgeslagen.



Milieuaspecten: In een rapport uit 2004 over dit project wordt geconcludeerd dat de geologische omstandigheden in het Weyburn olieveld gunstig zijn voor langdurige CO₂-opslag, en dat die opslag gemonitord zou kunnen worden met nieuwe instrumenten en technologie die speciaal daarvoor zullen worden ontwikkeld in de loop van het project. IEA (2008) geeft aan dat inmiddels 5 Mt CO₂ is opgeslagen in dit veld, zonder een teken van lekkage.

Bijzonderheden: Het project is in het jaar 2000 begonnen en wordt wijd en zijd als een succes beschouwd.

Meer informatie:

http://www.ptrc.ca/weyburn_overview.php

http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php?project_id=70

2.4. China

CCS is voor China een belangrijke mogelijkheid om de CO₂-emissie terug te dringen. Momenteel zijn er enkele plannen om CCS projecten op te starten, maar het succes van deze plannen is sterk afhankelijk van investeringen door westerse landen.

2.5. Denemarken (Kalundborg)

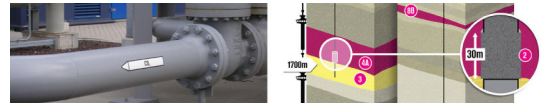
Wetgeving: Voor onshore CO₂-opslag projecten geldt de Deense wet (offshore CO₂-opslag projecten vallen onder het OSPAR-verdrag). In Denemarken zijn er nog geen wetten specifiek voor CCS projecten, maar dergelijke activiteiten zijn wel MER-plichtig.

Projectinformatie: Dit project is een van de 4 case-studies die worden uitgevoerd binnen het CO₂store programma. In eerste instantie is het een scenario studie van een potentieel te realiseren CO₂-opslag project. Het CO₂store programma liep van 2003 tot 2006 en de relevante bevindingen zijn uitgebreid beschreven in Chadwick et al., 2008.

Projectstatus: Scenario studie afgerond.

Locatie/reservoir: In 2003 is uit het GESTCO project gebleken dat er op 15 km afstand van de CO₂-puntbron een geschikt opslag reservoir ligt (onshore), in de vorm van een saline aquifer. Deze aquifer bestaat uit poreus zandsteen en is gelegen op ongeveer 1500m diepte en heeft een oppervlakte van ongeveer 160 km². Omgerekend geeft dit een opslagcapaciteit van 900 miljoen ton CO₂, overeenkomende met 150 jaar CO₂-emissies door de twee genoemde puntbronnen.

Technische informatie: In de stad Kalundborg zijn 2 geschikte puntbronnen van CO₂ aanwezig: een kolengestookte centrale Asnæsværket en de Statoil Refiniery.



Milieuaspecten: Voor deze case wordt een drietal afvang- en opslag scenario's geformuleerd en geanalyseerd (afhankelijk van de CO₂-productie door de puntbronnen) met de kennis en ervaringen uit eerdere projecten zoals SACS en GESTCO.

Naast het uitvoerig bestuderen van de (geologische) eigenschappen van het reservoir is ook de risicoanalyse een belangrijk onderdeel binnen dit project. Gedeeltelijk is dit al afgerond en de resultaten staan op de website van CO₂store (www.co2store.org). Hierin zijn de potentiële risico's van CO₂-opslag op mens en milieu specifiek voor dit project geïdentificeerd.

Bijzonderheden: Het is niet duidelijk of dit project daadwerkelijk uitgevoerd gaat worden, of dat het bij een scenarioanalyse blijft.

Meer informatie:

<http://www.geus.dk>

(voor resultaten: <http://www.geus.dk/program-areas/energy/denmark/co2/co2store-dk.htm>)

<http://www.co2store.org/>

2.6. Duitsland

Wetgeving: In Duitsland is momenteel vooral de Mijnbouwwet van belang voor CO₂-opslag projecten.

2.6.1. CO₂SINK

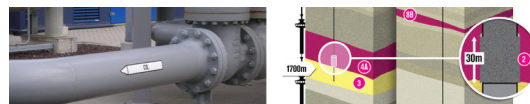
Projectinformatie: CO₂SINK is een Europees onderzoeksproject gecoördineerd door GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ).

Projectstatus: gestart in 2004

Locatie/reservoir: In de Stuttgart formatie onder een leeg gasveld (250-400m diepte) ligt een geschikte saline aquifer op 700m diepte die als CO₂-opslag reservoir kan dienen. De locatie van dit reservoir is Ketzin, gelegen 30 km van Berlijn. Deze aquifer is uitgebreid bestudeerd en het gedrag van CO₂ in dit reservoir is gesimuleerd tot jaren na de injectie.

Technische informatie: Binnen relatief korte tijd (2 jaar) wordt 60.000 ton CO₂ geïnjecteerd. Transport gebeurt over de weg en dus niet via pijpleidingen.

Milieuaspecten: De injectie mag beginnen als met voldoende zekerheid is vastgesteld dat het project veilig is en dat de milieueffecten acceptabel zijn. Dit heeft onder andere geresulteerd in de identificatie van 69 risico's, die door middel van een serie workshops tot stand zijn gekomen.



Bijzonderheden: Het reservoir is gelegen in een bewoond gebied wat heeft geleid tot publieke weerstand. In de jaren '60 heeft er zich vlakbij Ketzin een lekkage incident voort gedaan, waarbij een heel dorp (Knoblauch) permanent geëvacueerd is, wat bij de meeste inwoners van Ketzin tot twijfels leidt. Over dit incident zijn echt weinig details bewaard gebleven (British Geological Survey, 2008), maar door het incident wordt dit project als unieke kans gezien om de publieke acceptatie van CCS te verhogen. In dit project ligt de nadruk dan ook op communicatie en interactie met de omgeving.

Meer informatie:

<http://www.gfz-potsdam.de>

<http://www.co2sink.org/>

2.6.2. Jänschwalde, Schwarze Pumpe

Projectinformatie: Dit project is een van de 4 case-studies die worden uitgevoerd binnen het CO₂store programma. In eerste instantie is het een scenario studie van een potentieel te realiseren CO₂-opslag project. Case-studie leider is Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) en de grootste partner is de Zweedse energieproducent Vattenfall. Het CO₂store programma liep van 2003 tot 2006 en de relevante bevindingen zijn uitgebreid beschreven in Chadwick et al. (2008). Vattenfall gaat dit project verder uitvoeren.

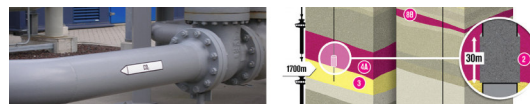
Projectstatus: Scenario studie afgerond, haalbaarheidstudies en de aanvraag van vergunningen worden in 2008 en 2009 uitgevoerd door Vattenfall. Het ombouwen van de bestaande centrale bij Jänschwalde staat gepland voor 2011.

Locatie/reservoir: Het CO₂Store programma toonde aan dat een geschikt CO₂-opslag reservoir (aquifer) in de Schweinwich structuur ligt. Deze structuur ligt recht onder het dorpje Schweinwich. De opslagcapaciteit van het reservoir is 400 Mton CO₂, en het is de bedoeling dat over 40 jaar kan worden opgeslagen. Omdat deze studie tot nu toe een scenario studie is, is er (nog) geen sprake van publieke weerstand. Vattenfall laat weten dat alle optie nog open staan en een uitvoerige studie moet uitwijzen wat de uiteindelijke opslaglocatie gaat worden.

Technische informatie: De CO₂-uitstoot van een oxyfuel kolencentrale wordt afgevangen en opgeslagen. Vlakbij de bestaande kolen electriciteitscentrale in Jänschwalde (3000 MWe), wordt momenteel een 30 MW onderzoeksfaciliteit gebouwd. Uiteindelijk worden in de bestaande centrale 2 blokken van 250 MW gereed gemaakt voor CO₂-afvang, zowel postcombustion als precombustion.

Milieuaspecten: Het huidige onderzoek binnen dit project richt zich op het simuleren en voorspellen van de CO₂-stromen en het uitvoeren van een lange termijn risicoanalyse.

Bijzonderheden: geen.



Meer informatie:

<http://www.co2store.org/>

http://www.vattenfall.com/www/co2_en/co2_en/879177tbd/879231demon/879320demon/index.jsp

2.7. Engeland (the Valleys)

Wetgeving: In Engeland is er alleen wetgeving voor CO₂-EOR gerelateerde activiteiten (e.g. Petroleum Wet en Vervuilingsbeheersing Wet). Er is nog geen datum vastgesteld voor specifieke CCS wetgeving (AMESCO, 2007). In Engeland is momenteel ook een overheidstender voor postcombustion CCS projecten.

Projectinformatie: Dit project is een van de 4 case-studies die zijn uitgevoerd binnen het CO₂store programma. In eerste instantie is het een scenario studie van een potentieel te realiseren CO₂-opslag project. Het CO₂store programma liep van 2003 tot 2006 en de relevante bevindingen zijn uitgebreid beschreven in Chadwick et al. (2008). Deze specifieke casus onderzoekt de potentie van het toepassen van CO₂-opslag bij een geplande elektriciteitscentrale.

Projectstatus: Potentiaalstudie studie gedeeltelijk afgerond.

Locatie/reservoir: Er is nog geen duidelijkheid over een geschikt reservoir voor de afgevangen CO₂, omdat het aantal geschikte reservoirs in de buurt van de kolencentrale erg laag is. De meest geschikte optie is zandsteen formatie, maar omdat het niet duidelijk is of deze formatie betrouwbaar genoeg is, wordt er gewerkt aan een uitgebreide 3D modelering van dit reservoir en de omgeving (CO₂store, 2006; Chadwick et al., 2008).

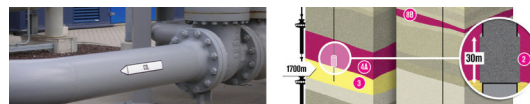
Technische informatie: Progressive Energy Ltd ontwikkelt momenteel plannen om een 450MW kolencentrale te bouwen (coal gasification combined cycle; CGCC) in South Wales. De verwachtingen zijn dat er per jaar 2,46 Mton CO₂ afgevangen wordt. Het afgevangen CO₂ wordt getransporteerd via een pijpleiding, die eerst 90 km over hetland loopt en daarna nog 45 km door de zee naar het offshore reservoir.

Milieuaspecten: Voor dit reservoir is tevens een kwalitatieve risicoanalyse uitgevoerd, waaruit bleek dat lekkage bij de put en overdruk in het reservoir de grootste risico's waren (CO₂store, 2006). Dit laatste risico komt voort uit het feit dat het nog niet geheel duidelijk of de deklaag van het reservoir voldoende afsluit.

Bijzonderheden: In Engeland worden veel plannen voor CO₂ opslag gemaakt. Voor een overzicht zie Gibbins, Jon. "Overview of UK CCS activities.", May 23 - 24, 2007

Meer informatie: <http://www.co2store.org/>

Chadwick et al., 2008.



2.8. Frankrijk (Lacq Pilot)

Wetgeving: Tot nu toe zijn er alleen specifieke wetgeving van toepassing als het om pure CO₂ gaat. Vooral zijn hierbij de Waterwet en Mijnbouwwet van toepassing op CO₂-opslag proefprojecten.

Projectinformatie: De Lacq Pilot is een CO₂-opslag project dat uitgevoerd wordt door Total. Het doel is vooral om praktische kennis en ervaring over het afvangen en opslaan van CO₂ te vergaren. Lacq richt zich vooral op de toepasbaarheid van CO₂-opslag op industriële schaal. Vanwege de parallel met het CO₂-opslag project wat in Barendrecht gepland staat, verdient dit project extra aandacht. Een van de speerpunten is om aan te tonen dat door oxy-fuel techniek te gebruiken, de kosten van CO₂-afvang sterk omlaag gebracht kunnen worden. Het ontwikkelen van monitoring tools, technieken en methoden tijdens de opslag fase is ook een belangrijke speerpunt, die meer inzicht dient te geven in de lange termijn levensvatbaarheid van CO₂-opslag.

Projectstatus: In voorbereiding. Start CO₂-injectie gepland in eind 2008.

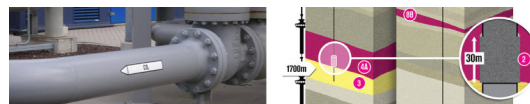
Locatie/reservoir: Het meest geschikte reservoir in de buurt van de CO₂-bron (Lacq) is het Rousse veld, gelegen op 4500m diepte. Dit is een leeg gasveld dat niet in de buurt zit van een aquifer, en zelf weinig water bevat. In dit reservoir heeft aardgas van 35 miljoen jaar oud gezeten met een druk van 400 bar. Het gebied rondom dit gasveld is dunbevolkt, en de werkwijze van Total is zoveel mogelijk transparant en communicatie met belanghebbenden is een belangrijke speerpunt (Chauvin, 2008).

Technische informatie: In dit project wordt de CO₂-emissie van een 30 MW industriële boiler afgevangen (200 ton/dag) en getransporteerd naar een leeg gasveld 27 km verderop. Transport wordt gedaan via (grotendeels) ondergrondse pijpleidingen met afsluitmechanismen onderweg.

Milieuaspecten: Momenteel wordt gewerkt aan een milieueffectenstudie die zich vooral richt op de lucht- en waterkwaliteit in het gebied. Een aantal specifieke monitoring technieken zullen worden gebruikt in deze pilot:

- De bewegingen van CO₂ zullen gemonitord worden met trace-monitoring,
- Temperatuur en druk metingen langs de gehele put
- CO₂-concentratie metingen in de omliggende bodems
- Continue metingen van micro-seismische activiteit door middel van netwerk sensoren.

Deze technieken zijn uitvoerig getest op andere gas- en olie win locaties, waaronder gaswinning in het Lacq-veld. Tijdens de gasproductie fase van dit gasveld heeft zich nooit een incident voorgedaan. Berekeningen binnen een risicoanalyse hebben aangetoond dat de kans op een grote lekkage erg klein is. Bovendien een dergelijke lekkage alleen mogelijk onder heel specifieke omstandigheden, met als gevolg dat in een korte tijd in een klein gebied een hoge CO₂-concentratie ontstaat.



Bijzonderheden: Voor dit project is een speciaal Scientific Committee opgesteld, die de taak heeft het project in goede banen te leiden en de ervaringen van dit project te vertalen naar duidelijke aanbevelingen.

Meer informatie: <http://www.total.com/en/corporate-social-responsibility/special-reports/capture/>

2.9. Japan (Nagaoka project)

Wetgeving: Er bestaan momenteel geen relevante wetten met betrekking tot CO₂-opslag projecten. Mogelijk worden dergelijke wetten pas in 2011-2016 gedefinieerd (AMESCO, 2007).

Projectinformatie: In Japan is RITE (Research Institute of Innovative Technology for the) bezig met een CO₂ opslag demonstratieproject (genaamd Nagaoka project). Het doel van het project was onder andere om de beschikbare monitoringstechnieken te gebruiken om de ontwikkelingen voor, tijdens en na de injectie te volgen, en tevens te deze technieken te testen op hun toepasbaarheid

Projectstatus: Injectiefase afgerond. Er wordt nog actief gemonitord.

Locatie/reservoir: Het CO₂-opslag reservoir voor dit project is een zandstenen aquifer, gelegen op 1100 m diepte bij Nagaoka, 200 km ten noorden van Tokyo. Over publieke weerstand op deze locatie is niets bekend.

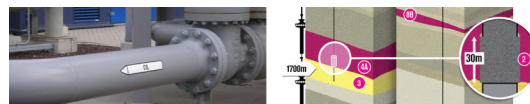
Technische informatie: tussen 2003 en 2005 is ongeveer tienduizend ton CO₂ in een aquifer geïnjecteerd.

Milieuaspecten: Omdat dit een demonstratieproject is, zijn er vele wetenschappelijke publicaties over de verschillende bevindingen, bijvoorbeeld op het gebied van het uittesten van monitoringstechnieken.

Bijzonderheden: Ten tijde van de injectie deden zich enkele interessante ontwikkelingen voor. Zo werd de injectie tijdelijk opgeschort, doordat er niet genoeg aanvoer van CO₂ was en werd door een aardbeving de injectie tijdelijk stop gezet. Het effect van deze voorvallen op de veiligheid en betrouwbaarheid van de injectie faciliteit en het reservoir zijn uitvoerig bestudeerd en gepubliceerd in verschillende wetenschappelijke publicaties. De aardbeving heeft overigens geen lekkages veroorzaakt.

Meer informatie: www.rite.or.jp

In Japan zijn nog vele andere CO₂-opslag projecten actief, waaronder CO₂-opslag project waarbij CO₂ wordt opgeslagen in niet winbare kolenlagen. Voor meer informatie over dit onderwerp: www.coal-seq.com.



2.10. Nederland

Dit project vindt plaats in Nederlandse wateren op de Noordzee, dus de Nederlandse wetgeving voor CCS (Mijnbouwet, MER-plicht) is van toepassing op dit project (AMESCO, 2007). Verder is zoals bij alle offshore CO₂-opslag projecten het OSPAR-verdrag van toepassing.

Projectinformatie: Sinds 2004 wordt er, op experimentele basis, CO₂ geïnjecteerd in het K12-B veld door Gaz de France. Dit project is onderdeel van het CASTOR (CO₂ from Capture to Storage) programma. CASTOR is een Europees initiatief dat zich vooral toespitst op de post-combustion afvang van CO₂.

Projectstatus: Operationeel sinds 2004.

Locatie/reservoir: Het K12-B veld is een uitgeput gasveld, dat ongeveer 100 km uit de kust ligt in de Nederlandse sector van de Noordzee. Het reservoir ligt op 3.800 meter onder de zeebodem. Oorspronkelijk werd er gas uit gewonnen, en nu wordt het dus gebruikt voor injectie. Het reservoir ligt in het Boven-Slochteren Laagpakket.

Technische informatie: Het CO₂ is afkomstig uit in de buurt gewonnen aardgas en wordt ter plaatse van het gas gescheiden. Uit de testen is gebleken dat hier probleemloos 0,02 Mton/jaar kan worden geïnjecteerd. Het ligt in de bedoeling de injectiehoeveelheid op te voeren tot 0,48 Mton CO₂ per jaar

Milieuaspecten: Monitoren tijdens de testfase bestond uit het vergelijken van de in de putten waargenomen druk en temperatuur, met de tijdens de modellering voorspelde druk en temperatuur

Bijzonderheden: geen.

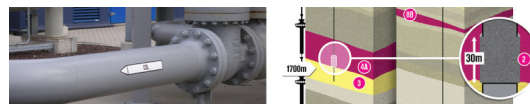
Meer informatie:

<http://www.co2castor.com/>

<http://www.k12-b.nl/>

2.11. Noorwegen

Wetgeving: In Noorwegen vallen CO₂-opslag projecten onder de Petroleum Wet en de emissies van broeikasgassen onder de Milieubeschermingswet. Verder heeft Noorwegen een koolstof-tax, wat CO₂-opslag projecten een interessant alternatief maakt.



2.11.1. Mongstad

Projectinformatie: Dit project is een van de 4 case-studies die zijn uitgevoerd binnen het CO₂store programma. In eerste instantie is het een scenario studie van een potentieel te realiseren CO₂-opslag project. Het CO₂store programma liep van 2003 tot 2006 en de relevante bevindingen zijn uitgebreid beschreven in Chadwick et al. (2008). Voor deze casus wordt gekeken naar Midden Noorwegen, waar Industriekraft Midt-Norge van plan is een aardgas gestookte WKK-centrale met CO₂-afvang te bouwen in Trondheimsfjorden. Na afloop van het CO₂Store programma is het project overgenomen door onder andere Vattenfall en Shell.

Projectstatus: WKK-centrale is gereed in 2010.

Locatie/reservoir: Offshore, maar nog niet exact bekend. Het GETSCO project toonde al aan dat er in de omgeving van deze locatie enkele geschikte reservoirs (aquifers) liggen, met een totale opslagcapaciteit van 100 000 Mt CO₂. Dit project bevindt zich momenteel nog in de ontwikkelingsfase, waarin het meest geschikte reservoir wordt gezocht.

Technische informatie: De WKK-centrale gaat 280 MW aan electriciteit, 350 MW aan warmte en ongeveer 2 Mton CO₂ produceren. Verder zijn er in de buurt van deze centrale nog een aantal puntbronnen die gezamenlijk goed zijn voor nog eens 2,5 Mton CO₂ per jaar. Vanwege haalbaarheidsaspecten wordt op een kleinere schaal (100.000 ton per jaar) CO₂ afgevangen en opgeslagen. Transport van de afgevangen CO₂ naar het offshore reservoir gebeurt door middel van pijpleidingen.

Milieuaspecten: Als een besluit is gemaakt over de exacte locatie van het reservoir, zal een brede risicoanalyse uitgevoerd worden.

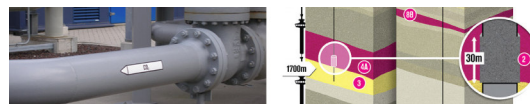
Bijzonderheden: geen.

Meer informatie:

<http://www.co2store.org/>

http://www.vattenfall.com/www/co2_en/co2_en/879177tbd/879231demon/879283demon/index.jsp

Chadwick et al., 2008.



2.11.2. Sleipner

Projectinformatie: Oorspronkelijk is dit project voor commerciële doeleinden gestart door StatoilHydro. Naast de commerciële interesse draagt dit project grootschalig bij aan de wetenschappelijke en praktische aspecten van CO₂-opslag projecten. Dit project heeft onder andere geleid tot de start van het SACS (Saline Aquifer Carbon Storage) programma, dat is opgevolgd door het onlangs afgeronde CO₂store programma.

Projectstatus: Operationeel sinds oktober 1996.

Locatie/reservoir: Het reservoir waarin het CO₂ wordt geïnjecteerd is een saline aquifer, gelegen in de Utsira formatie (800-1000m). Deze formatie wordt overkoepeld door 800m steen met hoge dichtheid (impermeabel voor water en gas).

Technische informatie: Teveel CO₂ in gas, dus besloten om CO₂ eruit te halen (9%) en direct permanent op te sluiten in het reservoir. De injectiesnelheid bedraagt ongeveer 1 miljoen ton per jaar sinds oktober 1996.

Milieuaspecten: De uitbreiding van de zone die wordt beïnvloed door de CO₂-injectie kan worden gevolgd met behulp van opeenvolgende seismische opnames. Tot nu toe hebben zich geen lekkages of andere milieu gerelateerde incidenten voorgedaan. Verder heeft dit project voor een groot deel aangetoond dat voortijdige simulaties en modellen betrouwbaar zijn en dat verschillende monitoringstechnieken geschikt zijn bevonden.

Bijzonderheden: Dit is het eerste commerciële CO₂-opslag project ter wereld, gedreven door de te hoge kosten van CO₂-emissie naar de atmosfeer (CO₂-tax in Noorwegen).

Meer informatie:

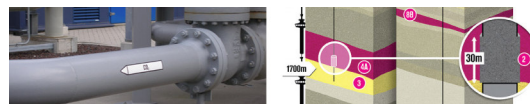
<http://www.statoil.com/statoilcom/SVG00990.NSF/web/sleipneren?opendocument>

<http://www.statoil.com/statoilcom/SVG00990.NSF?OpenDatabase&artid=01A5A730136900A3412569B90069E947>

http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php?project_id=26

2.11.3. Snøhvit

Projectinformatie: Dit is het eerste LNG (liquified natural gas) productie project van Europa, gestationeerd in het Arctisch gebied. De uitvoerder is StatoilHydro. Dit project is onderdeel van het CASTOR (CO₂ from Capture to Storage) programma. CASTOR is een Europees initiatief dat zich vooral toespitst op de post-combustion afvang van CO₂.



Projectstatus: injectie gestart in 2008 (planning was 2006).

Locatie/reservoir: De afgevangen CO₂ wordt geïnjecteerd in de 2600m diepte gelegen Tubåsen zandsteen formatie (aquifer).

Technische informatie: Vanuit het Snøhvit gasveld wordt aardgas met 5-8% CO₂ naar een gasproductie faciliteit op het vasteland gepompt (locatie Melkøya). Hier wordt het CO₂ grotendeels gescheiden en de pure afgevangen CO₂ wordt teruggepompt naar Snøhvit via een 143 km² lange pijpleiding, waar het wordt opgeslagen in het reservoir. De maximale injectie snelheid is 0,7 Mt per jaar.

Milieuaspecten: Voor dit project is een uitgebreide milieueffecten studie gedaan van meer dan 2000 pagina's. Tevens worden de ontwikkelingen van het CO₂-opslag project op de voet gevolgd door de toepassing van verschillende monitoringstechnieken.

Bijzonderheden: In april 2008 werd door StatoilHydro een persbericht uitgegeven waarin stond dat er als pionier op dit gebied ook wel degelijk problemen ondervonden werden. Zo draait de opslag faciliteit momenteel op 60% van haar capaciteit, omdat er problemen waren met het koelsysteem. Dit probleem heeft als consequentie dat de geplande doelstellingen voor CO₂-reductie is 2007 niet zijn gehaald. In hetzelfde bericht stond tevens dat een samenwerkingsproject met Shell International (het Halten carbon capture, storage and enhanced oil recovery project) eind 2007 vroegtijdig afgebroken, doordat de kosten te hoog werden.

Meer informatie:

<http://www.co2castor.com/>

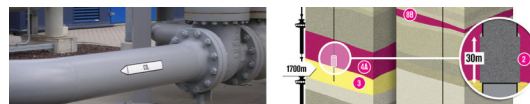
<http://www.snohvit.com/STATOILCOM/snohvit/svg02699.nsf?OpenDatabase&lang=en>

2.12. Oostenrijk (CO₂CASTOR)

-informatie m.b.t. wetgeving ontbreekt (nog)-

Projectinformatie: Rohoel AG overweegt om van een bijna uitgeput gasveld een CO₂-opslag reservoir te maken, om tevens de uitvoerbaarheid van EGR (enhanced gas recovery) te onderzoeken. Dit project is onderdeel van het CASTOR (CO₂ from Capture to Storage) programma. CASTOR is een Europees initiatief dat zich vooral toespitst op de post-combustion afvang van CO₂.

Projectstatus: In voorbereiding.



Locatie/reservoir: Het Atzbach-Schwanenstadt gasveld in het centrale deel van Noord-Oostenrijk is bijna uitgeput. Het gasveld bevindt zich op 1600m diepte in een zandsteen formatie. Simulaties hebben uitgewezen dat het gasveld een veelbelovend CO₂-opslag reservoir is en een opslagcapaciteit heeft van 14,5 Mton (overeenkomend met 50 jaar opslag van emissies door de onderstaande twee puntbronnen).

Technische informatie: De meest geschikte CO₂ bronnen zijn een papierfabriek en een kunstmest fabriek, die een gezamenlijke uitstoot van 0,3 Mton CO₂ per jaar hebben. Opvallend is dat de CO₂-transport per vrachtwagen uitgevoerd wordt.

Milieuaspecten: Het project wordt verder gebruikt om onshore seismische monitoringstechnieken te testen en een uitvoerige risicoanalyse en evaluatie uit te voeren over de verschillende stadia van de CO₂-opslag activiteit.

Bijzonderheden: Uit de voorlopige resultaten is gebleken dat de eigenschappen van het reservoir ervoor zorgen dat EGR (enhanced gas recovery) geen effectieve optie is, omdat het resterende gas als snel besmet raakt met het geïnjecteerde CO₂.

Meer informatie: <http://www.co2castor.com/>

2.13. Spanje (CO2CASTOR)

Projectinformatie: Het Casablanca olieveld (2500m onder de zeebodem) is aan het eind van zijn productieve bestaan. Repsol wil dit veld gebruiken voor CO₂-injectie en opslag van CO₂ uit de Tarragona raffinaderij, gelegen aan de kust op 43 km van het olieveld. Dit project is onderdeel van het CASTOR (CO₂ from Capture to Storage) programma. CASTOR is een Europees initiatief dat zich vooral toespitst op de post-combustion afvang van CO₂.

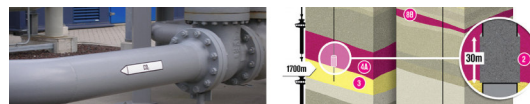
Projectstatus: Plan.

Locatie/reservoir: Het Casablanca olieveld, 2500m onder de zeebodem, 43 km uit de kust van Spanje.

Technische informatie: De jaarlijkse CO₂-injectie bedraagt 0,5 Mton.

Milieuaspecten: De focus van dit project ligt vooral bij het in kaart brengen en evalueren van het reservoir en de geochemische reacties van CO₂ met carbonaten in het olieveld.

Bijzonderheden: geen.



Meer informatie: <http://www.co2castor.com/>

2.14. Verenigde Staten

Wetgeving: Voor CCS activiteiten zijn in de VS de volgende wetten van toepassing: (1) Grondwaterbeschermingswet, (2) Schone Lucht Wet (Clean Air Act) en (3) het Ondergronds Injectie Gezag (Underground Injection Control). In Amerika wordt CO₂-afvang en opslag overigens al sinds lange tijd toegepast op vele locaties, voornamelijk voor de inzet bij CO₂-EOR (Damen, 2003). Figuur 2 gaf al aan dat er alleen in West-Texas al meer dan 70 EOR projecten lopen. Onderstaand wordt een kleine selectie van enkele interessante CO₂-opslag activiteiten in de Verenigde Staten besproken.

2.14.1. Frio Brine Pilot

Projectinformatie: Het Frio project is een kleinschalige pilot, uitgevoerd door de universiteit van Texas, met als doelstelling de haalbaarheid van grootschalige CO₂-opslag in hetzelfde gebied te onderzoeken. Aan dit project is ook een uitgebreid internationaal onderzoeksteam verbonden. In bredere zin wil men met dit project laten zien dat CO₂-opslag in een saline aquifer (brine formation = pekel formatie) geen nadelige effecten op de gezondheid, veiligheid en het milieu met zich meebrengt.

Projectstatus: Injectie afgerond in oktober 2004.

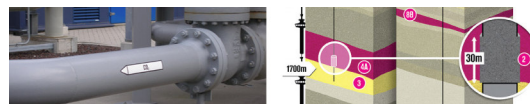
Locatie/reservoir: CO₂ is geïnjecteerd in een saline aquifer (zandsteen) reservoir 1500m diepte in de Frio Formatie onder de oceaانبodem bij Texas.

Technische informatie: In oktober 2004 heeft het Frio Brine Pilot team 1600 ton CO₂ geïnjecteerd. Sinds de afsluiting van de injectieputten is er veel monitoring uitgevoerd en de laatste update is van april 2005, 8 maanden na de injectie.

Milieuaspecten: Alle relevante potentiële milieueffecten worden gedetailleerd gemonitord. Tot nu toe is er nog geen enkel spoor van eventuele negatieve effecten op de gezondheid, veiligheid en het milieu gevonden. Monitoring van deze effecten is een continu proces en het onderzoeksteam blijft dit de komende jaren doen. Vele partijen zijn bij het monitoringsonderzoek betrokken en ook van buitenaf is er veel belangstelling voor deze tot nu toe succesvolle CO₂-opslag demonstratie.

Bijzonderheden: Omdat de injectiefase al is afgerond geeft dit project de mogelijkheid om het effect van de gebruikte monitoringstechnieken en modellen voor en tijdens de injectiefase te evalueren, evenals de inzetbaarheid van monitoringstechnieken na de injectiefase. Vooral over de post-injectie fase is zeer weinig bekend, dus de uitkomsten van dit project geven belangrijke informatie over de lange termijn veiligheid van ondergronds opgeslagen CO₂.

Meer informatie: <http://www.beg.utexas.edu/enviroqlty/co2seq/fieldexperiment.htm>



2.14.2. FutureGen

Projectinformatie: FutureGen, opgezet door het Amerikaanse ministerie van energie (department of energy), is een grootschalig plan om een ZEP (zero emission powerplant) te bouwen, die uiteindelijk waterstof moet gaan produceren uit kolen.

Projectstatus: Planning afgebroken in januari 2008, herstart in 2008.

Locatie/reservoir: De locatie voor het bouwen van de centrale is Mattoon, Illinois. Dit is tevens de locatie van het reservoir, dat zich in de Mt. Simon formatie bevindt. Over de exacte gang van zaken en interactie met belanghebbenden is niets bekend.

Technische informatie: Het CO₂ die vrijkomt bij het kolenvergassingsproces wordt afgevangen en opgeslagen

Milieuaspecten: De plannen voor dit project zijn nog niet het stadium waarin specifiek iets gezegd kan worden over milieuaspecten. Wel is duidelijk dat in dit CO₂-opslag project de milieueffecten wel degelijk in beschouwing worden genomen.

Bijzonderheden: In 2008 heeft het Amerikaanse ministerie van energie (department of energy) zich als hoofdsponsor teruggetrokken en is het project afgeblazen door te hoge kosten. Als reactie is de FutureGen Alliance opgericht die het project alsnog probeert te realiseren. De verwachte startdatum ligt ergens in 2016.

Meer informatie: <http://www.futuregenalliance.org/>

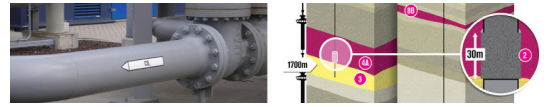
2.14.3. Teapot Dome

Projectinformatie: De Teapot Dome in de VS is een onderzoeksproject voor CO₂-injectie in het kader van verbeterde oliewinning (EOR = Enhanced Oil Recovery) voor Anadarko Petroleum Company. Dit project wordt gezien als voorbereiding voor een grootschalig EOR project in de directe omgeving, waarbij uiteindelijk 55 Mton van het geïnjecteerde CO₂ opgeslagen zou blijven.

Projectstatus: Operationeel sinds 2004.

Locatie/reservoir: Het Teapot Dome veld is een groot olie- en gasveld in Wyoming (WY).

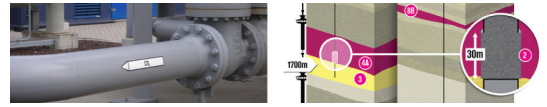
Technische informatie: CO₂ voor de EOR is afkomstig van ExxonMobil's Shute Creek gas processing facility en bedraagt ongeveer 2,2 Mton CO₂ per jaar



Milieuaspecten: Omdat het hier om CO₂-opslag in een olieveld gaat, kan dit project een waardevolle bijdrage leveren aan de kennis over CO₂-opslag in olievelden, als gevolg van EOR activiteiten. Dit project wordt dan ook gezien als testlocatie voor verschillende technieken die de ontwikkelingen in de bodem en boven de grond na CO₂-injectie in kaart kunnen brengen.

Bijzonderheden: In het gebied zijn al ongeveer 1300 putten geslagen en de winninggegevens van het veld gaan wel 80 jaar terug.

Meer informatie: http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php?project_id=111

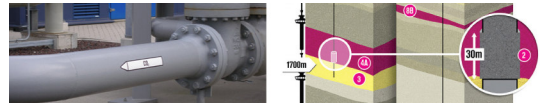


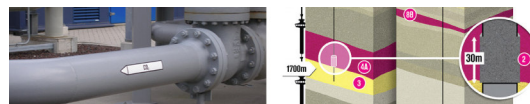
3. Milieueffecten en monitoring

Binnen de literatuur blijkt er een vrij goede overeenstemming in de erkenning van de risico's en gevaren van CO₂-opslag te zijn. Deze risico's en milieueffecten zijn uitgebreid beschreven en geanalyseerd in AMESCO (2007) en DNV (2006). Door de uitgebreide ervaringen met gas en olie winning projecten is er ook een goed beeld van de technieken en methoden die geschikt zijn om de effecten van CO₂-opslag te monitoren. In 2008 heeft de IEA een soort universele procedure (Measurement, monitoring and verification; MM&V) opgesteld, die uitgevoerd kan worden in nieuwe en bestaande CO₂-opslag projecten en gericht is op een aantal hoofdzaken:

- injectie snelheid en eigenschappen van CO₂ bij injectie
- ondergrondse verstoringen door CO₂
- betrouwbaarheid van de injectie-put
- lokale milieueffecten
- post-injectie monitoring

In de meeste gevallen bestaat de techniek die gebruikt voor monitoring uit een nieuwe toepassing van bestaande technieken. Voor specifieke informatie over welke technieken gebruikt kunnen worden voor de verschillende monitoringsaspecten wordt verwezen naar: AMESCO, 2007; DNV, 2006; IEA, 2008 en Schlumberger, 2007.





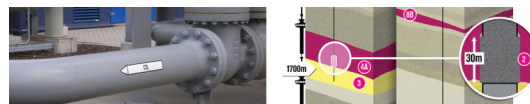
4. Natuurlijke CO₂-reservoirs

Op veel plekken in de wereld zijn bij olie- en gasboringen natuurlijke ophopingen van CO₂ gevonden. Deze ophopingen kunnen worden beschouwd als zogenaamde natuurlijke analogen voor de verschillende opties voor CO₂-opslag reservoirs, omdat zij informatie geven over de lange termijn effectiviteit van geologische CO₂-opslag (het CO₂ in deze reservoirs zit vele miljoenen jaren ingesloten). In sommige gevallen is door natuurlijke of menselijke oorzaak zelfs een lekkage ontstaan, waardoor het CO₂-reservoir een natuurlijke CO₂-bron is geworden. In de Verenigde Staten worden bijvoorbeeld opzettelijk CO₂-reservoirs aangeboord, voor de inzet van CO₂ bij EOR projecten.

In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op deze natuurlijke CO₂-bronnen, omdat het interessant is om te kijken hoe deze bronnen tot stand zijn gekomen en wat de geologische kenmerken hiervan zijn. Wereldwijd wordt er veel onderzoek gedaan naar natuurlijke CO₂-reservoirs en bronnen ten behoeve van CO₂-opslag. Er zijn op dit gebied een aantal grote gecoördineerde programma's actief:

- NASCENT (Europa)
 - Hongarije: Mihályi-Répcelak en Mátraderecske
 - Italië: Latera geothermal field
 - Duitsland: Vorderrhön
 - Frankrijk: Montniral
 - Griekenland: Florina
- NACS (Verenigde Staten)
 - McElmo Dome
 - St. Johns-Springerville Dome
 - Bravo Dome
 - Sheep Mountain
 - Jackson Dome
- GEODISC (Australië)
 - Katnook (Otway Basin)
 - Ladbroke Grove (Otway Basin)
 - Bowen Basin
 - Carnarvon Basin

CO₂ komt van nature voor in de meeste gasreservoirs in Nederland (zie figuur 3.7). De database van TNO, DINOShop, geeft aan dat, in Nederland, de concentratie van CO₂ in aardgasaccumulaties onder het vasteland en buitengaats tussen de 0% and 77% bedraagt. De meeste gasaccumulaties bevatten minder dan 10% CO₂. Hieruit blijkt dat CO₂-opslag ook onder natuurlijke omstandigheden voorkomt in Nederland. Soms wordt in een dergelijk veld, waarvan het meeste gas uit CO₂ bestaat, een exploratieboring gezet in de verwachting aardgas te vinden. In dat geval wordt het veld onmiddellijk permanent verlaten. In Nederland is een aantal malen een dergelijke put geboord. De



meeste gasaccumulaties met een bijzonder hoog CO₂-gehalte bevinden zich in laagpakketten van Jura en Trias ouderdom in de Roerdalslenk. Put WED-01 in het Werkendam gasveld boorde bijvoorbeeld gas aan met een zeer hoog CO₂-gehalte (77Mol%) in de Werkendam Formatie van de Altena Groep op een diepte van ongeveer 2.000 meter (Verweij, 2006). In put WED-03 is ook gas met een hoog CO₂-gehalte (72Mol%) aangetroffen op een diepte van ongeveer 2.800 meter in zandsteen van Trias ouderdom (Neele, 1994). Deze accumulaties kunnen worden gebruikt als analogieën voor CO₂-opslag in gasvelden in Nederland (AMESCO, 2007).

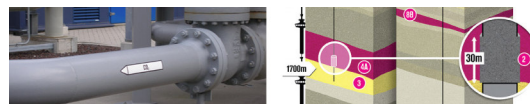
Hieronder wordt een overzicht gegeven van de Europese projecten (binnen het NASCENT programma), met een korte beschrijving van de belangrijkste karakteristieken van de locaties. De informatie in deze beschrijvingen is vooral afkomstig van de NASCENT website: <http://www.bgs.ac.uk/nascent/home.html>. Voor een overzicht van alle projecten binnen de bovengenoemde programma's, zie: Stevens et al., 2001. Naast deze beschrijvingen wordt ook kort ingegaan op twee speciale gevallen: (1) de Nyoos ramp in Kameroen; een incident waar vaak naar wordt verwezen in de discussie over de veiligheid van CO₂-opslag en (2) Mommoth Mountain in de Verenigde Staten, wat een natuurlijke CO₂-lekkage is.

4.1. Hongarije: Mihályi-Répcelak

In Hongarije zijn twee interessante voorbeelden van natuurlijke CO₂-ophopingen. De eerste is het Mihályi-Répcelak gebied, wat is ontdekt in 1933. Door proefboringen naar olie en gas is in dit gebied per toeval in 1935 een CO₂ reservoir aangeboord, waaruit bleek dat er zich bijna pure CO₂ (94,6%) op een diepte van 1600 m bevond. Dit CO₂ is ontstaan in dezelfde geologische tijd als de tijd waarin olie en aardgas gevormd zijn (voornamelijk het Carboon). Na verdere boringen bleek er een enorme voorraad ondergronds CO₂ in dit gebied te liggen, wat vanaf de jaren '50 commercieel gewonnen wordt. De jaarlijkse productie van dit gebied ligt in de orde van 60 miljoen m³ CO₂. Vanaf 1993 is dit gebied eigendom van Linde Gas Ltd. Tegenwoordig wordt CO₂ in dit gebied vooral gewonnen uit ondiepere zandlagen in plaats van de diepere zandsteen formaties die men in de jaren '50 aanboorde. De natuurlijke lekkage in dit gebied is erg laag en wordt als ongevaarlijk beschouwd. Voor zover bekend zijn er dan ook geen meldingen van incidenten betreffende te hoge CO₂-concentraties in dit gebied.

4.2. Hongarije: Mátradereske

Als gekeken wordt naar diffuse uitstromen van CO₂ uit het natuurlijke reservoir, is de situatie in Mátradereske niet geheel vergelijkbaar met de ongevaarlijke situatie in Mihályi-Répcelak. Door de ligging van dit dorp hebben de inwoners te maken met CO₂-uitstromen die wel als gevaarlijk worden beschouwd, wat zich vooral uit in hoge concentraties CO₂ in lage gebieden die slecht geventileerd zijn, zoals kelders van huizen. Deze ophopingen van CO₂ in slecht geventileerde ruimtes zijn overigens ook de situaties waarin (fatale) incidenten zich meestal voordoen. Mátradereske is een klein dorpje gelegen in centraal Hongarije in het Matra gebergte, ontstaan uit vulkanen in het Mioceen. De natuurlijke CO₂-uitstroom in dit gebied is het gevolg van vele breuken en scheuren in de ondergrond, waardoor CO₂ uit de diepte omhoog migreert en uiteindelijk ontsnapt naar de atmosfeer. Dit uit zich vooral in putten en beken, waarin CO₂ als belletjes omhoog komt en sterk CO₂-verrijkte mineraal water bronnen.



De inwoners van Mátradereske hebben zich prima aan kunnen passen aan de lokale situatie, want met behulp van simpele en goedkope maatregelen wordt CO₂ uit kelders en andere risico locaties gehouden. Het is zelfs zo dat de CO₂-uitstroom een medicinale functie vervult, in de vorm van 'spa's' die gezond zijn voor circulatie problemen.

4.3. Italië: Latera

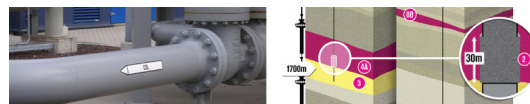
Latera (gelegen in de 'Latera vulkanische caldera') is sinds de jaren '70 van de vorige eeuw een bekende onderzoekslocatie op het gebied van geothermische energie. Echter, ver hiervoor was Latera al bekend om zijn carbonaat rijke bronnen en CO₂-rijke gas uitstromen. Wetenschappers denken dat het CO₂ in dit gebied afkomstig is van geologische processen waarbij carbonate mineralen worden afgebroken. Door de afsluitende deklagen boven de reservoirs bestaan deze CO₂-reservoirs al meer dan 100 000 jaar. Lokale bewoners in dit gebied wonen al duizenden jaren boven de geologisch actieve CO₂ reservoirs.

4.4. Duitsland: Vorderrhön

In 1994 werd na een periode van 100 jaar de CO₂-productie in het Werra potash (kali, K₂CO₃) district (Vorderrhön) aan banden gelegd. In deze 100 jaar is bijna 530 miljoen kg CO₂ geproduceerd door een Oost Duits bedrijf en later door Air Liquide de France. Het CO₂ in ingesloten onder de Werra zoutlagen in de zogenaamde Rotliegende en Zechstein afzettingen en zou het gevolg zijn van vulkanische activiteit in het gebied tijdens het Mioceen. De deklagen boven de CO₂-reservoirs in dit gebied zijn vrijwel impermeabel (ondoorlatend) voor gas en water. Interessant aan deze natuurlijke CO₂-ophoping is dat het CO₂ zich bevindt op 1000 m diepte in superkritische toestand (dezelfde toestand van het gas die wordt gebruikt bij CCS). Uit een studie van Brune et al. is gebleken dat er geen lekkages van CO₂ naar de oppervlakte aanwezig zijn, waarmee de lange termijn betrouwbaarheid van CO₂-opslag onder zoutlagen wordt bevestigd.

4.5. Frankrijk: Montmiral

Tijdens de vorming van de Alpen en Pyreneeën is door vulkanische activiteit op sommige locaties in Frankrijk CO₂ afgezet. Tijdens proefboringen naar olie, geothermische bronnen en mineraalwater bronnen zijn op verschillende locaties natuurlijke CO₂-ophopingen geïdentificeerd, soms op een diepte van 2400 m. In 1961 werd een CO₂-ophoping bij Montmiral ontdekt en sinds 1990 wordt dit reservoir voor commerciële doeleinden gebruikt. Typisch voor deze gebieden is dat CO₂ ingesloten is in zandsteen uit het Trias en migreert langs breuken ontstaan in onder andere het Tertiair. Diffuse migratie van CO₂ komt in deze gebieden ook voor, maar in mindere mate. Hoewel er een aantal CO₂-reservoirs in Frankrijk bekend zijn, is het niet bekend of er zich in de geschiedenis incidenten met betrekking tot deze CO₂ hebben voorgedaan. Daarom is het aannemelijk dat er weinig hinder wordt ondervonden van het wonen/leven onder of in de buurt van natuurlijke CO₂-reservoirs.



4.6. Griekenland: Florina

Het Florina CO₂-reservoir, gelegen nabij de grens van Griekenland met Macedonië (Former Yugoslav Republic of Macedonia; FYROM), werd bij toeval ontdekt in de jaren '60 tijdens proefboringen naar ligniet. Vanaf 1980 wordt hier CO₂ geproduceerd, waarbij de levensduur van een put minder dan een jaar is, door problemen met sterk verzuurd water en CO₂. Het CO₂ in dit gebied komt voor op dieptes tussen 180 en 260 meter, boven, tussen en onder de ligniet afzettingen. Waarschijnlijk is CO₂ hier opgehoopt als gevolg van de omzetting van kalksteen op grotere dieptes en vulkanische activiteit in een basin 25 km verderop. In dit reservoir wordt de correlatie tussen seismische activiteit en lekkage van CO₂ onderzocht.

4.7. Nyoos in Kameroen

In 1986 vond er een incident plaats in het Nyoos meer in Kameroen, waarbij plotseling 1.6 miljoen ton CO₂ vrij kwam (overeenkomend met ongeveer een kubieke kilometer). Dit pure CO₂ is zwaarder dan lucht waardoor een laag CO₂ van enkele tientallen meters dik via de bergwand naar beneden zakke en vervolgens binnen enkele uren bijna 1700 slachtoffers eiste, doordat de lucht werd verdrongen door CO₂.

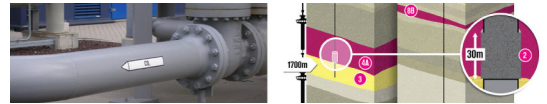
Een vergelijkbaar incident deed zich 2 jaar eerder (1984) ook al voor in Kameroen bij het meer van Monoun, waarbij 37 slachtoffers vielen.

In de discussie over CO₂-opslag wordt vaak aan deze incidenten gerefereerd. Wat er zich in Kameroen voordeed, zijn zogenaamde limnische uitbarstingen, die uitsluitend in vulkanisch actief gebied voorkomen. Hierbij hoopt een enorme hoeveelheid opgelost CO₂ zich op in het meer (dat in de krater van een vulkaan ligt), waarna dit ineens vrij komt in een uitbarsting die waarschijnlijk veroorzaakt wordt door plotselinge vulkanische activiteit.

De geologische omstandigheden die dit incident veroorzaakten zijn fundamenteel verschillend van de geologische omstandigheden in speciaal aangewezen CO₂-opslag reservoirs. Immers, in CO₂-opslag projecten vindt de opslag plaats in sedimentaire gesteenten, die ver weg liggen van vulkanisch actieve gebieden. Bovendien zijn de hoeveelheden vrijgekomen CO₂ in Kameroen extreem veel (miljoenen keer) groter dan de hoeveelheid CO₂ die mogelijk vrijkomt bij eventuele lekkages van CO₂-opslag reservoirs. Hierdoor is het niet reëel om de effecten van het incident in Kameroen te vergelijken met de eventuele risico's bij CO₂-opslag projecten in Nederland.

4.8. Mammoth Mountain (Verenigde Staten)

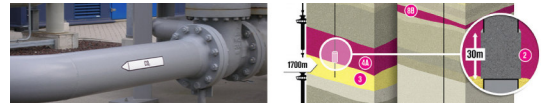
Mammoth Mountain is een berg in de Sierra Nevada in Californië (VS) van 3371m hoog en is ontstaan uit een langdurig en traag vulkanisch proces. Deze berg staat bekend om zijn uitzonderlijke CO₂-uitstoot, waardoor verschillende incidenten met dodelijke afloop zijn veroorzaakt. Elke dag komt er rond deze berg 50 tot 150 ton CO₂ vrij, met als gevolg dat de bodem en atmosfeer (bij de grond) sterk verrijkt zijn met CO₂, variërend van 20 – 90%. Dit heeft ernstige gevolgen op het milieu, want over een oppervlakte van bijna 0,7 vierkante kilometer zijn alle bomen gestorven. Hierdoor is kamperen in bepaalde zones rond de berg verboden. Naast CO₂ komen ook gevaarlijke concentraties waterstofsulfide (H₂S) voor, die het gevolg zijn van vulkanische activiteit. Sinds 2003

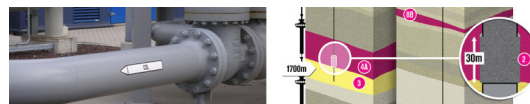


worden de CO₂-concentraties en andere relevante ontwikkelingen op de voet gevolgd. Omdat Mammoth Mountain is gelegen in een vulkanisch actief gebied (de laatste eruptie van Mammoth Mountain was ongeveer 600 jaar geleden), is het CO₂ waarschijnlijk afkomstig van ontgassing van magma en kalksteenrijk gesteente dat wordt verhit door magma. Het bijzondere is dat het CO₂ rond deze berg een opvallend gelijke chemische en isotopen samenstelling heeft, waardoor wetenschappers vermoeden dat het CO₂ afkomstig is van een groot ondergronds reservoir. Via breuken en scheuren zou het CO₂ kunnen migreren naar de oppervlakte.

Meer informatie:

<http://lvo.wr.usgs.gov/CO2.htm> en http://en.wikipedia.org/wiki/Mammoth_Mountain.

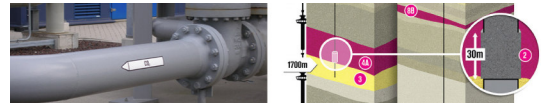


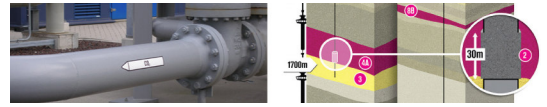


5. Algemene discussie

Uit de besproken voorbeelden blijkt dat de natuurlijke CO₂-reservoirs vooral voorkomen in gebieden waar vulkanische activiteiten plaatsvinden of hebben gevonden. Deze bevinding wordt onderbouwd door te kijken naar de locaties van overige natuurlijke CO₂-ophopingen en/of bronnen (buiten Europa), zoals Yellowstone en Mammoth Mountain in de VS. Ondanks de relatief hoge kans op seismische activiteiten waardoor breuken en scheuren kunnen ontstaan, lijken de natuurlijke CO₂-ophopingen en bronnen relatief stabiel te zijn. Toch is dit niet altijd het geval, wat wordt aangetoond door de aanwezigheid van natuurlijke CO₂-reservoirs in Nederland. Hierin is CO₂, wat bijvoorbeeld vrijkomt bij de vorming van steenkool, gemigreerd naar ondiepere lagen waar het wordt ingesloten in accumuleert in een reservoir. Bij het zoeken naar geschikte reservoirs in CO₂-opslag projecten wordt vooral gekeken naar sedimentaire afzettingen, die niet verbonden zijn met vulkanisch actieve gebieden, zoals de reservoirs in Nederland. De kans op vulkanische of seismische activiteiten is relatief erg klein in deze gebieden. Hierin zit dus een essentieel verschil. Door te kijken naar de natuurlijke analogieën van CO₂-opslag reservoir, weten we dat een veilig reservoir een aantal essentiële eigenschappen moet hebben, zoals een goede impermeabele deklaag en geen open breuken en scheuren. Deze eigenschappen worden aangetroffen in sedimentaire afzettingen, welke daarom een relatief veilig reservoir bieden. Als deze denkwijze verder wordt doorgetrokken kan ook geconstateerd worden dat, wanneer een sedimentaire laag met een CO₂-reservoir onderhevig wordt aan seismische activiteit, dit niet per definitie desastreuze gevolgen hoeft te hebben.

Hoewel het niet altijd bekend is hoe lokale bewoners omgaan met de CO₂-reservoirs en bronnen in hun omgeving, wordt wel duidelijk dat de aanwezigheid van dergelijke structuren zeker niet belemmerend hoeft te zijn. Zelfs als er gevaarlijke situaties kunnen ontstaan, zoals in Hongarije, blijkt er publieke acceptatie te zijn. Incidenten met te hoge CO₂-concentraties gebeuren veelal in laag gelegen, slecht geventileerde omgeving en zijn daardoor eenvoudig te voorkomen.

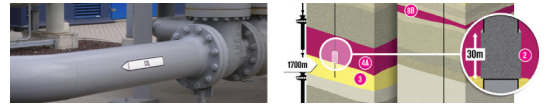


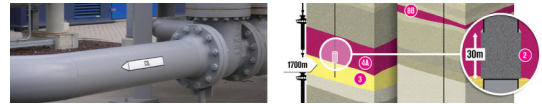


6. Ervaringen

Uit het overzicht dat in deze appendix is gegeven komen de volgende conclusies en ervaringen naar voren:

- Afgeronde CCS projecten zijn:
 - Nagaoka project (Japan) en het Frio Brine Project (VS).
- Veel praktijk ervaring met:
 - Bepalen geschikt reservoir, modelleren en voorspellen van CO₂-gedrag.
 - Aanleggen injectiefaciliteiten.
 - Identificeren en succesvol meten van risico's en milieueffecten.
- Weinig ervaring met lange termijn betrouwbaarheid van reservoir en milieueffecten.
 - Kennis hierover komt vooral uit het bestuderen van natuurlijke analogieën.
- Projecten waarin specifiek aan maatschappelijke acceptatie wordt gewerkt:
 - Otway (Australië) en CO₂SINK (Duitsland).





7. Referenties

AMESCO (2007). Algemene Milieu Effecten Studie CO₂-opslag (AMESCO). Royal Haskoning, Ecofys, CE, TNO en Golder Associates, 1 juli 2007, Final Report, 9S0742.

British Geological Survey (2008). RR605 - An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology. Prepared by the British Geological Survey for the Health and Safety Executive 2008.

Brune, S., Faber, E., Teschner, M., Poggenburg, J., Hagendorf, J. CO₂-deposits at Vorderrhön area (Thuringia) – Gas migration from a deep reservoir to surface? Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany.

Online beschikbaar op: <http://www.cosis.net/abstracts/ICGG7/00023/ICGG7-A-00023.pdf>.

Chadwick, Andy; Arts, Rob; Bernstone, Christian; May, Franz; Thibeau, Sylvain; Zweigel, Peter. 2008 Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers - Observations and Guidelines from the SACS and CO₂STORE projects. Nottingham, UK, British Geological Survey, 267pp. (British Geological Survey Occasional Publication, 14).

Chauvin, Dominique (2008). The oil Industry's answers to environmental challenges. Presentatie gehouden in Brussel op 11 april 2008. Online beschikbaar op www.olf.no/?52981.pdf.

Cook, Peter (2007). Castles in the ground. The prospects for carbon capture and storage.

CO₂CRC (2008). CCS activity in Australia 2008.

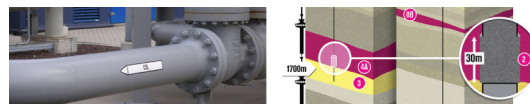
CO₂store (2006). The Valleys: Case study on CO₂ capture, transport and storage. Report No. COAL R302 DTI/Pub URN 06/755.

Damen, K., Faaij, A., Turkenborg, W. (2003). Health, safety and environmental risks of underground CO₂ sequestration.

DNV (2006). Environmental assessment for CO₂ capture and storage: report for IEA GHG R&D programme.

EcoFys (2003). EC-CASE: Carbon dioxide sequestration.

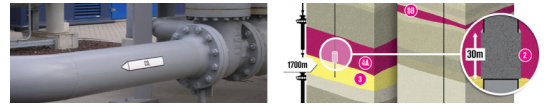
Hooper, B, Murray, L and Gibson-Poole, C (eds.) (2005). Latrobe Valley CO₂ Storage. Assessment, CO₂CRC, Melbourne. CO₂CRC Report No RPT05-0220.



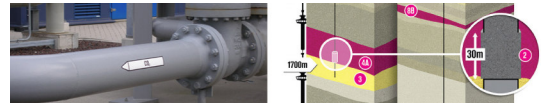
IEA, International Energy Agency (2008). Geologic storage of carbon dioxide: Staying safely underground.

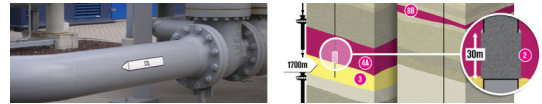
Schlumberger Carbon Services (2007). CO₂ storage: monitoring and verification.

Stevens, S.H., Pearce, J.M., Rigg, A.A.J. (2001). Natural Analogs for Geologic Storage of CO₂: An Integrated Global Research Program. First National Conference on Carbon Sequestration, U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory. May 15-17, 2001, Washington, D.C.



Appendix 2 Overzicht geologische opbouw





1. Inleiding

De vorming van de bodem in Nederland

Nederland was niet altijd het Nederland zoals we het nu kennen. In de loop van de miljoenen jaren heeft Nederland verschillende klimaten gekend en door continentale (tektonische) verschuivingen lag Nederland in het Karboon zelfs rond de evenaar. Er waren ook perioden van miljoenen jaren dat Nederland op de zeebodem lag.

Deze verschillende perioden kunnen worden teruggevonden in verschillende lagen die zich opgehoopt hebben in de bodem.

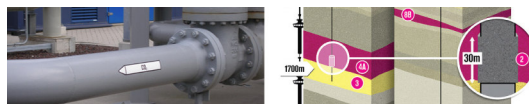
Tijdens een periode, waarin het huidige Nederland zich bevond op de bodem van een zee, zorgde kalkvormende organismen bijvoorbeeld voor de ophoping van kalkskeletjes op de zeebodem. Naarmate de tijd vorderde begon de zeespiegel te dalen en vond op grote schaal indamping van het zeewater plaats, waardoor er zich nu enorme zoutlagen bovenop de kalklagen vormden. Door de continue vorming van nieuwe lagen, bouwen de druk en temperatuur van de onderste lagen zich op, waardoor kalklagen langzaam veranderen in kalksteen en de zeeafzettingen veranderen in kleisteen of zoutlagen. Dit proces maakt het bijvoorbeeld ook mogelijk dat het zand en klei van het huidige Nederland over miljoenen jaren terug te vinden zijn als zand- en kleisteen.

Een ander voorbeeld is de vorming van fossiele brandstoffen, zoals olie en aardgas. Miljoenen jaren geleden zorgde het klimaat voor moerasachtige omstandigheden met enorm veel plantengroei. De resten van de deze planten hebben zich opgehoopt en door de drassige omstandigheden werden deze plantenresten bewaard waardoor langzaam veenlagen ontstonden. Door de toenemende druk en temperatuur in deze lagen, vormde zich uiteindelijk olie en aardgas uit deze enorme plantenresten ophopingen.

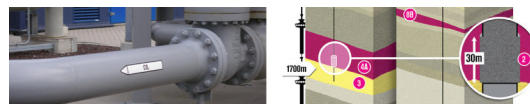
De bodem van Nederland is dus een ophoping van vele verschillende sedimentaire lagen, die zich in de loop van de (miljoenen) jaren heeft gevormd en nog steeds bezig is om gevormd te worden. Elke periode in de geologische geschiedenis van Nederland heeft zijn eigen specifieke kenmerken en veel van deze kenmerken zijn bewaard gebleven in de diepe ondergrond.

Bodemopbouw nabij Barendrecht

De beoogde CO₂-opslag reservoirs (Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij) zijn gelegen op een diepte tussen 1,6 en 2,6 kilometer. Vanwege deze enorme diepte liggen er vele lagen tussen de reservoirs en het maaiveld. Om de reservoirs goed te kunnen beschrijven wordt in deze appendix een beknopte beschrijving van de geologische bodemopbouw van de omgeving van de reservoirs in West-Nederland gegeven.



Eerst zal een kort overzicht gegeven worden van de geologische perioden met betrekking tot de vorming van gas- en olie accumulaties. Daarna zal meer specifiek ingegaan worden op de verschillende geologische afzettingen die te vinden zijn in het gebied van de beoogde CO₂-opslag reservoirs (Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij).



2. Relevante geologische perioden

Een aantal geologische perioden is van belang wanneer wordt gekeken naar de aanwezigheid en opbouw van olie- en gasreservoirs in West-Nederland. Onderstaand worden de perioden behandeld op chronologische volgorde, te beginnen bij het Karboon (eerdere perioden zijn niet relevant binnen dit project). Tabel A2.1 vormt een overzicht van deze perioden.

Tabel A2.1: overzicht van de verschillende geologische perioden die van toepassing zijn op de vorming van de gas- en olie reservoirs Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij.

Naam	Periode (miljoen jaar)	Klimaat	Kenmerk
Karboon	320 - 270	Tropisch, rivierdelta's en veel moerassen.	Belangrijkste brongesteente van olie en gas in Nederland.
Perm	299 - 251	Woestijnachtig	Vorming van geschikte reservoirs en afdekkingen (bv. Slochteren).
Trias	251 - 200	Marien	Vorming van Barendrecht-Ziedewij.
Jura	200 - 146	Marien	Bloeitijd van dinosauriërs (tot einde Krijt).
Krijt	146 - 65	Marien	Vorming van Barendrecht.
Tertiair	65 - 2,6	Overgang richting huidig klimaat	Vorming Noordzeebekken.
Quartaair	2,6 - 0	Huidig klimaat, afwisseling van ijstijden en interglacialen.	Ontstaan van de mens en de meeste huidige diersoorten.

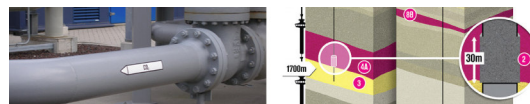
Karboon – formaties als brongesteente van olie en gas

Dit is de periode van 359 miljoen jaar geleden tot 299 miljoen jaar geleden. In deze warme vochtige periode is uit het oerbos het organisch materiaal ontstaan, waaruit later gas en olie gevormd is. Nieuwe afzettingen bovenop de Karboon afzettingen hebben geleid tot compactie, waarbij uit het organisch materiaal steenkool is ontstaan. Door nieuwe afzettingen zijn de Karboon lagen steeds dieper komen te liggen, waardoor naast compactie de temperatuur is toegenomen. Hierbij is olie en gas ontstaan.

Door de hoge druk is de olie en gas uit het gesteente geperst naar hoger liggende lagen, tot dat een ondoordringbare laag de opwaartse migratie heeft gestopt. Voor olie en gaswinning zijn dus vooral gesteenten van belang waarin olie en gas in de opwaartse migratie zijn blijven steken. Dit zijn vooral poreuze zandformaties onder een dikke ondoordringbare laag, bijvoorbeeld van zout of kleisteen. Dergelijke formaties zijn in latere perioden zoals het Perm, Trias en Krijt gevormd.

Perm

Dit is de periode van 299- 251 miljoen jaar geleden. Er heerste een droog en woestijnachtig klimaat, waardoor poreuze zandsteen formaties zijn gevormd. Deze formaties kenmerken zich door de goede reservoir eigenschappen, zoals het Slochteren veld. Later in het Perm werd onder andere zoutsteen afgezet die een geschikt zijn als afdekkende lagen van de reservoirs.



Trias – formatie als opslaggesteente van Barendrecht–Ziedewij

Dit is de periode van 251 – 200 miljoen jaar geleden. Tijdens vrijwel het gehele Trias stond Nederland onder water door de aanwezigheid van een uitgestrekt, ondiep, brak tot zout zeebekken. Voor deze studie zijn de poreuze zandsteen formaties uit het Trias van belang, aangezien hierin de reservoirs van het Barendrecht-Ziedewij veld voorkomen.

Jura

Dit is de periode van 200 – 144 miljoen jaar geleden. Samen met de hierop volgende periode (Krijt) was de Jura de bloeiperiode van de dinosaurïers. Nederland lag in deze periode vrijwel geheel onder water. Afzettingen uit deze periode kenmerken zich dan ook als kleisteen en zandsteen formaties, in combinatie met kalkhoudende afzettingen.

Krijt – formatie als opslaggesteente van Barendrecht

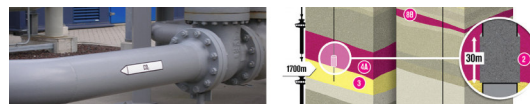
Het Krijt vormt de periode van 144 miljoen tot 65 miljoen jaar geleden. Voor deze studie zijn de poreuze zandsteen formaties uit deze periode van belang, aangezien hierin de reservoirs van het Barendrecht veld voorkomen (onder andere de Rijnland groep).

Tertiair

Dit is de periode van 65 – 2,6 miljoen jaar geleden. In deze periode kwam het zeeniveau tot wel 200m hoger te liggen dan het huidige zeeniveau. Ook ontstond in deze periode het huidige Noordzeebekken. Afzettingen uit deze relatief jonge periode vormen de scheiding tussen versteende en niet versteende afzettingen. Klei en zandafzettingen uit deze periode reiken van enkele honderden meter tot ongeveer een kilometer diepte.

Quartair

De meest recente periode is het Quartair, lopende van 2,6 miljoen jaar geleden tot heden. Hoewel dit de periode is die momenteel nog loopt, is dit ook de periode waarin de meeste levensvormen die zich momenteel voordoen zijn ontstaan, inclusief de mens. Afzettingen uit deze periode (vooral zand en klei in de Noordzee Groep) vormen de huidige biosfeer ('de bodem').



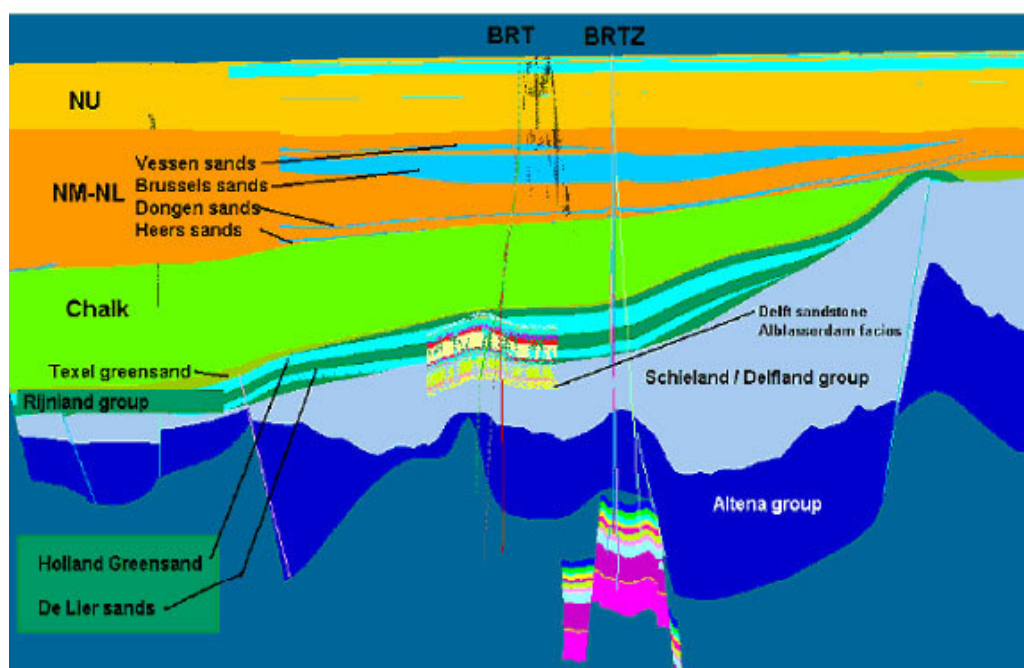
3. Relevante geologische lagen

Zoals hierboven is uitgelegd, zijn de geologische lagen die in de ondergrond in de omgeving van de reservoirs (Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij) gevonden worden, in de loop van de geologische tijd (miljoenen jaren) afgezet.

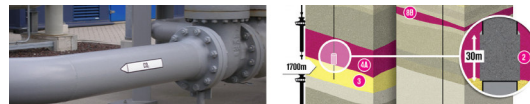
Onderstaand wordt de opbouw van de ondergrond in de omgeving van de reservoirs (Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij) beschreven vanaf de diepere, oudere afzettingen naar de ondiepe, jongere afzettingen. Afzettingen die ouder zijn dan de afzettingen waarin de reservoirs Barendrecht en Barendrecht-Ziedewij voorkomen (i.e. afzettingen van voor het Trias), liggen over het algemeen ook dieper dan de reservoirs en worden derhalve buiten beschouwing gelaten. Voor een overzicht van de hieronder behandelde groepen, formaties en eenheden, zie tabel 2.

Dikte en diepte van de laag

Voor zover bekend wordt de dikte van de laag en de diepte ook gegeven, waarbij genoemde dieptes refereren aan de diepte van de bovenkant van de structuur in kwestie (uitgedrukt in mTVD, meter Total Vertical Depth). In sommige gevallen zijn deze dieptes niet precies consistent vanwege lokale verschillen en dienen daarom te worden beschouwd als indicaties van gemiddelde dieptes.



Figuur A2-1. Dwarsdoorsnede van een vereenvoudigd geologisch model in de omgeving van het Barendrecht en het Barendrecht-Ziedewij veld (Bron: TNO).



Germaans / Duitse Trias groep (Trias)

Dikte: > 366 m, diepte bovenste structuur: 2203 m

Het beoogde CO₂-opslag reservoir in het Barendrecht-Ziedewij veld is gelegen in de Bunter zandsteen formatie (ook de Bontzandsteen formatie genoemd). Het reservoir is opgebouwd uit de Upper Bunter formatie (90 m dik) en de Lower Bunter formatie (140 m dik), waarbij de top van de Upper Bunter formatie op een diepte van 2632 m gelegen is. Naast deze Bunter formatie komen in de Germaanse Trias Groep ook de Muschelkalk Formatie (bestaande uit een onderste en bovenste kalkige eenheid, gescheiden door een evaporitisch en een mergelinterval) en de Keuper Formatie (bestaande uit een afwisseling van kleisteen- en evaporietpakketten) voor.

Altena groep (Jura)

Dikte: 435 m, diepte bovenste structuur: 2205 m

De formaties van de Germaanse Trias Groep zijn bedekt met kleisteen afzettingen van de Altena groep. Dit pakket is 435 m dik en bestaat uit afzettingen van de Werkendam Formatie (123 m dik met breukzones), Aalburg Formatie (290 m) en Sleen Formatie (22 m). De kleisteen formaties van de Altena groep vormen de afsluitende bovenlaag (caprock) van het Barendrecht-Ziedewij veld.

Schieland / Delfland groep (Jura)

Dikte: 473 m, diepte bovenste structuur: 1732 m

Boven de Altena Groep ligt de Schieland/Delfland groep, met totale dikte van 473 m. Deze groep is onderverdeeld in Alblasterdam zanden (330 m, 2081 m diep), Delft Zandsteen (56 m dik, 1888 m diep) en Roderijs Kleisteen (87 m dik). De Ijsselmonde zandsteen equivalent (61 m dik, 1820 m diep) vormt de eerste van de drie aanwezige gas- en olie bevattende reservoirs binnen het Barendrecht veld. Deze potentiële aquifer zal echter niet als CO₂-opslag reservoir worden gebruikt.

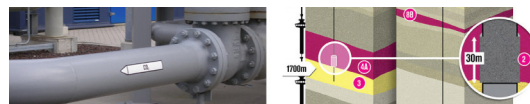
Rijnland groep (Krijt)

Dikte: 305 m, diepte bovenste structuur: 1433 m

De Schieland/Delfland groep is bedekt met de Rijnland groep. Binnen de Rijnland groep komen de Holland Formatie voor (dikte 246 m) en de Vlieland zandsteen Formatie (59 m). De totale dikte bedraagt 305 m.

De Rijnland Groep bestaat uit twee door kleisteen gescheiden potentiële zandsteen aquifers (deze vormen de overige twee reservoirs in het Barendrecht veld): De Lier Zandsteen (66 m dik op 1666 m diepte) en Holland Greensand (105 m dik op 1472 m diepte). Het reservoir dat gelegen is in het zandsteen van De Lier zal als CO₂-opslag reservoir worden gebruikt.

De caprock of afdekkende laag in dit reservoir wordt gevormd door afzettingen van de Lower Holland Marl (dikte: 89 m; diepte: 1577 m).



In dit gebied vormen de Beneden Krijt lagen de oliehoudende formaties. Hierin zijn de De Lier en Holland Greensand shelf deposits van matige reservoir kwaliteit. De Ijsselmonde en Berkel zandsteen eenheden hebben betere reservoir eigenschappen.

Tabel A2.2 Overzicht diepte afdekkende lagen en reservoirs (in meters)

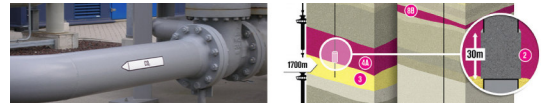
Reservoir	Bovenkant afdekkende laag	Bovenkant reservoir	Onderkant reservoir	Dikte afdekkende laag	Dikte reservoir
Barendrecht	1580	1670	1730	90	60
Barendrecht -Ziedewij	2200	2630	2860	430	230

Tabel A2.3: Overzicht van de relevante afzettingen nabij Barendrecht. Gebaseerd op gegevens van TNO

Periode	Diepte*	Groep (Gp)**	Formatie (Fm)**	Member (Mb)**	Bijzonderheden
Quartair	0	Upper North Sea Gp (400)			Deze laag vormt een onderdeel van de biosfeer en bovenste deel staat in contact met de atmosfeer
Tertiair		Middle North Sea Gp (150)	Rupel Fm	Rupel Clay Mb	
				Vessem Mb	
		Lower North Sea Gp (430)	Dongen Fm	Asse Mb	
				Brussels Sand Mb (150)	
				Ieper Mb	
				Basal Dongen Sand Mb	
		Landen Fm	Landen Clay Mb		
			Heers Mb		
Krijt	980	Chalk Gp (510)	Ommelanden Fm (500)		
			Texel Fm (10)	Texel Greensand Mb	
	1490	Rijnland Gp (290)	Holland Fm (230)	Upper Holland Marl Mb (26)	
				Middle Holland Claystone Mb (10)	Afdekkende laag (caprock)
				Holland Greensand Mb (105)	Gas/olie reservoir
		Vlieland Sandstone Fm (60)	De Lier Mb (60)	CO ₂ -reservoir 'Barendrecht' op 1.650m diepte	
Jura	1780	Schieland/Delfland Gp (330)	Nieuwekerk Fm	"Rodenrijs Claystone" facies (85)	Caprock voor BRT 1
				"Delft Sandstone" facies (55)	- Ijsselmonde zandsteen equivalent. - Gas/olie reservoir
				"Alblasserdam" facies	
	2110	Altena Gp (240)	Werkendam Fm		Caprock
				Aalburg Fm	
		Sleen Fm			
Trias	2350	Germanic Triassic Gp (>370)	Keuper (107)		
			Muschelkalk Fm		
			Bunter Fm	CO ₂ -reservoir 'Barendrecht-Ziedewij' op 2.630 m diepte	

* : Diepte is weergegeven als diepte van de top van de structuur in mTVD (Total Vertical Depth)

** : Waar bekend staat de dikte van de laag (in meters, afgerond) tussen haakjes achter de betreffende laag.



Kalk groep (Krijt)

Dikte: 492 m, diepte bovenste structuur: 941 m

Boven de Rijnland groep bevindt zich de Kalk groep. Een potentiële aquifer in de Kalk groep is de Texel Greensand Mb. Dit is een relatief dunne laag van circa 10 meter dikte in het onderste gedeelte van de Kalk groep. Het grootste gedeelte van de Kalk groep betreft de bijna 500 m dikke Houthem/Ommelanden formatie die voornamelijk uit kalk bestaat.

Noordzee groep (Tertiair en Quartair)

Dikte: 941 m, diepte bovenste structuur: 0 m

De Noordzee groep is de bovenste, meest recente groep en ligt boven de Kalk groep en bestaat voornamelijk uit zand en klei. In deze groep komen verschillende aquifers voor (Heers, Dongen, Brussel en Vessem zand). De meest opvallende aquifer is de Brussel Sands, met een dikte van meer dan 150 meter.

De Noordzee groep bestaat uit de Boven Noordzee groep (401 meter dikte), Midden Noordzee groep (158 m) en Onder Noordzee groep (429 m).

Referenties:

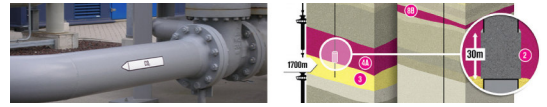
Website: <http://www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/i000398.html>

Website: http://nl.wikipedia.org/wiki/Geologische_tijdschaal

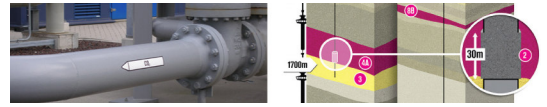
TNO, 2007. Specialist Report 1. Geochemical consequences of CO₂ injection in the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. 2007-U-R1057/B.

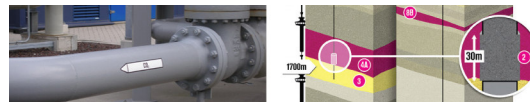
TNO, 2007. Specialist Report 3. Caprock and Fault Integrity for CO₂ storage in the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. 2007-U-R1057/B.

TNO, 2007. Specialist Report 4. Qualitative study of the fate and transport of CO₂ in the overburden of the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. 2007-U-R1057/B.



Appendix 3 Overzicht theoretische stroming CO₂





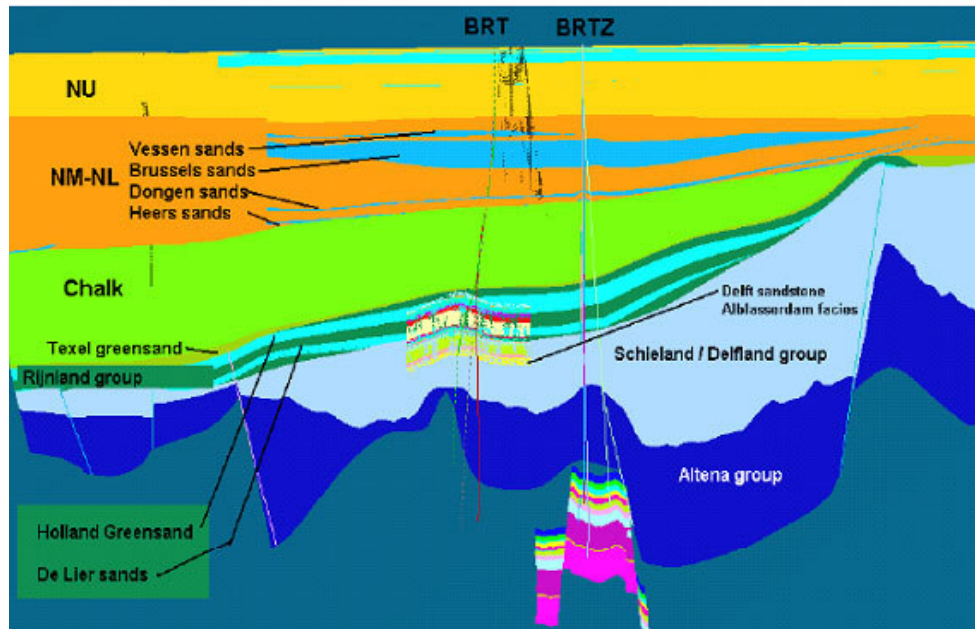
Overzicht theoretische stroming CO₂ door ondergrondse lagen

Geologisch model

Het onderzoek naar de mogelijk stroming van CO₂ door de bovenliggende lagen is uitgevoerd en gerapporteerd door TNO (Qualitative study of the fate and transport of CO₂ in the overburden (BRT and BRTZ)). TNO heeft een geologisch Petrel model opgezet, gebaseerd op informatie uit de landelijke databases van TNO, aangevuld met de geologische detailinformatie van de reservoir, aangeleverd door NAM.

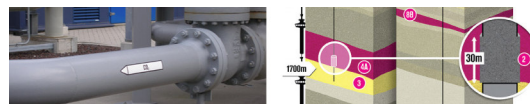
In het model zijn 6 overgangen ingevoerd (figuur A3.1):

- Basis van de Boven Noordzee groep;
- Basis van de Noordzee groep;
- Basis van de Kalklaag;
- Basis van de Rijnland groep;
- Basis van de Schieland groep;
- Basis van de Althena groep.



Figuur A3.1 Dwarsdoorsnede van een vereenvoudigd geologisch model in de omgeving van het Barendrecht en het Barendrecht-Ziedewij veld (Bron: TNO).

Naast de regionale informatie is gebruik gemaakt van de specifieke informatie uit de boorstaten van de bekende putten in het gebied. Daarnaast zijn de bekende breukzones opgenomen in het model.



De nauwkeurigheid van de modellen is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare informatie en de regionale spreiding van deze informatie. Nabij de putten is de informatiedichtheid groot. De reservoirs en de afdekkende laag zijn goed bekend door het seismisch onderzoek, uitgevoerd voor de gaswinning. Voor de overige lagen en gebieden geldt dat de kennis meer globaal van karakter is. Dit maakt dat het model vooral op hoofdlijnen inzicht kan geven in de ondergrondse stroming van CO₂.

Indien het CO₂ onder een tweede geschikte afdekkende laag terecht komt, zal deze alsnog als barrière dienen tegen migratie naar hogere lagen. Indien CO₂ in waterhoudende lagen komt, ontstaat de mogelijkheid dat het CO₂ oplost in het water.

In de modellering is uitgegaan van een continue beschikbare stroom CO₂. Dit is bovendien een relatief grote stroom CO₂, zodat mogelijke migratieroutes zichtbaar worden. Dit is een forse overschatting, aangezien:

- geen continue stroom CO₂ beschikbaar is. Ook in de slechtste gevallen gaat het om beperkte hoeveelheden die snel oplossen in het water van de waterlaag
- het met CO₂ gevulde reservoir een vergelijkbare druk heeft als de omgeving, zodat er een onderdruk ontstaat zodra CO₂ weglekt. Deze onderdruk zal een oneindige verdere uitstroom van CO₂ tegengaan.

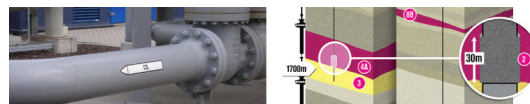
Migratieroute vanaf Barendrecht-Ziedewij

De mogelijke migratieroute wordt eerst beschreven voor CO₂ uit het reservoir van Barendrecht-Ziedewij, aangezien dit dieper gelegen is dan het reservoir van Barendrecht.

In het model is aangenomen dat CO₂ vanuit het Barendrecht-Ziedewij veld door de kleisteenlaag van de Altena groep terecht komt in de Schieland/Delfland groep. Indien zich grote hoeveelheden CO₂ voordoen, kunnen deze opwaarts migreren tot aan de kleilagen van de Rijnland groep. Hier vandaan zal het CO₂ zich langs de onderkant van de kleilaag bewegen. De kleilagen zijn in het model als nagenoeg ondoordringbaar aangenomen. In kleinere hoeveelheden, of na verloop van tijd, zal het superkritische CO₂ oplossen in de waterlaag of zich capillair binden.

Vanwege de lage viscositeit van het superkritische CO₂ kan het relatief snel migreren. Daarentegen wordt de snelheid waarmee dit gebeurt geremd door het aanwezige (zoute) water, dat veel stroperiger is. Daarnaast is er bij lekkage van CO₂ sprake van drukopbouw in de betreffende aquifer, met als gevolg een vertraagde verplaatsingssnelheid van CO₂.

TNO heeft een berekening uitgevoerd waarbij een grote hoeveelheid CO₂ van de Schieland/Delfland groep zal gaan migreren. In het model is een oneindige hoeveelheid CO₂ aangenomen, om zicht te krijgen over de mogelijke richting. De ligging van de basis van bovenliggende kleilagen, en vooral de hellingshoek, is bepalend voor de horizontale stromingsrichting. Uit de berekeningen volgt dat CO₂ vanuit het Barendrecht-Ziedewij reservoir zal migreren naar het Barendrecht veld en vanaf het Barendrecht veld naar een klein reservoir nabij Rotterdam. Als deze structuur gevuld is stroomt het



CO₂ door in noordwestelijke richting. Als minder waarschijnlijk is een stromingrichting vanaf Barendrecht–Ziedewij naar het noordoosten berekend. De migratie van CO₂ tussen reservoirs duurt naar een zeer globale schatting 50 tot 100 jaar.

Ten aanzien van de migratieroutes bestaat onzekerheid doordat de hellingshoek van de lagen gering is. Over relatief grote afstand kan er een diepteverschil van slechts 5 meter optreden, wat binnen de nauwkeurigheid van seismisch onderzoek valt (afhankelijk van de mate van detail bij het seismisch onderzoek).

Migratieroute vanuit Barendrecht

Het Barendrecht veld ligt ondieper dan het Barendrecht-Ziedewij veld. De Rijnland groep bestaat uit drie door kleisteen gescheiden potentiële aquifers (deze vormen het Barendrecht veld): IJsselmonde Zandsteen, De Lier Zandsteen en Holland Greensand. CO₂-injectie is gepland in de De Lier Zandsteen Formatie.

Typend voor het Barendrecht veld is dat boven dit reservoir nog in het Holland Greensand eveneens een gasreservoir aanwezig is. Dit reservoir is evenals het reservoir in het De Lier Laagpakket bewezen gasdicht. De combinatie van beide gasdichten reservoirs, met twee afdekkende lagen, geeft een extra zekerheid voor het voorkomen van CO₂-lekkage.

Migratie van CO₂ vanuit de bovenliggende laag, de Holland Greensand, zal dezelfde route volgen als eerder beschreven voor CO₂ in de Delfland/ Schieland groep. Dit betekent dat stroming richting het Rotterdamveld zal optreden.

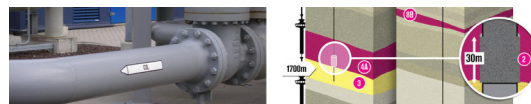
De modelberekeningen geven het volgende aan:

- indien zeer veel CO₂ beschikbaar is in de lagen boven de afdeklaag van het reservoir Barendrecht, zal dit migreren naar andere gasreservoirs in de omgeving
- de benodigde hoeveelheid CO₂ om daadwerkelijk lange afstand migratie te voorzien, is groter dan de hoeveelheid die vrij kan komen uit het reservoir.
- daarnaast zal migratie beperkt worden doordat veel CO₂ oplost in het water van de waterlagen dat het passeert of wordt vastgelegd in andere bodemlagen.

Onderstaand zijn de verschillende migratieroutes vanuit de bovenliggende lagen beschreven.

Migratie vanuit de Schieland/Delfland groep

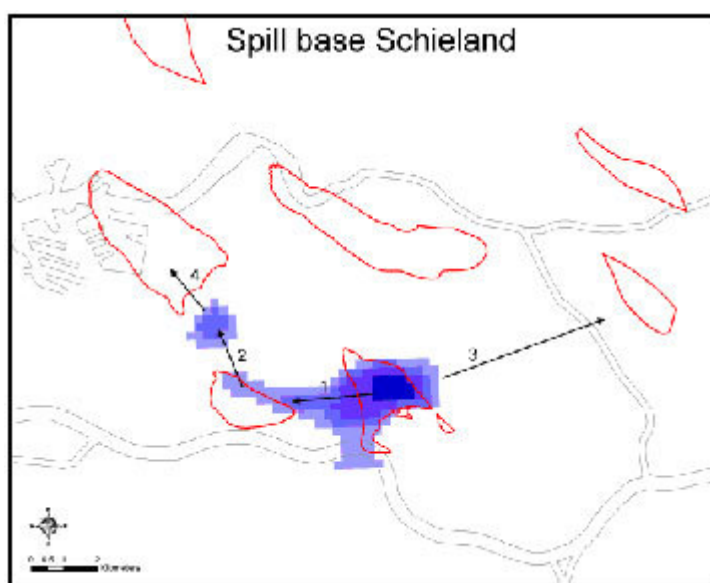
CO₂ dat in de Schieland/Delfland groep terecht komt, zal ofwel in deze formatie blijven of zal onder een afdekkende laag van een nabijgelegen reservoir worden gevangen. Het CO₂ zal niet naar de oppervlakte stromen.



Lekkage van CO₂ naar de Schieland/Delfland groep kan afkomstig zijn van een lekkende put, lekkage via de afdekkende laag van het Barendrecht-Ziedewij veld of via een lek (spill) in het Barendrecht veld. Een eventuele grote hoeveelheid CO₂ zal omhoog migreren tot aan de kleilagen van de Rijnland groep. De verwachting is dat het CO₂ deze laag zal volgen. Het in superkritische staat verkerende CO₂ zal onderworpen zijn aan insluiting en ontbinding. Op locaties waar CO₂ ontbonden wordt in het aanwezige zoute water, krijgt het zoute water een grotere dichtheid, waardoor het naar neerwaarts op de afdekkende laag zakt. Dit kan voorkomen bij zowel het Barendrecht als het Barendrecht-Ziedewij veld.

Migratie vanuit Alblasserdam zanden

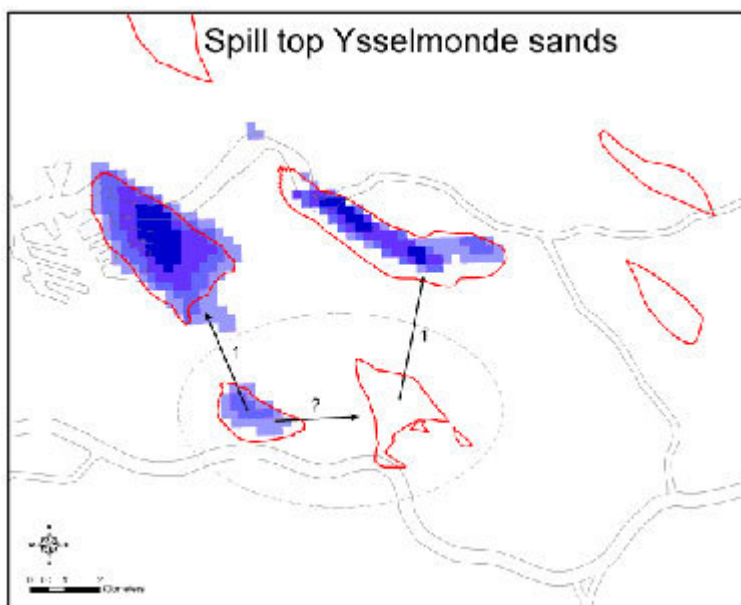
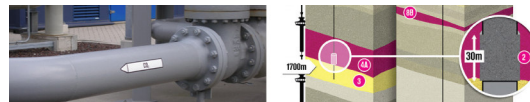
De Alblasserdam zanden onderin de Schieland/Delfland groep zijn verdeeld over het gehele gebied. Wanneer CO₂ vanuit het Barendrecht-Ziedewij veld lekt, dan zal dit richting het Barendrecht veld stromen en vervolgens in een kleine structuur nabij het Rotterdam veld accumuleren. Wanneer deze kleine structuur tot op zekere hoogte gevuld is, kan de stroom veranderen in een noordoostelijke richting.



FiguurA3.2 Simulatie van lekkage in de Schieland/Delfland groep. De nummers 1 t/m 4 geven de hypothetische volgorde van lekkage aan (Bron: TNO).

Migratie vanuit Delft Zandsteen/IJsselmonde equivalent

Bij lekkage van substantiële hoeveelheden CO₂ naar het Delft Zandsteen vanuit het Barendrecht veld, kan migratie naar het Rotterdam veld of in meer oostelijke richting plaatsvinden. Niet bekend is in hoeverre de Delft Zandsteen en de IJsselmonde equivalent met elkaar in verbinding staan. De precieze richting waarin het CO₂ zal stromen hangt af van deze onderlinge verbindingen van doorlatende delen in het pakket.



Figuur A3.3 Simulatie van lekkage in de Delft Zandsteen/IJsselmonde equivalent. De met stippellijn aangegeven ellips geeft het gebied weer waar CO₂ zal accumuleren wanneer de Delft Zandsteen en de IJsselmonde equivalent niet onderling zijn verbonden (Bron: TNO).

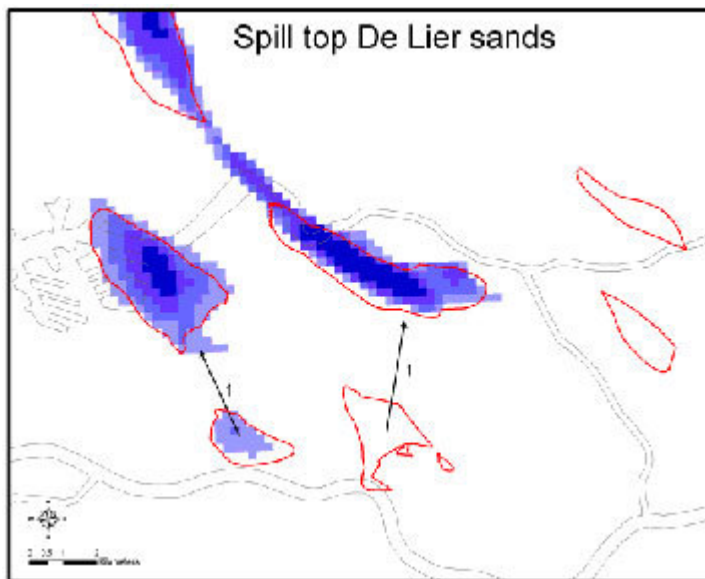
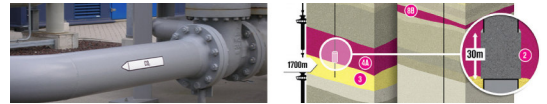
Migratie vanuit de Rijnland groep

Net als bij lekkage in de Schieland/Delfland groep, zal CO₂ dat terechtkomt in de Rijnland groep daar blijven of zal het CO₂ onder een afsluitende laag van een nabijgelegen reservoir worden gevangen. Het CO₂ zal niet naar de oppervlakte stromen.

CO₂ kan in de Rijnland groep terechtkomen vanuit een lekkende put, door lekkage via de afsluitende laag van het Barendrecht veld of door breuken in de kleilaag tussen de Schieland en de Rijnland groep.

Migratie vanuit De Lier Zandsteen en Holland Greensand

De verwachting is dat CO₂-lekkage vanuit het Barendrecht veld naar het De Lier Zandsteen richting de Rotterdam velden zal stromen. Lekkage vanuit het Barendrecht-Ziedewij veld dat in het De Lier Zandsteen terechtkomt, zal naar het IJsselmonde reservoir stromen. De migratieroutes voor CO₂ in de Holland Greensand laag zijn naar verwachting min of meer hetzelfde.



Figuur A3.4 Simulatie van lekkage in de De Lier Zandsteen (Bron: TNO).

Conclusie

De resultaten van de scenarioanalyse laten zien dat bij het optreden van een (hypothetische) lekkage van CO₂ in de Rijnland groep of de Schieland/Delfland groep, het weggelekte CO₂ het maaiveld niet zal bereiken. Bij kleine hoeveelheden weggelekt CO₂ zal dit geheel ontbonden worden in het aanwezige zoute water. Bij grotere hoeveelheden, zal CO₂ dat voorbij deze aquifers komt worden ingesloten in nabijgelegen gas- en olievelden. Hierdoor wordt de kans dat CO₂ door de deklaag lekt en het aardoppervlak bereikt als verwaarloosbaar beschouwd. Dit is overigens een volstrekt natuurlijk migratiepad, omdat een dergelijke laterale migratie waarschijnlijk ook heeft plaatsgevonden tijdens de accumulatie van aardgas in BRT en BRTZ.

Tevens zijn bij een eventuele lekkage door de afdekkende laag de hoeveelheden weggelekt CO₂ en de migratiesnelheid van het CO₂ erg laag, als gevolg van de hoge druk rondom het reservoir en de lage porositeit van de bovenliggende lagen.