

RAPPORT

Deelrapport Opslag diepe ondergrond

MER Porthos - CO2 transport en opslag

Klant: Porthos Development C.V.

Referentie: BF8260I&BRP003F01

Status: 2.0/Definitief

Datum: 1-9-2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

George Hintzenweg 85
3068 AX ROTTERDAM
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 90 00 **T**
+31 10 209 44 26 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Deelrapport Opslag diepe ondergrond

Ondertitel:
Referentie: BF8260I&BRP003F01
Status: 2.0/Definitief
Datum: 1-9-2020
Projectnaam: MER CCS Porthos
Projectnummer: BF8260

Classificatie

Projectgerelateerd



Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Inhoud

1	Inleiding deelrapport Opslag diepe ondergrond	5
1.1	Opbouw van het MER Porthos	5
1.2	Uitgangspunten	6
1.2.1	Onderscheid biosfeer en diepe ondergrond	6
1.2.2	Selectie gasveld voor opslag CO ₂	7
1.2.3	Informatie afkomstig uit technisch onderzoek	9
1.3	Opzet van het deelrapport	10
2	Wet- en regelgeving ondergrondse opslag	11
2.1	EU richtlijn over CO ₂ -opslag	11
2.2	Mijnbouwwet	11
2.3	Internationale verdragen - OSPAR	12
3	Ervaringen met CCS-projecten	13
3.1	CCS in Nederland	13
3.1.1	Onderzoeken toepassing CCS in Nederland	13
3.1.2	Onderzoeksprogramma CATO	13
3.1.3	CO ₂ -opslag als onderdeel van de m.e.r.-procedure	13
3.1.4	AMESCO	14
3.1.5	Project-MER CO ₂ -opslag Barendrecht	15
3.1.6	MER ROAD P18 in 2011	15
3.1.7	ROAD Q16-Maas	16
3.1.8	CCS-Pilot K12-B	16
3.1.9	Internationale ervaringen	17
4	Geologische opbouw en gaswinning	20
4.1	Geologische opbouw	20
4.2	Terminologie	21
4.3	Drie reservoirs in P18	23
4.3.1	Reservoir P18-2	25
4.3.2	Reservoir P18-4	27
4.3.3	Reservoir P18-6	28
4.4	Afsluitende bovenlaag	29
4.5	Aanwezige breukzones	29
4.6	Ondiepe gasaccumulaties	33
4.7	Winningsgeschiedenis	34
4.8	Autonome ontwikkelingen	35
5	CO₂-opslag in P18 reservoirs	36
5.1	Methodiek modellering	36

5.1.1	Toegepaste simulatiemodellen voor CO ₂ -injectie	36
5.1.2	Bevindingen modellering	38
5.2	Afbakening opslagvoorkomen en opslagcomplex	39
5.2.1	Opslagvoorkomen P18-2, P18-4 en P18-6	40
5.2.2	Integraal opslagcomplex	42
5.3	Effecten op de diepe ondergrond	44
5.3.1	Relevante aspecten voor CO ₂ -injectie	44
5.3.2	Mechanische veranderingen	44
5.3.3	Thermische veranderingen	47
5.3.4	Chemische veranderingen	49
5.3.5	Beperking toekomstig gebruik	52
5.3.6	Invloed op bovenliggende lagen	53
5.4	Effecten op biosfeer	54
5.4.1	Bodembeweging	55
5.4.2	Risico van aardbevingen (bodemtrillingen)	55
5.5	Samenvatting MER-beoordeling	57
6	Risicoanalyse lekkage CO₂ uit de P18 reservoirs	59
6.1	Methodiek risicoanalyse	59
6.1.1	Lekkagescenario's	59
6.1.2	Risicoanalyse middels bow-tie methodiek per scenario	60
6.1.3	Gebruik van de risico-matrix per scenario	60
6.1.4	Toelichting Risico Matrix	62
6.2	Lekkagescenario: Lekkage langs putwand	63
6.2.1	Bevindingen putten P18-2	67
6.2.2	Bevindingen put P18-4	69
6.2.3	Bevindingen put P18-6	70
6.2.4	Mitigerende maatregelen	71
6.3	Lekkagescenario: lekkage door de afsluitende bovenlaag	72
6.4	Lekkagescenario: Lekkage langs breuken	76
6.5	Lekkagescenario: Lekkage via het overstromingspunt	79
6.6	Bevindingen lekkagescenario's	82
7	Monitoring	84
7.1	Inleiding	84
7.2	Opzet monitoringsplan	85
7.3	Ontwerp van het monitoringsplan	86
7.4	Meetprogramma	88
8	Leemte in kennis en informatie	90
8.1	Leemten in kennis	90
8.1.1	Druk- en volumescenario's	90
8.1.2	Detailmodellering	90

8.1.3	Lange termijn effecten	91
8.2	Leemten in informatie	91
8.2.1	Compleetheid productie en geologische geschiedenis.	91
8.2.2	Putten	91
8.2.3	Verbetering modellen op basis van monitoringsresultaten	92
8.2.4	Breukzones	93
9	woordenlijst en afkortingen	94
10	Literatuur	95

Bijlagen

Bijlage rapporten

1. TNO. (2019). Porthos – CO₂ injection, TNO 2019 R10335 | 1.0 (Flow assurance study)
2. TNO. (2019). CO₂ storage feasibility in the P18-2 depleted gas field, TNO 2019 R11635
3. TNO. (2019). CO₂ storage feasibility in the P18-6 depleted gas field, TNO 2019 R11212
4. TAQA Energy B.V. (2019). Porthos Basis of completion design
5. Fenix consulting Delft B.V. (2019). P18 Subsidence Evaluation
6. Fenix consulting Delft B.V. (2019). P18 CCS: Seismic Risk Evaluation

Onderliggende rapporten in het kader van het CCS-ROAD project:

1. CATO2. (2011). Feasibility study P18
2. PanTerra Geoconsultants B.V. (2011). Geschiedenis en Beschrijving van de P18-velden

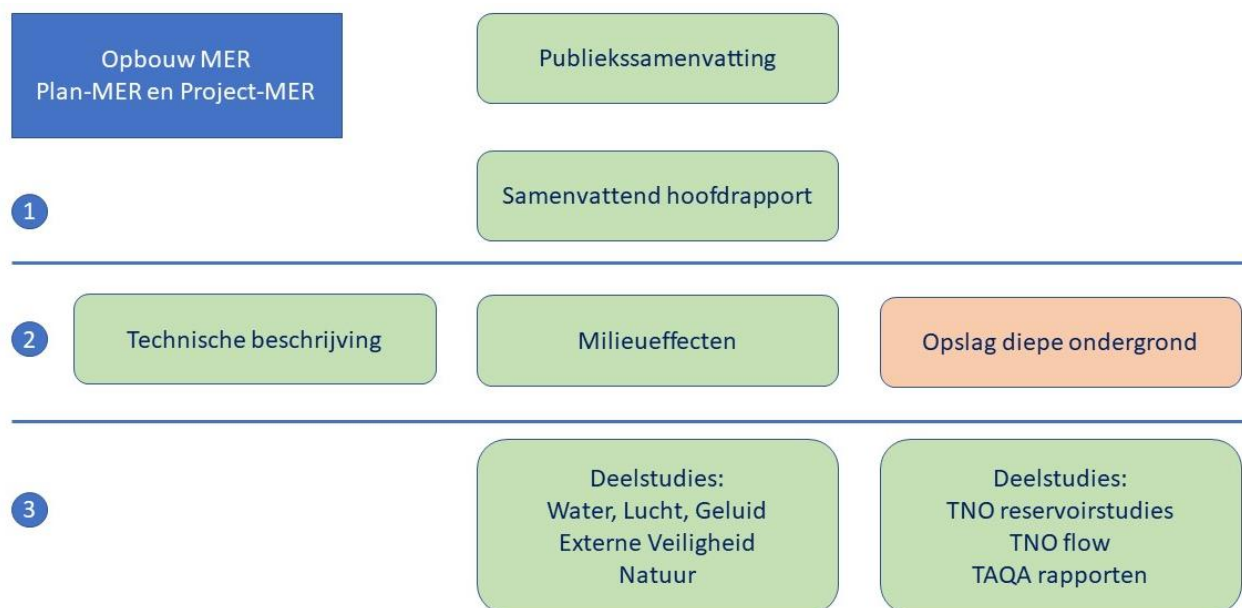
1 Inleiding deelrapport Opslag diepe ondergrond

Dit deelrapport heeft betrekking op de opslag van CO₂ in de diepe ondergrond. Hierin wordt zowel het juridisch kader als de huidige ervaring met opslag van CO₂ in de diepe ondergrond beschreven. Vervolgens wordt er een beschrijving gegeven van de opbouw van de diepe ondergrond, met daarbij de opslagreservoirs en de putten. Daarna wordt er aangegeven welke veranderingen in de ondergrond kunnen optreden ten gevolge van CO₂-opslag. Het deelrapport wordt afgerond met een risico-evaluatie, wat vooral gericht is op de mogelijkheid dat CO₂ het opslagvoorkomen kan verlaten.

1.1 Opbouw van het MER Porthos

Voor het project Porthos is een gecombineerde Project-MER / Plan-MER opgesteld, zoals aangegeven in het onderstaande schema. Het MER Porthos bestaat uit een Samenvattend hoofdrapport, voorzien van een Publiekssamenvatting. Ter onderbouwing van het Samenvattend hoofdrapport zijn drie deelrapporten opgesteld, met de Technische beschrijving van Porthos, de Milieueffecten en de Opslag diepe ondergrond. Bij de deelrapporten zijn als bijlagen de rapporten van onderliggende technische deelstudies opgenomen, die specifiek voor dit MER zijn uitgevoerd. Verder wordt verwezen naar beschikbare algemene literatuur en studies uitgevoerd bij eerdere CCS MER onderzoek.

Dit rapport betreft het deelrapport Opslag diepe ondergrond. Bevindingen uit dit deelrapport zijn overgenomen in het deelrapport Milieueffecten, in zoverre er effecten op de bovenliggende biosfeer optreden, en in het Samenvattend hoofdrapport.



Figuur 1.1. Overzicht rapportagestructuur MER Porthos

Technische deelstudies

In deze MER wordt het gebruik beschreven van de drie gasreservoirs P18-2, P18-4 en P18-6, die samen het P18-veld vormen. De benutting van reservoir P18-4 is eerder beschreven in het MER ROAD, waarvan de resultaten grotendeels overgenomen zijn in dit MER, met aanvullingen daar waar nodig. De benutting van de reservoirs P18-2 en P18-6 zijn in het kader van het Porthos-project uitgewerkt. Uiteindelijk leidt dit tot een integraal gebruik van de drie reservoirs voor de opslag van CO₂ in het Porthos project.

Bij dit deelrapport Opslag diepe ondergrond zijn in de bijlages de rapportages van de volgende technische deelstudies opgenomen:

- TNO rapportage met betrekking tot doorstroming CO₂ in de transportleiding en de injectieputten (flow assurance)(bijlage 1);
- TNO rapportages voor benutting van P18-2 en P18-6, inclusief risicoanalyses (bijlage 2 en 3);
- TAQA ontwerp voor de aanpassingen van de putten (bijlage 4);
- Fenix onderzoek naar bodemdaling en seismisch risico bij CO₂ injectie (bijlagen 5 en 6).

1.2 Uitgangspunten

Onderstaand wordt eerst toegelicht waarom de gevolgen van CO₂-opslag in de diepe ondergrond apart worden beschreven van de milieueffecten, zoals deze zijn vastgesteld voor het landdeel en zeedeel van Porthos in het deelrapport Milieueffecten. Daarna wordt ingegaan op de keuze van het opslagveld P18. Tot slot wordt beschreven hoe het benodigde technische onderzoek is uitgevoerd.

1.2.1 Onderscheid biosfeer en diepe ondergrond

Milieuwetgeving voor gebeurtenissen in de biosfeer

De biosfeer is het deel van de aarde, en het gedeelte van de lucht daar direct boven, waarin leven mogelijk is en zich leven bevindt. In de aardbodem strekt dit zich tot enkele meters, maar voor de milieuwetgeving omvat het alles tot 500 meter diepte. Alle activiteiten die in dit deel van de aarde plaats vinden worden daarom getoetst volgens de milieuwetgeving. Bij gebeurtenissen in de diepe ondergrond, op meer dan 500 meter diepte, vallen de activiteiten onder de Mijnbouwwet. Zo dient een olievoorraad op 2 meter diepte gesaneerd te worden volgens de milieuwetgeving, maar op 800 meter diepte is er sprake van een delfstof die gewonnen kan worden (Mijnbouwwet).

Vaststellen gevolgen CO₂-opslag in de diepe ondergrond

De opslag van CO₂ in de diepe ondergrond geeft veranderingen in de reservoirs, waarvoor geen milieunormen zijn vastgesteld om aan te toetsen. Daarmee zou dit aspect buiten het MER gelaten kunnen worden. Toch is het om meerdere redenen zinvol deze veranderingen inzichtelijk te maken in het MER. Het vormt de mogelijkheid om via het MER aan betrokkenen uit te leggen wat er precies in de ondergrond gebeurt en er zo voor te zorgen dat er inzicht is in de keuzes, onzekerheden, mogelijk gevolgen en mitigerende maatregelen. Daarnaast kan het zijn dat indirect als gevolg van CO₂ opslag er wel degelijk effecten kunnen optreden in de bovenliggende lagen van de biosfeer, binnen de operationele omstandigheden of ten gevolge van een ongewenste gebeurtenis (calamiteit).

In dit deelrapport Opslag diepe ondergrond wordt zodoende ingegaan op de volgende drie aspecten:

- Verandering in het reservoir ten gevolge van de CO₂-opslag (paragraaf 5.3);
- Effecten ten gevolge van de CO₂-opslag op de biosfeer (paragraaf 5.4);
- Risico's en mitigatie bij CO₂-opslag (hoofdstuk 6).

Methodiek in het MER Porthos

De gebruikte methodiek voor de beoordeling van de ondergrondse opslag van CO₂ is gebaseerd op de voorgestelde aanpak in AMESCO¹ en vervolgens toegepast bij het MER CCS Barendrecht en MER CCS ROAD.

¹ AMESCO-project: Algemene Milieu Effecten Studie CO₂-slag (2007)

Bij deze laatste twee initiatieven heeft de commissie voor de m.e.r. aangegeven dat de methodiek een goed inzicht geeft in de gevolgen van CO₂-opslag. In hoofdstuk 5 en 6 is de methodiek toegepast voor het CCS Porthos initiatief.

1.2.2 Selectie gasveld voor opslag CO₂

Het Rijksbeleid schrijft voor dat CO₂-opslag alleen kan plaatsvinden onder zee en niet onder land. Voor opslag van het aangeleverde CO₂ uit de Rotterdamse haven zijn daarom verschillende mogelijkheden onder de Noordzee in kaart gebracht.

In de voorfase van het Porthos project heeft een inventarisatie van de potentiële opslag reservoirs plaatsgevonden. De belangrijkste criteria voor de selectie van een CO₂-opslagveld zijn:

- Tijdige beschikbaarheid, met betrekking tot wanneer de velden zijn leeggeproduceerd;
- Voldoende opslagcapaciteit, zodat CO₂-injectie met enkele Mton CO₂ per jaar gedurende een periode van minimaal 10 jaar kan plaatsvinden;
- Reservoirkwaliteit, met betrekking tot de gesteentekwaliteit van de reservoirs, goede injectiviteit;
- Kwaliteit van de putten (aangeduid als putintegriteit), inclusief:
 - voldoende putten beschikbaar voor CO₂-injectie (na de benodigde aanpassingen);
 - geen afgesloten of verlaten putten, die een risico kunnen gaan vormen.
- Afstand tot de kust en het compressorstation, aangezien grotere transportafstanden tot hogere kosten kunnen leiden en de aanleg langer zal duren.

EBN en Gasunie hebben een inventarisatie² gemaakt van mogelijk beschikbare velden. Daarbij hebben ze de karakteristieken van de velden in beeld gebracht, gebaseerd op informatie van TNO. De inventarisatie is gebruikt om te komen tot de onderstaande tabel met velden die beschikbaar komen/zijn in de nabije toekomst.

Tabel 1-1: Overzicht van potentiële opslaglocaties (zoals vastgesteld door Gasunie, EBN en TNO).

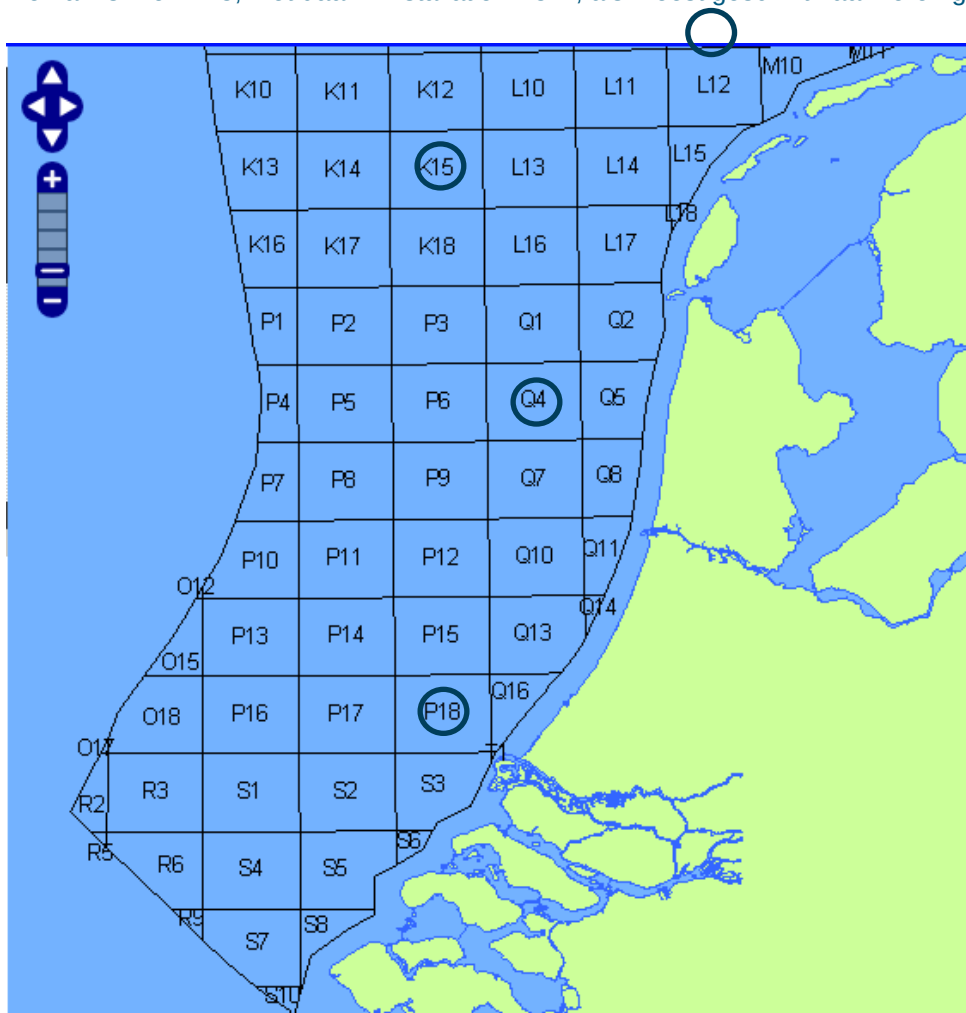
Installatie	Aantal putten	Reservoir	Opslag capaciteit [Mt]	Reservoir kwaliteit / verwachte injectiviteit (kh)
P18-A	4	P18-2	>25	Hoog
	1	P18-4	>5	Hoog
	1	P18-6	<5	Beperkt
Q16-FA-1 onderzee (via P18-A)	1	Q16-FA	>10	Hoger dan P18-4
Q16-Maas (vanaf land)	1	Q16-Maas	<5	Hoog
P15-E	2	P15-09	>10	Hoger dan P18-4
P15-F	2	P15-11	>15	Hoger dan P18-4
P15-G	1	P15-13	>5	Gemiddeld, hoger dan P18-4
P6-A	6	P06-AB, P06-NW	>25	Laag
Q4-C	3	Q01-B	>25	Gemiddeld, Lager dan P18-4
K14-FA-1P	7	K14-FA	>40	Laag
K15-FB-1	9	K15-FB, K15-FI, K15-FO, K15-FP	>55	Goed, iets lager dan P18-4
K15-FA-1	9	K15-FA, K15-FD, K15-FE, K15-FN	>45	Gemiddeld, lager dan P18-4

² Transport en opslag van CO₂ in Nederland, Verkennende studie door Gasunie en EBN in opdracht van het ministerie van Economische Zaken, EBN en Gasunie, november 2017.

Installatie	Aantal putten	Reservoir	Opslag capaciteit [Mt]	Reservoir kwaliteit / verwachte injectiviteit (kh)
K08-FA-1	9	K08-FA, K07-FC	>130	Laag
L10-AD	12	L10-A	>100	Laag
L9-FF-1W	8	L09-FC, L09-FD, L09-FF/FG/FH, L09-FI/FJ	>75	Zeer hoog
Q1 Aquifer (geen installatie beschikbaar)	N.A.	Q1 Aquifer	>100	Potentieel hoog. De olievelden bij deze aquifer hebben een zeer hoge kh

Uit het overzicht blijkt dat veld L9, met installatie L9-FF-1W, de beste potentie voor grootschalige opslag biedt. Daarnaast voldoen, de P18, Q4, en K15 velden tevens aan de eerste selectie op basis van putten, platforms, volume en injectiviteit.

Voor deze opties is vervolgens gekeken naar de afstand tot de Maasvlakte en de beschikbaarheid. Figuur 1.1 geeft de ligging aan van de blokken P18, Q4, K15 en L9 (deze laatste net boven de figuur). Op basis hiervan is Blok P18, met daarin installatie P18-A, als meest geschikt naar voren gekomen.



Figuur 1.1. Overzicht ligging mogelijke velden voor CO₂-opslag

1.2.3 Informatie afkomstig uit technisch onderzoek

Voor de opslag van CO₂ in ondergrondse reservoirs is het van belang inzicht te hebben in de ondergrondse structuren en de wijze waarop deze reageren op het injecteren van CO₂. Het onderzoeksprogramma CATO-2 heeft hier in 2009 / 2010 uitgebreid onderzoek naar gedaan. In 2018 / 2019 heeft TNO hierop aansluitend nieuwe informatie en inzichten toegevoegd. Samen geeft dit een goed beeld hoe CO₂-opslag in de Nederlandse ondergrond kan worden beschreven. De nadruk bij de onderzoeken ligt op het vaststellen van de randvoorwaarden waarbinnen de CO₂ permanent veilig is opgeslagen. Er is gebruik gemaakt van modellen van de ondergrond, waarin de ondergrondse structuren en de stroming van de geïnjecteerde CO₂ zijn bepaald.

De gebruikte modellen en de beschikbare informatie zijn afkomstig van respectievelijk de olie- en gaswereld en winning. Op basis hiervan zijn modellen ontwikkeld door TNO specifiek voor simulatie van CO₂-opslag. Hiermee heeft TNO de benodigde modelberekeningen uitgevoerd en gerapporteerd. De resultaten zijn afgestemd met de huidige operator TAQA, vanwege hun operationele kennis van de reservoirs en putten in het P18-veld. In hoofdstuk 5 wordt nader ingegaan op het modelleerwerk en de resultaten hiervan.

Naast de modellering van de CO₂-opslag in de reservoirs is tevens de stroming van het CO₂-gasmengsel in de injectieputten gemodelleerd. Daarbij is het verloop van de druk en temperatuur in de put bekeken in relatie tot de druk in het reservoir. Voor verschillende situatie bij toenemende druk in het reservoir is door TNO de verdeling van druk en temperatuur in de put berekend.

Bronnen uit het CCS project ROAD, 2009 / 2010

In het kader van het CCS project ROAD is het gehele P18 gebied binnen CATO³, het CCS-onderzoeksprogramma van de overheid, in beeld gebracht. Hoewel in het project ROAD alleen CO₂-injectie in P18-4 was voorzien, is in het onderzoek tevens gekeken naar P18-2 en P18-6. De verzamelde informatie ten aanzien van de geologische opbouw, de putten en de ervaringen uit gaswinning zijn ook binnen Porthos bruikbaar, met op een beperkt aantal punten een actualisatie. De onderstaand rapporten waren als bijlage bij het Deelrapport Ondergrond van ROAD opgenomen en zijn vanwege hun relevantie in het Porthos onderzoek benut:

- CATO-2 (2011): Feasibility study P18 (final report). Vandeweyer et al. (CATO2-WP3.01-D06).
- PanTerra Geoconsultants B.V. (2011): Geschiedenis en beschrijving van de P18-reservoirs.

Vervolgstudies bij nadere uitwerking injectiestrategie

Tegelijk met de detailengineering van de overige projectonderdelen, wordt ook de injectiestrategie verder uitgewerkt met behulp van specifiekere modellen. Hiermee kunnen de te verwachten processen nog beter in beeld worden gebracht. Dit is wenselijk om zo te komen tot een zo voorspelbaar mogelijke injectiestrategie. De detailmodellering wordt gebruikt om voorafgaand aan de CO₂-injectie de injectiestrategie en de plannen bij de opslagvergunning operationeel uit te werken.

De bevindingen uit deze modelstudies zullen worden besproken met het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en haar adviseur SodM, zodat voorafgaand aan de start van CO₂-injectie inzicht is in alle relevante processen.

³ CATO is een afkorting voor CO₂ Afvang, Transport en Opslag

1.3 Opzet van het deelrapport

In dit deelrapport wordt in hoofdstuk 2 eerst ingegaan op de wet- en regelgeving, voor zover die van toepassing is op de ondergrondse opslag van CO₂. Daarna wordt in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de huidige ervaringen met CCS-projecten, waarbij dit in Nederland ten aanzien van de haalbaarheidsfase betreft en internationaal ten aanzien van operationele projecten. Vanaf hoofdstuk 4 wordt specifiek ingegaan op CO₂-opslag in de P18-reservoirs.

In hoofdstuk 4 wordt als eerste de lokale geologie en vervolgens de geschiedenis van aardgaswinning in dit gebied beschreven. In hoofdstuk 5 wordt daarna ingegaan op de opslag van CO₂ en de mogelijke veranderingen die hierbij ontstaan. Vervolgens geeft hoofdstuk 6 een beschrijving van de risicoanalyse, vooral gericht op de mogelijke lekkage van CO₂ uit de reservoirs.

Hoofdstuk 7 geeft de benodigde monitoring weer en in hoofdstuk 8 worden de leemten in kennis en informatie behandeld. Tot slot zijn de woordenlijst en de achtergrond literatuur opgenomen in hoofdstuk 9 en 10.

2 Wet- en regelgeving ondergrondse opslag

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op internationale wetgeving rondom CO₂-opslag, de Nederlandse vertaling van deze regelgeving in de Mijnbouwwet, en de internationale verdragen.

2.1 EU richtlijn over CO₂-opslag

De Europese Unie heeft in 2009 de CCS Directive vastgesteld, een raamwerk voor de toepassing van CCS binnen de EU. De regelgeving is concreet op sommige punten, maar op andere is het door de individuele landen, indien gewenst, nader in te vullen. Nederland heeft de CCS Directive overgenomen in de Mijnbouwwet. In paragraaf 2.2 is deze beschreven.

Concurrentieregeling opslagreservoirs

De CCS Directive beschrijft de benodigde informatie voor de aanvraag en de te volgen procedures. Onderdeel van de CO₂-opslag vergunningsaanvraag procedure is dat nadat de vergunningsaanvraag is ingediend, deze gepubliceerd dient te worden in de Staatscourant en dat vervolgens, gedurende een periode van 3 maanden⁴, derden de kans krijgen een concurrerend verzoek voor CO₂-opslag in te dienen.

EU toetst consistentie opslagvergunning

Om te zorgen voor consistentie in de toepassing van CCS binnen de Europese Unie worden de ontwerp-vergunningen door de EU getoetst. Dat betekent dat het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat een in het Engels vertaalde versie van de ontwerp-vergunning opstuurt aan de EU. De toetsing duurt 4 maanden, en start nadat verduidelijkende vragen gesteld en beantwoord zijn.

2.2 Mijnbouwwet

De Mijnbouwwet geeft aan dat er voor CO₂-opslag een opslagvergunning vereist is. Hierbij is de Minister van Economische Zaken en Klimaat het bevoegd gezag.

Opslagvergunning, maar geen opslagplan

In tegenstelling tot een procedure voor een opslagvergunning is een aparte procedure voor een opslagplan niet van toepassing. Dit volgt uit artikel 39 lid 2 Mijnbouwwet. De achterliggende gedachte is hierbij dat de beschrijving in de aanvraag voor de opslagvergunning al zodanig uitgebreid is, dat hierin alle benodigde informatie is vermeld.

Vier plannen bij aanvraag opslagvergunning

Er worden vier plannen gevraagd bij de opslagvergunningaanvraag, te weten:

- Risicobeheersplan;
- Plan voor corrigerende maatregelen⁵;
- Voorlopige plan voor afsluiting;
- Monitoringsplan.

Voor deze plannen geldt dat een half jaar voor de start van operatie de plannen operationeel gemaakt moeten worden en worden goedgekeurd door het bevoegd gezag.

⁴ Mijnbouwwet artikel 26b3 : tot dertien weken na de dag van plaatsing van de uitnodiging in de Staatscourant.

⁵ Corrigerende maatregelen treden in werking als de meetwaarden buiten de vooraf opgestelde bandbreedte komen. Dit in tegenstelling tot mitigerende maatregelen die vooraf worden genomen om te voorkomen dat een bepaald effect kan optreden of het effect te beperken.

In de Mijnbouwwet is onder meer artikel 31b relevant voor de vergunningaanvraag voor CO₂-opslag:

Artikel 31b - Mijnbouwwet

Een aanvraag om een vergunning voor permanent opslaan van CO₂ omvat ten minste de volgende onderwerpen:

- a. het tijdvak van injectie van CO₂ en de omvang van het vergunningsgebied,
- b. een karakterisering van het opslagvoorkomen en het opslagcomplex en een beoordeling van de verwachte veiligheid van de opslag,
- c. de technische en financiële mogelijkheden van de aanvrager,
- d. de totale hoeveelheid CO₂ die zal worden opgeslagen,
- e. de toekomstige bronnen van CO₂ en transportmethoden,
- f. de samenstelling van de CO₂-stroom,
- g. de maximum toelaatbare snelheid en druk bij injectie van CO₂ en de maximaal toelaatbare druk van de opgeslagen CO₂,
- h. de ligging van het voorkomen waar CO₂ zal worden opgeslagen,
- i. risicobeheer,
- j. monitoring,
- k. afsluiting,
- l. corrigerende maatregelen,
- m. bodembeweging, en
- n. een omschrijving van de financiële zekerheid of een gelijkwaardige voorziening die gesteld zal worden en een bewijs dat deze rechtsgeldig en daadwerkelijk wordt gesteld voordat met de opslag van CO₂ wordt aangevangen.

Artikel 31j geeft de condities weer met betrekking tot de afsluiting van een CO₂-opslagvoorkomen na afronding van de injectieperiode.

2.3 Internationale verdragen - OSPAR

Bij de opslag van CO₂ dient met internationale verdragen rekening gehouden te worden. Hier geldt dat specifiek voor het OSPAR-Verdrag. Het OSPAR-Verdrag, inzake de bescherming van het mariene milieu in het noordoostelijk deel van de Atlantische Oceaan, heeft als doel door internationale samenwerking het maritieme milieu in de dit deel van de oceaan, inclusief de Noordzee, te beschermen. De belangrijkste doelstellingen van dit verdrag zijn:

- het voorkomen en beëindigen van de verontreiniging van het mariene milieu;
- het beschermen van het zeegebied tegen de nadelige effecten van menselijke activiteiten teneinde de gezondheid van de mens te beschermen en het mariene ecosysteem in stand te houden en, wanneer uitvoerbaar, aangetaste zeegebieden te herstellen.

Het verdrag streeft naar een duurzaam beheer van het betrokken gebied, wat inhoudt "een zodanig beheer van menselijke activiteiten dat het mariene ecosysteem het rechtmatig gebruik van de zee kan blijven dragen en kan blijven voorzien in de behoeften van de huidige en toekomstige generaties".

Daarbij moeten een aantal principes toegepast worden:

- het voorzorgsbeginsel (neem preventieve maatregelen als er een redelijk vermoeden is dat er een nadelige impact op het milieu zal zijn, zelfs al is daar geen bewijs voor);
- het beginsel de vervuiler betaalt;
- de beste beschikbare technieken, beste milieupraktijk en schone technologie aanwenden.

3 Ervaringen met CCS-projecten

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op eerdere ervaringen met CCS in Nederland en internationaal. Eerst wordt ingegaan op de beschikbare ervaringen in Nederland. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van internationale CCS-projecten.

3.1 CCS in Nederland

De omstandigheden in Nederland lijken heel geschikt voor CCS, gezien de dichtheid aan bronnen (industrieën) bij de kust, de beschikbaarheid van leeggeproduceerde gasvelden in de Noordzee en de aanwezigheid van veel expertise bij de olie- en gasindustrie. Vooral nog is er echter vooral veel studie gedaan naar CCS en is voor een aantal projecten de haalbaarheidsfase doorlopen. De hoeveelheid daadwerkelijk opgeslagen CO₂ is echter heel beperkt, alleen bij een kleinschalige pilot.

Onderstaand wordt kort ingegaan op de meest recente onderzoeken die beoordelen wat de mogelijkheden zijn om CCS als mitigerende klimaatmaatregel in te voeren in Nederland. Daarna wordt het CATO-programma, waarmee de overheid de afgelopen 15 jaar onderzoek naar CCS in Nederland heeft gestimuleerd, kort beschreven. Daarna volgt de beschrijving van eerdere Nederlandse CCS-projecten, die uiteindelijk niet gerealiseerd zijn, en het pilotproject K12-B, waarbij daadwerkelijk CO₂ is opgeslagen onder Nederlandse bodem. In hoofdstuk 3.2 is aandacht voor internationale ervaringen.

De onderzoeksprogramma's en de haalbaarheidsstudies hebben rapportages opgeleverd, die nuttig zijn voor Porthos.

3.1.1 Onderzoeken toepassing CCS in Nederland

De twee meest recente onderzoeken naar toepassing van CCS in Nederland zijn:

- Transport en opslag van CO₂ in Nederland, Verkennende studie door Gasunie en EBN in opdracht van het ministerie van Economische Zaken, november 2017.
- Routekaart CCS, CO₂-afvang en -opslag, een ongemakkelijk maar onmisbaar onderdeel van de energietransitie, door CE Delft en De Gemeynt, maart 2018.

3.1.2 Onderzoeksprogramma CATO

CATO is het nationale onderzoeksprogramma van Nederland voor onderzoek naar CO₂-afvang, transport en opslag. Er zijn twee vierjarige programma's uitgevoerd, CATO-1 en CATO-2, waarbij CATO-2 ondersteunend onderzoek heeft uitgevoerd voor het CCS project ROAD. Resultaten van dit onderzoeksprogramma zijn ook voor Porthos relevant. Momenteel is een derde fase van CATO operationeel.

3.1.3 CO₂-opslag als onderdeel van de m.e.r.-procedure

Met CCS wordt CO₂ opgeslagen in diepe ondergrondse gesteentelagen. De gesteentelagen die voor Porthos relevant zijn vormen formaties die zich op circa 3 kilometer diepte bevinden. Dit is ruim onder de eerste 500 meter van de ondergrond, die veelal tot de biosfeer wordt gerekend, en waarvoor milieunormen gelden.

Het produceren van aardgas of aardolie uit deze lagen is niet als een milieueffect aangemerkt en de opslag van CO₂ in dit gesteente kan evenmin gezien worden als een milieueffect. Toch is het wenselijk in een m.e.r.-procedure inzichten te geven wat de gevolgen zijn van CO₂-opslag.

Potentiele effecten van CO₂-opslag in en op de diepe ondergrond kunnen gevolgen hebben, bijv. op de biosfeer, waardoor een beschrijving in het MER noodzakelijk is:

- Het kan zijn dat de CO₂-opslag zelf in de diepe ondergrond geen milieueffecten heeft, maar er in de diepe ondergrond wel veranderingen optreden, chemisch, mechanisch, en/of thermisch. Deze veranderingen kunnen indirect tot milieueffecten leiden in de biosfeer, zodat dit goed in beeld moet worden gebracht;
- Bij het opslaan van CO₂ in de diepe ondergrond moeten ongewenste omstandigheden in beeld gebracht worden, zodat duidelijk wordt met welke risico's er rekening gehouden moet worden. Deze risico's kunnen mogelijk gevolgen hebben in de biosfeer. Hiervoor worden vervolgens mogelijke mitigerende maatregelen beschreven;
- Aan het publiek op toegankelijke wijze beschreven kan worden welke processen zich naar verwachting voordoen in de diepe ondergrond. Gezien de zorgen die betrokkenen hebben met betrekking tot de opslag van CO₂ in de diepe ondergrond, vormt het MER de mogelijkheid dit te verduidelijken en er in publieksbijeenkomsten nader op in te gaan.

Methodiek om CO₂-opslag te beschrijven in een MER

Op basis van voorgenoemde criteria is het zodoende van belang de gevolgen en risico's van CO₂-opslag op te nemen in het MER. Aangezien dit niet kan conform de andere milieuthema's, is hiervoor een apart deelrapport opgesteld. De methodiek waarmee de CO₂-opslag hier wordt beschreven is gebaseerd op de wijze waarop dit eerder succesvol is toegepast in CCS-projecten zoals onderstaand toegelicht.

3.1.4 AMESCO

In het AMESCO-project heeft de vraag hoe CO₂-opslag in een MER kan worden beschreven en wat de bevoegde gezagen kunnen verwachten van een dergelijk MER centraal gestaan. Hierbij is een Algemene Milieu Effecten Studie voor CO₂ Opslag (AMESCO) uitgevoerd, een generieke MER. Op basis de AMESCO kunnen projecten vervolgens een project specifieke MER opstellen. Met behulp van dit generieke MER is consensus ontstaan bij een grote groep potentiële bevoegde gezagen (Rijk en provincies) en initiatiefnemers (olie- en gaswereld, energiebedrijven, etc.). Het onderzoek is uitgevoerd door een breed consortium (van CE Delft, Ecofys, Golder Associates en TNO onder leiding van Royal HaskoningDHV). Middels workshops zijn aanvullend inzichten vanuit betrokken experts en instanties verzameld. Dit heeft geresulteerd in het AMESCO rapport in 2007. Het rapport is voorgelegd aan de commissie voor de m.e.r., die zich met wat aanvullende suggesties, kon vinden in de gepresenteerde aanpak.

De voorgestelde methodiek voor toetsing bestaat op hoofdlijnen uit twee onderdelen:

Overzicht van veranderingen in de ondergrond, met mogelijke doorwerking naar de biosfeer:

- Chemisch, mechanisch en/of thermisch veranderingen, inclusief mogelijke bodemstijging;
- Beperking gebruik van het reservoir en beperking gebruik omliggende formaties.

Overzicht van mogelijke risico's voor de biosfeer ten gevolge van lekkage:

- Detecteren van verschillende migratie- en lekroutes;
- Toepassing van de bow-tie analyse voor de beschreven mogelijke lekroutes.

3.1.5 Project-MER CO₂-opslag Barendrecht

Na afronding van het AMESCO-onderzoek is NAM gestart met het project CCS-Barendrecht. Voor de MER is voor de specifieke situatie van de leeg geproduceerde gasvelden van Barendrecht de AMESCO-methodiek toegepast. In 2008 is het MER voor CO₂-opslag Barendrecht ingediend bij de commissie voor de m.e.r. Hoewel de commissie een positief advies heeft gegeven over dit MER, is het project uiteindelijk stopgezet.

Karakteristieken van CCS Barendrecht

Bij Barendrecht bevindt zich een geschikte CO₂-bron, waar zeer zuivere CO₂ wordt afgevangen, nabij een leeggeproduceerd gasveld, waarvan de putten nog niet zijn geabandonneerd en dus bruikbaar zijn.

Bij Shell Nederland Raffinaderij (SNR) vindt al afvang van CO₂ plaats. Een deel van deze CO₂ wordt geleverd aan de glastuinbouw via OCAP⁶ (bestaande uit Linde Gas en VolkerWessels) en de frisdrankindustrie. De resterende hoeveelheid CO₂ zou naar de injectielocaties worden getransporteerd middels een nieuw aan te leggen pijpleiding. Met behulp van de (aangepaste) bestaande putten kan het CO₂ vervolgens worden opgeslagen in de leeggeproduceerde Barendrecht aardgasreservoirs.

Voor het CCS-project is een samenwerkingsverband opgericht tussen Shell en OCAP. Het rijk had toegezegd een financiële bijdrage te leveren aan dit soort demonstratieprojecten.

Het project zou bestaan uit twee delen:

- Deel 1: Injectie van ongeveer 0,8 miljoen ton CO₂ in het kleinere reservoir bij de locatie Barendrecht, vanaf begin 2011 gedurende bijna drie jaar.
- Deel 2: Injectie van ongeveer 9,5 miljoen ton CO₂ in het grotere reservoir bij de locatie Barendrecht-Ziedewij, gedurende de daaropvolgende 25 jaar.

Het MER voor CCS Barendrecht is opgesteld en goed beoordeeld door de commissie voor de m.e.r. De vergunningsaanvragen zijn ingediend en in behandeling genomen. Vanuit de lokale bevolking is veel weerstand ontstaan tegen CO₂-opslag in velden onder bebouwd gebied. Uiteindelijk hebben de betrokken ministeries besloten het project niet te steunen. In het verlengde hiervan is besloten dat in de komende periode CO₂-opslag onder land niet meer aan de orde is, en dat alleen opslag onder zee onderzocht zal worden.

3.1.6 MER ROAD P18 in 2011

ROAD met opslag in P18-4 veld onder zee is onderzocht in 2009 - 2011

In 2009 hebben de bedrijven E.ON (tegenwoordig Uniper) en Electrabel (tegenwoordig Engie) het initiatief ondernomen van een CCS-demonstratieproject, het "Maasvlakte CCS-demonstratieproject", kortweg aangeduid als het ROAD-project. Het ROAD-project staat voor Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject. Voor de uitvoering is samengewerkt met GDF SUEZ (tegenwoordig Engie) voor het transportgedeelte en TAQA voor de ondergrondse opslag. Het ROAD-project was bedoeld als demonstratieproject, gericht op de periode 2015-2020, waarin gemiddeld 1,1 megaton CO₂ per jaar zou worden afgevangen. De inhoudelijke omschrijving van het project was als volgt:

Nadat het CO₂ is afgevangen bij de Uniper-kolencentrale, wordt het gecompriëerd en naar de buisleiding gevoerd, die verbonden is met de P18 reservoirs. Er is gekozen voor een 16" buisleiding om de ontwerpwaarde van 47 kg/s te behalen om zodoende te voldoen aan het transporteren van gemiddeld 1,1 Mton CO₂ per jaar ook in de gasfase.

⁶ OCAP is de afkorting van Organic CO₂ for Assimilation by Plants (Organische koolstofdioxide voor assimilatie door planten).

Binnen het project zal de druk van het CO₂ oplopen naar circa 128 bar. Bovendien is de buisleiding in staat om te opereren bij een hogere druk: de ontwerpdruk van de buisleiding is 175 bar. De buisleiding is in staat om 5 Mton CO₂ per jaar te transporteren bij hogere drukken. Deze capaciteit zal toegepast worden als de technische omstandigheden dit toelaten. De operatie met hogere druk maakt het mogelijk om in de toekomst CO₂-transport en -opslag van derden mogelijk te maken.

Bij de start van het ROAD-project in 2010 werd het leeggeproduceerde P18-4 gasveld als opslaglocatie gekozen. Dit veld is in beheer van olie- en gasproducent TAQA Energy B.V. Het P18-4 gasveld ligt circa 20 kilometer uit de kust en vormt een kansrijke opslaglocatie.

Het vergunningstraject van het ROAD-project werd in september 2010 in gang gezet met het indienen van de concept Notitie Reikwijdte en Detailniveau (NRD). Hiermee startte de uitgebreide m.e.r.-procedure. Vervolgens werd in juni 2011 het MER ROAD ingediend, waarna de Commissie voor de m.e.r. advies uitbracht. Met het MER als onderbouwing werden de verschillende vergunningaanvragen goedgekeurd, waarvan de vergunningen voor de afvang van CO₂ en de CO₂-opslag inmiddels onherroepelijk zijn geworden.

Nadat de MER was afgerond, de benodigde vergunningsaanvragen waren ingediend en in behandeling waren genomen, werd duidelijk dat gezien de lage CO₂-prijzen deze uitwerking van het CCS-project ROAD niet rendabel gemaakt kon worden. Als gevolg daarvan is het project stop gezet en is nagegaan of er een goedkopere uitvoering mogelijk zou zijn.

3.1.7 ROAD Q16-Maas

Nadat opslag 20 km uit de kust te kostbaar was gebleken, is er naar een alternatieve opslaglocatie gezocht. Er werd een andere, goedkopere opslaglocatie gevonden in het Q16-Maas gasveld van olie- en gasproducent Oranje-Nassau Energie B.V. (ONE). Voor het Q16-Maas gasveld zijn de transportkosten aanzienlijk lager, doordat het veld slechts enkele kilometers uit de kust ligt en vanuit een landlocatie is aangeboord. Dit nieuwe alternatief wordt aangeduid als het Q16-Maas alternatief.

ROAD, aangepast ontwerp, voornemen uit 2016

Het Q16-Maas gasveld is in productie door ONE-Dyas en produceert naast aardgas ook aardgascondensaat. Geleidelijk aan ontstaat er door verlaging van de druk in het reservoir capaciteit om CO₂ op te slaan. Het voornemen is om een tweede put in het veld te boren, die in eerste instantie dient voor het verhogen van de productiecapaciteit. Als gevolg hiervan zal er sneller voldoende capaciteit beschikbaar komen in het reservoir voor de opslag van CO₂. In een later stadium wordt één van de twee beschikbare putten gebruikt om CO₂ te injecteren. De andere put blijft gas en aardgascondensaat produceren, met een toenemend percentage CO₂. Het meegeproduceerde CO₂ zal bij behandeling afgescheiden worden, zodat het opnieuw geïnjecteerd kan worden.

Voor de aangepaste uitwerking van het ROAD project is een begin gemaakt van een MER. Het ROAD-project had tot doel de CO₂-emissie van de bestaande kolencentrales van Uniper en op termijn Engie sterk te beperken. Vanwege het politieke besluit de kolencentrales te sluiten, uiterlijk in 2030, achten de initiatiefnemers de benodigde investeringen in het ROAD-project niet meer zinvol. Hierdoor is het ROAD project gestopt.

3.1.8 CCS-Pilot K12-B

Gas geproduceerd uit het K12-B veld bevatte 13% CO₂. Aangezien dit percentage te hoog was voor de transportleiding naar land, werd het CO₂ gescheiden van het aardgas.

Initieel werd dit gas afgeblazen in de atmosfeer, maar in het kader van onderzoek naar CO₂-opslag is besloten de afgescheiden CO₂ terug het reservoir in te leiden. Gedurende de periode 2004 - 2006 heeft het toenmalige GDF Suez het afgescheiden CO₂ terug geïnjecteerd in het gasveld. Injectie, en dus ook aardgasproductie, vond plaats in de Rotliegend zandsteenformatie, op circa 3.800 meter diepte. De omvang van CO₂-injectie is ongeveer 0,2 Mton CO₂ per jaar geweest. Het K12-B is het eerste reservoir ter wereld waarin gewonnen CO₂ terug is geïnjecteerd.

3.1.9 Internationale ervaringen

De bovenbeschreven CCS-initiatieven zijn, met uitzondering van de Pilot K12-B, niet tot realisatie gekomen. Dan rest de vraag "Waarom is Porthos wel realiseerbaar en welke ervaringen zijn er geleerd uit de voorgaande trajecten?"

De redenen waarom de eerdere CCS-projecten vroegtijdig zijn gestopt, gelden niet of in mindere mate voor Porthos. Zo hebben enerzijds politieke afwegingen en besluiten, zoals geen CO₂-opslag onder land en het op relatief korte termijn sluiten van de kolencentrales, een belangrijke rol gespeeld in het vroegtijdig termineren van voorgaande CCS-projecten. Maar aangezien bij Porthos opslag van CO₂ onder zee is voorzien en de leveranciers geen fossiele elektriciteit-opwekkers maar industrieën in de transitie naar CO₂-arme productieprocessen zijn, zijn de eerdere bewaren/show-stoppers hier niet van toepassing. Anderzijds speelde bij ROAD tevens de zeer lage CO₂-prijzen een belangrijke rol. De prijs van CO₂ is inmiddels gestegen en zal naar verwachting op de langere termijn verder stijgen, als hiervoor de benodigde politieke besluiten worden genomen.

De eerdere CCS-initiatieven hebben verder inzicht gegeven in de juridische aspecten van een CCS-project, inclusief de ervaring van het aanvragen en vergund krijgen van een CO₂-opslagvergunning voor P18-4. De eerder uitgevoerde studies van het ROAD-project zijn bruikbaar gebleken, met in sommige gevallen een update. De projecten hebben tevens ervaringen opgeleverd met betrekking tot transport van CO₂ en behandeling in installaties. Voor de benodigde externe veiligheidsberekening (QRA) is een aangepaste methodiek ontwikkeld, toepasbaar zolang er geen specifiek rekenmodel is opgesteld en gevalideerd voor CO₂-transport en behandeling.

De technieken van afvang, transport en injectie van CO₂ in de diepe ondergrond worden internationaal al jarenlang onderzocht. De Global CCS Institute meldt dat er in 2019 circa 20 CCS-projecten operationeel zijn. Het merendeel van de projecten is direct gekoppeld aan de olie- en gasproductie, maar andere toepassingen komen in toenemende mate in beeld. Grofweg kunnen alle CCS projecten in vijf categorieën worden ingedeeld:

- Enhanced recovery; injectie van CO₂ om de productie van olie of gas uit een reservoir te stimuleren, en vormt daarmee onderdeel van de bestaande olie- en gaswinning.
- CO₂-afvang direct bij het productieplatform en opslag van het afgescheiden CO₂ in een reservoir of aquifer. K12-b is hiervan een voorbeeld.
- Reductie CO₂-emissies bij elektriciteitsopwekking; bij gasgestookte, maar vooral kolengestookte energiecentrales. Afvangtechnieken worden toegevoegd aan elektriciteitscentrales. Hiermee ontstaat de mogelijkheid elektriciteit met lage CO₂-emissies op te wekken uit fossiele brandstoffen. Het ROAD-project was hiervan een voorbeeld.
- Reductie CO₂-emissies bij de industrie. Dit kan bestaan uit het toevoegen van afvanginstallaties, het aanpassen van bestaande processen of het benutten van CO₂ dat al vrij komt en rechtstreek wordt geëmitteerd. De CO₂ kan vervolgens van een of meerdere industrieën worden verzameld en afgevoerd naar reservoirs voor opslag. Porthos is hiervan een voorbeeld.

- Productie van blauwe waterstof. Hierbij wordt waterstof uit aardgas geproduceerd met CO₂ als bijproduct. Het CO₂ wordt vervolgens getransporteerd en opgeslagen. De eerste projecten hiervoor zijn in voorbereiding.

Onderstaand wordt een aantal internationale CCS-projecten kort beschreven. Hieruit blijkt dat grootschalige opslag van CO₂ al op meerdere locaties plaatsvindt, maar vooral in aquifers. Grootschalige opslag in leeggeproduceerde gasvelden is nog relatief nieuw.

Gorgon-project in Australië – opslag onder land

In augustus 2019 meldt Chevron dat bij de Gorgon LNG plant de afvang van CO₂ is gestart. Het is daarmee een van de grootste mitigatieprojecten voor CO₂-emissies. De afvang bij de LNG plant was oorspronkelijk voorzien in 2016, maar werd door technische oorzaken meerdere keren vertraagd. De CCS toepassing is een onderdeel van het grotere Gorgon project, waarbij CO₂ dat vrijkomt bij het liquefaction proces in het LNG station wordt getransporteerd en opgeslagen. Opslag vindt plaats in een reservoir 2 km onder Barrow Island. Hiervoor zijn er drie injectielocaties met in totaal 9 putten. Opslag vindt plaats door injectie in de Dupuy Formation, waarin het opgeslagen blijft.

Chevron verwacht meer dan 100 Mton CO₂ gedurende een periode van circa 40 jaar te injecteren. Zodra het project volledig operationeel is, zal dit de grootste geologische opslag in de wereld vertegenwoordigen, met een capaciteit van 3,4 tot 4 Mton CO₂ per jaar.

Quest in Canada – opslag onder land

De Quest CCS faciliteiten zijn gekoppeld aan de door Shell-beheerde Scotford Upgrader bij Fort Saskatchewan, Alberta. Hier worden oliezanden omgezet in synthetische olie, geschikt voor raffinage. De afgescheiden CO₂ wordt getransporteerd via een 65-kilometer lange pijpleiding en geïnjecteerd in een reservoir op een diepte van meer dan twee kilometer.

In een periode van minder dan 4 jaar heeft het Quest CCS-project circa 4 Mton CO₂ afgevangen en veilig opgeslagen. Daarmee heeft Quest de grootste hoeveelheid CO₂ in geologische formaties onder land opgeslagen.

Sleipner, Noorwegen – opslag onder zee in een aquifer

Het Sleipner veld wordt sinds 1996 door Equinor gebruikt voor de opslag van CO₂. Daarmee is dit het langstlopende opslagproject ter wereld. Ieder jaar wordt circa 1 Mton CO₂, afgescheiden van de aardgaswinning, opgeslagen. Equinor heeft daarmee meer dan 20 jaar ervaring met hoe de opgeslagen CO₂ zich in een aquifer verspreidt.

Het aardgas wat Equinor produceert, en waar het de CO₂ van afscheidt, bevat van nature circa 9% CO₂. De leveranciers specificaties schrijven voor dat dit percentage onder de 2,5% dient te blijven. Met behulp van amine-technologie wordt de CO₂ daarom gescheiden van het geproduceerde gas en geschikt gemaakt voor injectie.

Injectie vindt plaats in de Utsira Formatie. Deze formatie bestaat uit 200 tot 250 meter dikke zandsteenlagen. In deze formatie kan naar verwachting circa 600 Mton CO₂ worden opgeslagen. Uit 3D-seismische monitoring van de opgeslagen CO₂ blijkt dat er geen lekkage van CO₂ naar bovenliggende lagen optreedt.

Northern Lights, Noorwegen – nieuw project met opslag onder zee, transport per schip

Het Northern Lights consortium bestaat uit Equinor , Shell en Total. Het voornemen van het consortium is om een open systeem te bouwen, voor transport en opslag. Northern Lights voorziet in transport van CO₂ per tanker vanuit verschillende locaties naar een terminal bij Bergen, aan de westkust van Noorwegen. Daar wordt de CO₂ opgeslagen in hoge druk tanks, waarvandaan het middels een pijpleiding naar injectieputten op zee wordt getransporteerd. Hierbij is geen nieuw platform voorzien. De putten worden geregeld vanaf de bestaande infrastructuur op het Noorse continentale plat.

4 Geologische opbouw en gaswinning

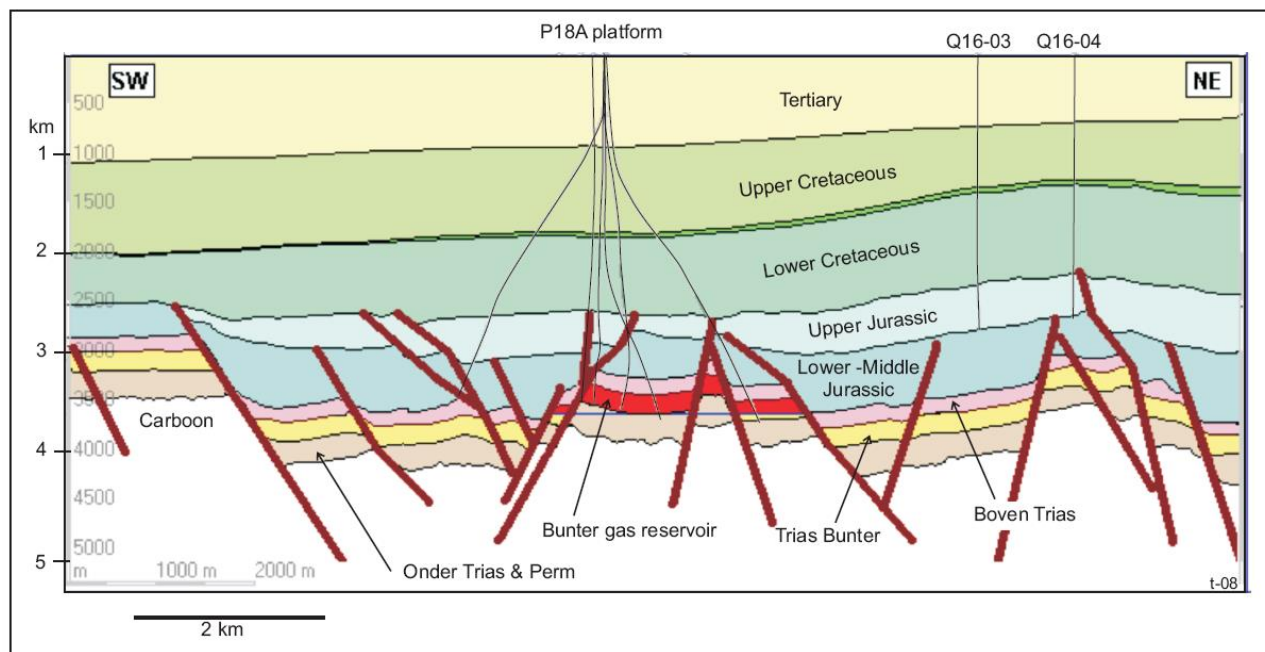
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de opbouw van de ondergrond, de reservoirs en de kennis die is opgedaan van de reservoirs gedurende de periode van gaswinning.

Zoals toegelicht in hoofdstuk 1 zijn de P18-reservoirs het meest geschikt voor opslag van CO₂ vanuit de Porthos-infrastructuur. Niet alleen zijn de reservoirs vrijwel leeggeproduceerd, ze hebben naar verwachting een goede injectiviteit en voldoende capaciteit. Daarnaast is de afstand tot deze reservoirs beperkt, ten opzichte van de ligging van andere mogelijke reservoirs.

Hieronder wordt een korte beschrijving gegeven van de geologische lagen in het P18-veld en de directe omgeving. Daarna wordt ingegaan op de aanwezige reservoirs in P18. Tot slot wordt de winningsgeschiedenis van de P18-reservoirs beschreven en de te verwachten ontwikkelingen in de nabije toekomst.

4.1 Geologische opbouw

De P18-reservoirs maken onderdeel uit van de Lower Germanic Trias Group van de Main Buntsandstein Subgroup. Ze zijn afgezet in het Trias tijdperk in het West Nederland Bekken. Een doorsnede van de ondergrond nabij platform P18-A, met daarin aangegeven de putten, is weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1. Doorsnede door de P18-reservoirs. De putten zijn geprojecteerd in het vlak van doorsnede. In het rood zijn de gasreservoirs weergegeven (bron: TAQA).

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de bodemopbouw (lithostratigrafie) van het West Nederland Bekken, ter hoogte van de P18-reservoirs. Dit overzicht is gebaseerd op het rapport van PanTerra (2011), waarin de geologische opbouw in het gebied in meer detail is uitgewerkt. De opeenvolging van lagen wordt onderverdeeld op hun ouderdom, met de jongste-ondiepste lagen als eerste en de oudste-diepeste lagen als laatste.

Tabel 4.1. Beknopt overzicht van de ondergrondopbouw van het West Nederland Bekken (zie bijlage 2).

Tijdperk	Beschrijving
Tertiair	De zeebodem bevindt zich op ongeveer 20-35 m diepte. Het Boven Tertiair is ongeveer 388 m dik en bestaat uit ongeconsolideerde zanden en kleien van de <i>Boven Noord Zee Groep</i> . Het Onder Tertiair is 458 m dik en bestaat voor het grootste deel uit kleien.
Krijt	De top van het Krijt bevindt zich op ongeveer 850 - 950m diepte. De basis van het Krijt op 2.490-2.575 m. De dikte van het Krijt kan aanzienlijk variëren in het P18 gebied en daarbuiten. De formaties in het Krijt bevatten mergelachtige kalken aan de top en kleien en zandstenen naar de basis toe.
Jura	Afdekkende laag De Jura is ongeveer 400 m dik en bestaat uit een viertal formaties: <i>Werkendam Formatie</i>, <i>Posidonia Formatie</i>, <i>Aalburg Formatie</i> en <i>Sleen Formatie</i>. De formaties bestaan voornamelijk uit klei of kleisteen met plaatselijk enkele dunnere inschakelingen van silt en dolomiet. Evaporieten worden tevens aangetroffen. Het Jura laagpakket kan aanzienlijk van dikte verschillen in dit gebied. Over de P18-gasreservoirs is het in de orde van 400 – 500 m dik. De afzettingen van de Altena Group vormen onderste gedeelte van het bovenste deel van de afdekkende laag.
Trias	De top van de Trias bevindt zich boven de P18 gasreservoirs op een diepte van ongeveer 2.900-3.100m. Naast de gasreservoirs varieert de top van de Trias. Afdekkende laag Het bovenste gedeelte van de Trias Formatie is ongeveer 150 tot 175 m dik en bestaat voornamelijk uit kleisteen met ingeschakeld dunnere lagen van anhydriet en dolomiet. Er worden een viertal formaties onderscheiden, van boven naar beneden zijn dat: de <i>Keuper Formatie</i> (40 m dik), de <i>Muschelkalk Formatie</i> (107 m dik), de <i>Röt Formatie</i> (18 m) en de <i>Söling Claystone Member</i> (18m). De formaties vormen tezamen de Upper Germanic Trias Group. De afsluitende top laag van de Upper Germanic Trias Group vormt samen met de afzettingen van de Altena Group de 'primary seal' over de P18 gasreservoirs. Reservoirgesteente Het volgende pakket bestaat overwegend uit zandsteen en is ongeveer 215 m dik in de P18-gasreservoirs. Informeel wordt dit pakket wel de Bunter zandsteen genoemd. In het pakket kunnen drie formaties worden onderscheiden: de <i>Hardeggen Formatie</i>, de <i>Detfurth Formatie</i> en de <i>Volpriehausen Formatie</i>. Bij de <i>Detfurth Formatie</i> wordt onderscheid gemaakt tussen de <i>Upper</i> en <i>Lower Detfurth Formatie</i>. De diepste formatie van de Trias is de <i>Lower Buntsandstein Formatie</i> en is 140-170 m dik. Deze formatie bestaat voornamelijk uit kleisteen.
Perm	Het Perm in dit gebied bestaat vooral uit zandsteen en is variabel in dikte. In de putten van P18 is 30 tot 95 m gemeten.
Carboon	De top van het Carboon werd aangetroffen op een diepte van 3.500 tot 3.700 m.

4.2 Terminologie

Blokaanduiding voor vergunningen

Voor de opsporing en winning van delfstoffen is het Nederlands Continentaal Plat (NCP) op de Noordzee opgedeeld in blokken (zoals weergegeven in figuur 1.1). Per blok of deelblok kunnen winningvergunningen worden verleend, voor winning van delfstoffen zoals aardolie en aardgas.

De voorgenomen opslaglocatie voor het Porthos-project is grotendeels gelegen in het P18-blok. Een deel van de reservoirs P18-2 en P18-6 bevinden zich echter in het P15-blok.

Bij gaswinning uit een reservoir dat zich uitstrekt over meerdere blokken, wordt één vergunning voor het gehele reservoir gegeven, gekoppeld aan één van beide (deel)blokken. De huidige vergunningen voor gaswinning uit de P18-reservoirs hebben betrekking op de deelblokken P18a, P18c en P15c.

Voor de platforms, reservoirs en putten wordt tevens een codering aangehouden, waarin het betreffende blok is aangegeven.

Platform-aanduiding

In deze rapportage wordt bij verwijzing steeds gebruik gemaakt van een standaardiseerde codering⁷. Voor de putten geldt bijvoorbeeld dat alle putten met A in de naam zijn geboord vanaf het P18-A platform. Het nummer achter de A is een volgorde nummer, eerst A1, daarna A2, daarna A3 etc. Het nummer voor de A refereert naar het reservoir.

Velden en reservoirs

In Nederland wordt zowel over gasvelden als over gasreservoirs gesproken. Hierbij wordt met bijvoorbeeld het gasveld P18-2 de combinatie van de verschillende gashoudende formaties over elkaar aangeduid. De afzonderlijke gashoudende formaties worden vervolgens als reservoirs aangeduid. Bij P18-2 is sprake van meerdere reservoirs, die in direct onderling contact staan. Daar waar geen onderscheid te maken is tussen de reservoirs, geldt zodoende dat de aanduiding P18-2 reservoirs gelijk staat aan P18-2 veld. Dit geldt in gelijke mate voor P18-4 en P18-6. In dit MER wordt zoveel mogelijk de term *reservoirs* gebruikt, om de gezamenlijke formaties aan te duiden waarin opslag van CO₂ zal plaatsvinden.

Putten en aftakkingen (sidetracks) – vereenvoudigde aanduiding aangehouden

Bij meerdere putten zijn zogenaamde side tracks geboord, waarbij binnen de bestaande put een nieuwe tak is aangeboord. Dit kan veroorzaakt zijn doordat de oorspronkelijke boring niet succesvol is geweest of om een ander deel van het reservoir tevens aan te boren. In de formele benaming wordt de oorspronkelijke put aangeduid met bijvoorbeeld P18-2A6 en de aftakking met P18-2A6-S1.

Indien zowel de oorspronkelijke put als de aftakking benut worden, worden de beide benamingen aangehouden om het onderscheid te kunnen maken. In meerdere gevallen blijkt uiteindelijk slechts één van de aftakkingen gebruikt te worden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij P18-2A3. Hier zijn twee sidetracks waarvan P18-2A3-S2 (ook aangeduid als P18-02A3ST2) het reservoir doorboort. Voor P18-2A5 geldt dat sidetrack P18-2A5-ST1 het reservoir doorboort. En P18-6A7 heeft een sidetrack P18-6A7-S1 die het reservoir doorboort. In het MER wordt in de tekst en tabellen de vereenvoudigde aanduiding gebruikt van P18-2A3, P18-2A5 en P18-6A7.

In onderstaande tabel is expliciet weergegeven welke namen in dit MER zijn gebruikt en waar deze namen naar verwijzen.

Tabel 4.2. Overzicht terminologie codering putten, reservoirs etc.

	Naam in dit MER	Toelichting
Blok	P18	Verwijst naar het P18 blok op de Noordzee
Platform	P18-A	Verwijst naar het satelliet platform P18-A op de Noordzee
Reservoirs	P18-2	Verwijst naar reservoir P18-2
	P18-2-I	Verwijst naar compartiment 1 van reservoir P18-2

⁷ Er worden verschillende coderingen toegepast in de onderliggende rapporten en bij de centrale database NLOG. Zo wordt het platform P18-A ook wel aangeduid als P18/A. In het MER is de terminologie zoals gehanteerd door TNO aangehouden.

	P18-2-II	Verwijst naar compartiment 2 van reservoir P18-2
	P18-2-III	Verwijst naar compartiment 3 van reservoir P18-2
	P18-2-IV	Verwijst naar compartiment 4 van reservoir P18-2
	P18-4	Verwijst naar reservoir P18-4
	P18-6	Verwijst naar reservoir P18-6
Winningvergunningen	P18a	Eerste winningvergunning die is verleend. Alle reservoirs in P18 vallen binnen deze winningvergunning, behalve een klein deel van P18-02-I. Het P18-6 veld bevindt zich in zowel P18a als in P15c
	P18c	Aanvullende winningvergunning, waarin een klein deel van P18-02-I is gelegen
	P15c	Aanvullende winningvergunning
Putten	P18-02	Exploratieput P18-2
	P18-2A1	Productieput P18-2A1 in reservoir P18-2-I
	P18-2A3	Productieput P18-2A3 in reservoir P18-2-I
	P18-2A5	Productieput P18-2A5 in reservoir P18-2-I
	P18-2A6	Productieput P18-2A6 in reservoir P18-2-II
	P18-2A6-S1	Producterende zijtak van P18-2A6 in reservoir P18-2-II
	P18-4A2	Productieput P18-4A2 in reservoir P18-4
	P18-6A7	Productieput P18-6A7 in reservoir P18-6

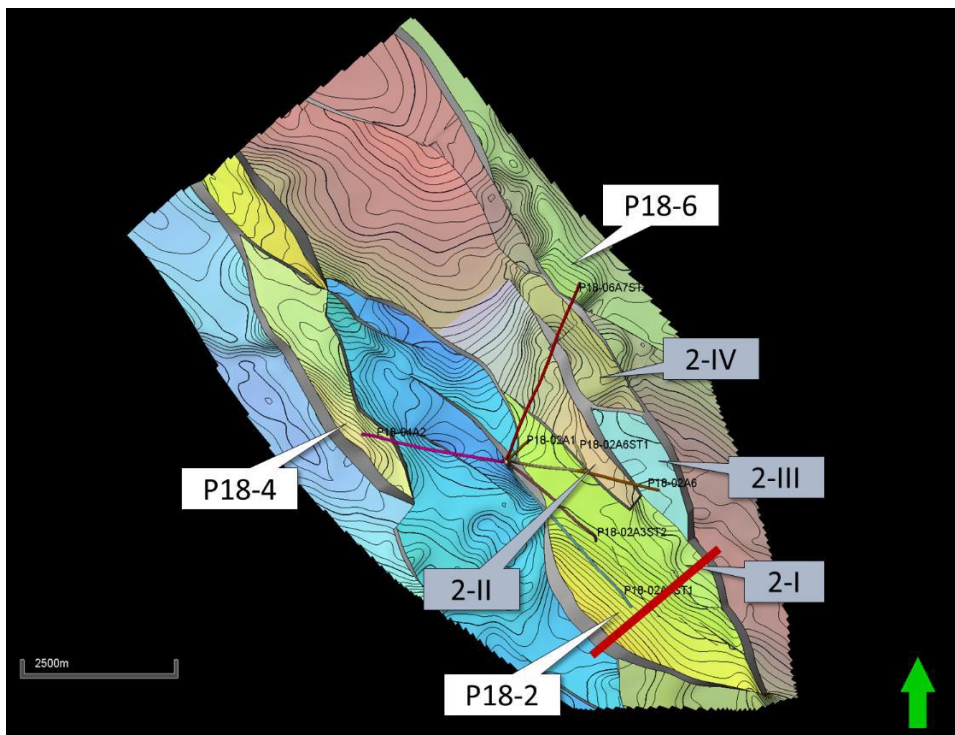
4.3 Drie reservoirs in P18

In totaal zijn in P18 drie verschillende gasreservoirs gevonden. Deze gasreservoirs zijn vernoemd naar de putten waarmee ze zijn ontdekt: P18-2, P18-4 en P18-6. De ligging van de reservoirs is weergegeven in figuur 4.2. Vanuit alle drie de reservoirs is aardgas gewonnen. De putten zijn geboord vanaf het platform P18-A. Hiervandaan wordt het geproduceerde gas vervoerd met behulp van een transportleiding naar het centraal gelegen platform P15-D.

In de P18-velden wordt het reservoir gevormd door zandsteenlagen die behoren tot de Main Buntsandstein Subgroup. De reservoir zandstenen zijn afgezet in een semi-aride continentaal bekken door rivieren en wind. Het totale reservoirpakket is circa 200 meter dik.



Figuur 4.2. Kaart van P18 en directe omgeving. Gasreservoirs zijn groen en oliereservoirs zijn rood, pijpleidingen zijn rood (bron: NLOG)



Figuur 4.3. Overzicht van de P18-velden en de compartimenten van het P18-2 veld. De vier compartimenten in het P18-2 reservoir zijn specifiek aangegeven (Bron: TNO, 2019)

Figuur 4.3 laat een bovenaanzicht van de P18 reservoirs zien. De breukzones ter hoogte van de reservoirs zijn met grijs zichtbaar gemaakt in de figuur.

De reservoirs bevinden zich op ongeveer 3,5 km beneden de zeebodem en hadden een initiële druk (voor het moment dat de gasproductie begon) variërend per reservoir tussen de 348 en 377 bar. De zeebodem in het gebied van P18 bevindt zich op circa 25 meter diepte.

4.3.1 Reservoir P18-2

Reservoir P18-2 is opgebouwd uit vier compartimenten

Het P18-2 reservoir is het grootste reservoir in P18. Oorspronkelijk was ongeveer 13,4 bcm⁸ aardgas aanwezig in het reservoir. Reservoir P18-2 is opgebouwd uit 4 compartimenten, zie figuur 4.3 en 4.4.

- Compartimenten P18-02-I en P18-02-II worden van elkaar gescheiden door een breuk (aangeduid als breuk F14). Productiegegevens doen echter vermoeden dat beide compartimenten gedeeltelijk communiceren met elkaar via deze breuk.
- Compartiment P18-02-III is van beide andere compartimenten gescheiden door een breuk (aangeduid als F18). Productiegegevens laten zien dat er geen communicatie tussen P18-2-III en beide andere compartimenten is, waaruit geconcludeerd mag worden dat de breuk F18 afsluitend is.
- Naast compartiment P18-02-III bevindt zich een niet geproduceerd compartiment, aangeduid als compartiment P18-02-IV, grenzend aan zowel reservoir P18-6 als compartiment III, zonder interactie met beide eenheden.

⁸ miljard kubieke meter bij normaal condities

In het P18-2 veld bestaat het reservoir uit zandsteen lagen behorende tot het Trias tijdperk. Het totale reservoirpakket heeft een dikte tussen de 190 en 215 meter. Binnen dit reservoir pakket worden drie formaties onderscheiden, waarbij de Detfurth Formatie informeel kan worden opgedeeld in de Upper en Lower Detfurth (zie tabel 4.3).

Tabel 4.3. Reservoir formaties in het P18-2 reservoir (PanTerra, 2011, tabel 5)

Reservoirzone	Dikte (m)	Opmerkingen
1. Hardegse	26	Meest productieve zone
2. Upper Detfurth	49	
3. Lower Detfurth	21	
4. Volprieausen	111	Minst productieve zone

Vrij water niveau (FWL)

Het vrije water niveau ("FWL" = free water level) kan niet worden bepaald in het P18-2 reservoir. Een betrouwbare watergradiënt is gemeten in put P15-12 (20 km NW van het P18 reservoir). Intersectie van deze watergradiënt met de gasgradiënt van P18-2 levert een FWL op van -3.680 m.

Het hoogste gas aangetroffen in het P18-2 reservoir is gekarteerd op een diepte van ongeveer 3.180 m. Gecombineerd met een FWL op diepte van 3.680 meter, suggereert dit een gas kolom van 500 m hoog.

Aanwezige putten

Tabel 4.4 geeft een overzicht van de putten in P18-2 en uit welk compartiment de putten produceren. De putten in de Compartimenten I and II zijn geperforeerd over het gehele interval van de Hardegse, Upper Detfurth, Lower Detfurth en de top 10-20 m van de Volprieausen Formaties. De zijtak P18-2A6-S1 die in compartiment II is geboord heeft zijn einddiepte in the Lower Detfurth, en is alleen geperforeerd in de Hardegse en Upper Detfurth Formaties.

Tabel 4.4. Productieputten in het P18-2 reservoir

Reservoir; compartiment	Aanwezige putten	Jaar geboord	Status	Opmerkingen
P18-02; compartiment I	P18-02	1989	"Suspended"	Ontdekking P18-2 reservoir
	P18-2A1	1990	productie	oude naam put P18-03
	P18-2A3	1993	productie	Formeel aangeduid als P18-2A3ST2
	P18-2A5	1996-1997	productie	Formeel aangeduid als P18-2A5ST1
P18-02; compartiment II	P18-2A6-S1	2003	productie	Zijtak van P18-2A6
P18-02; compartiment III	P18-2A6	1997	productie	

Gasproductie

Vanaf 1993 wordt aardgas uit het P18-2 reservoir geproduceerd. Compartiment I is verreweg het grootst en daarmee ook het meest productief. In de huidige situatie is het de verwachting dat het P18-2 reservoir nog tot 2027 aardgas zal produceren (productie zal bij de realisatie van Porthos eerder worden stopgezet, ruim voor het begin van CO₂-injectie). De oorspronkelijke gasvolumes per compartiment zijn weergegeven in tabel 4.5.

Tabel 4.5. Overzicht van de oorspronkelijke hoeveelheid aardgas in het P18-2 reservoir.

Reservoir	GIIP ⁹ (bcm)
P18-2 reservoir compartiment I	12,25
P18-2 reservoir compartiment II	0,4
P18-2 reservoir compartiment III	0,7
P18-2 reservoir compartiment IV	Onbekend / niet van toepassing
Totaal P18-02	13,35

4.3.2 Reservoir P18-4

Het reservoir van het P18-4 is geheel omgeven door breuken en staat niet in contact met de andere reservoirs. Aan de noordkant grenst het reservoir aan het P15-9 reservoir. De breuk tussen deze twee reservoirs wordt als niet doorlatend beschouwd, hoewel op veel grotere (geologische) tijdschaal dit niet geheel uit te sluiten is.

Ook in dit reservoir bestaat het reservoirgesteente uit zandstenen van het Trias tijdperk, waardoor het vergelijkbaar is met het P18-2 reservoir. Het betreft zandsteenlagen die worden gescheiden door slechtdoorlatende (schalie)lagen. PanTerra (2011) geeft aan dat de porositeit van de Trias gasvoerende lagen tussen de 5 en 13% ligt. De gemiddelde permeabiliteit voor de beste reservoirseenheid, de Hardeggen, is 207 mD. Het totale reservoirpakket is ongeveer 190-215 m dik. Binnen dit P18-4 reservoir pakket worden vier reservoirzones onderscheiden, zie tabel 4.6.

Tabel 4.6 Reservoir formaties in het P18-4 reservoir (PanTerra, 2011, tabel 6)

Reservoirzone	Gemiddelde dikte (m)	Opmerkingen
1. Hardeggen	24	Meest productieve zone
2. Upper Detfurth	47	
3. Lower Detfurth	19	
4. Volpriehausen	101	Minst productieve zone

Aanwezige putten

In het reservoir P18-4 is één put geboord, zie tabel 4.7. De enige put in het veld (P18-4A2) is geperforeerd over het interval Hardeggen, Upper Detfurth, Lower Detfurth en de top 10m van de Volpriehausen Formaties. Deze put heeft geen water in het Trias reservoir aangetroffen. Het vrije waterniveau (FWL) is aangenomen op -3.377 m. Het vrije water niveau voor de P18-1 put (in het aangrenzende P15-9 veld) is bepaald op een diepte van -3.397 m.

Tabel 4.7 Productieput in het P18-4 reservoir

Reservoir	Aanwezige putten	Jaar geboord	Status	Opmerkingen
P18-4	P18-4A2	1991	productie	oude naam put P18-4

Gasproductie

Het P18-4 reservoir kwam in productie in 1993. De initiële druk van het veld is 348 bar (TAQA, 2009).

⁹ GIIP betekent "gas initially in place" en bcm betekent miljard kubieke meter. Dat is dus gas in het reservoir aanwezig voor de start van de productie, omgerekend naar een temperatuur van 0°C en een druk van 1 atmosfeer.

Het reservoir bevatte oorspronkelijk circa 3,2 bcm aardgas. De verwachting is dat het P18-4 reservoir tot 2027 zal produceren.

Tabel 4.8. Overzicht van de oorspronkelijke hoeveelheid aardgas in het P18-4 reservoir.

Reservoir	GIIP (bcm)
P18-4	3,2

4.3.3 Reservoir P18-6

P18-6 is een langgerekt reservoir gelegen aan de noordkant van het P18-2 reservoir. Het reservoir bestaat uit zandsteen lagen behorende tot het Triastijdperk. Dit reservoir heeft de slechtste reservoir eigenschappen van de drie P18 reservoirs.

Het vrije water niveau (FWL) is aangenomen op -3.680 m.

Tabel 4.9 Reservoirzones in het P18-6 reservoir (PanTerra, 2011, tabel 7)

Reservoirzone	Gemiddeld dikte (m)	Opmerkingen
1. Hardeggen	33	Meest productieve zone
2. Upper Detfurth	49	
3. Lower Detfurth		Niet door put bereikt
4. Volprieausen		Niet door put bereikt

Aanwezige putten

De initiële put (P18-6A7) in dit reservoir heeft een diepte tot circa 1.900 meter. Dit is niet voldoende om de aanwezige deklaag te doorboren. Hiermee is dan ook geen gas gewonnen. Aanvullend is de aftakking P18-6A7S1 geboord, die wel tot in het reservoir reikt, en die gasproducerend is. Deze put reikt tot in de Lower Detfurth, en is geperforeerd in de Hardeggen, Upper Detfurth en de top 10 m van de Lower Detfurth Formaties.

Deze put heeft geen water aangetroffen in het Trias gasreservoir.

Zoals aangegeven in hoofdstuk 4.1 bij de terminologie, wordt de put in het P18-6 reservoir in de onderliggende TNO-studies verkort aangegeven als P18-6A7. In dit MER wordt tevens de verkorte aanduiding aangehouden.

Tabel 4.10. Productieput in het P18-6 reservoir

Reservoir	Aanwezige putten	Jaar geboord	Status	Opmerkingen
P18-6	P18-6A7	2003	Productie	De zijtak S1 bevindt zich in het reservoir

Gasproductie

Het P18-6 reservoir kwam in productie in 2003. De initiële druk van het veld is 377 bar (TAQA, 2009). De verwachting is dat het P18-6 reservoir tot 2027 zal produceren.

Tabel 4.11. Overzicht van de oorspronkelijke hoeveelheid aardgas in het P18-6 reservoir.

Reservoir	GIIP (bcm)
P18-6	0,7

4.4 Afsluitende bovenlaag

De direct overliggende afdekkende bovenlaag is opgebouwd uit meerdere formaties. Deze worden aangeduid als 'primary seal'. De primary seal wordt ook wel caprock of de afsluitende bovenlaag genoemd.

Primary seal – afsluitende bovenlaag

De afsluitende bovenlaag bovenop het gasvoerende reservoir wordt gevormd door een dik pakket met voornamelijk schalies¹⁰ van de Trias (zie ook 4.1). Deze formaties zijn 150 tot 175 m dik. Bovenop de Trias afdeklaag zorgt een 400 tot 500 m dik pakket van Jura kleien (onderdeel van de Altena groep) aanvullend voor afsluiting.

Overburden

Boven de afsluitende bovenlaag bevinden zich nog meer dikke kleipakketten, afgewisseld met zandsteen en kalklagen. Dit zijn afzettingen uit het Krijt en het Tertiair. Het geheel van afzettingen boven de reservoirs wordt ook wel aangeduid als de overburden.

In hoofdstuk 5.1 wordt nader ingegaan op deze bovenliggende lagen en de mate waarin hiermee migratie of lekkage van CO₂ uit de reservoirs wordt voorkomen.

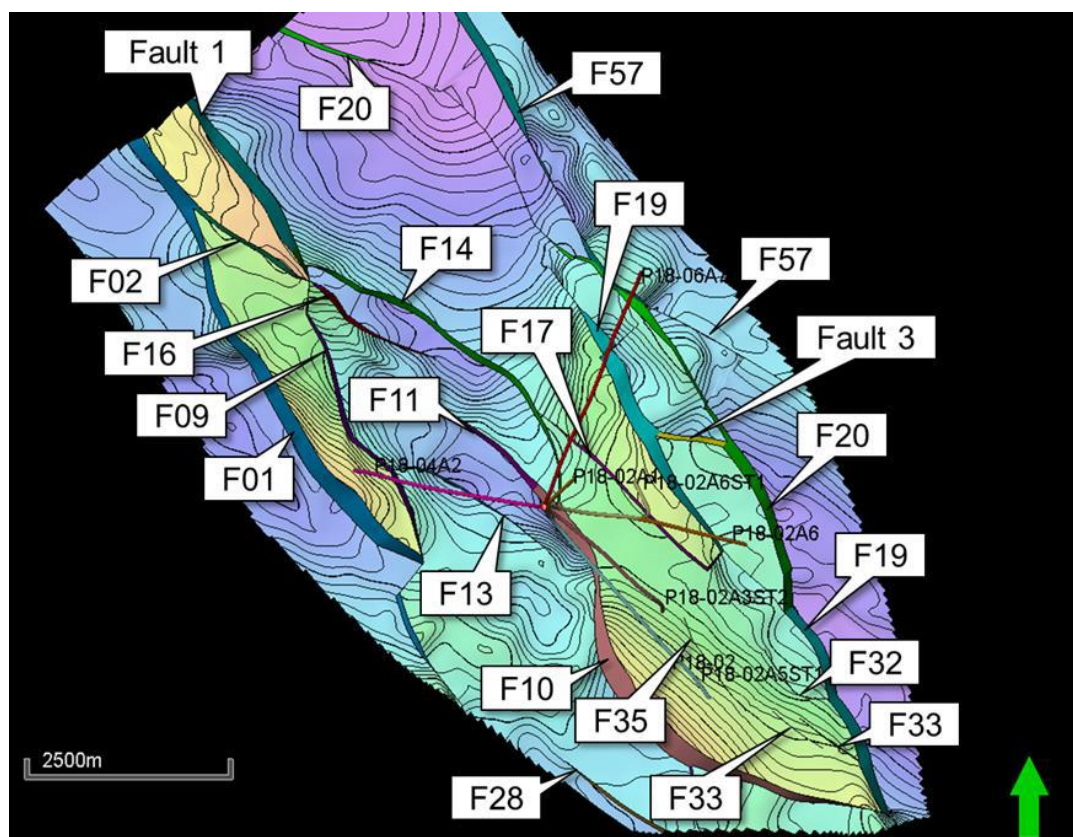
4.5 Aanwezige breukzones

De drie relevante gasreservoirs liggen in hetzelfde lagenpakket (Trias Bunter zandsteen lagen), maar worden van elkaar gescheiden door breuken. Aan de hand van lokale seismiek en boringen is een goed beeld verkregen van de ligging en de aard de aanwezige breuken.

Verder geven drukgegevens verkregen door metingen in het reservoir gedurende gasproductie inzicht in het gedrag van deze breuken, welke kunnen worden geëxtrapoleerd naar de situatie waarin CO₂ wordt geïnjecteerd. Dit is onderzocht aan de hand van model studies door TNO (2019) en CATO (CATO2 rapportage, 2011).

In het gebied van P18 zijn de breuken ontstaan in twee fasen. In de eerste fase, aan het einde van het Jura- en begin Krijt, zijn veel zogenaamde normaalbreuken ontstaan en is het gebied in verschillende blokken opgebroken. In de tweede fase tijdens, het Late Krijt en vroege Tertiair, resulteerde deformatie in nieuwe breuken en breukbewegingen. In het P18 gebied waren de bewegingen van deze tweede fase veel minder intensief. Tijdens de tweede fase vonden er ook bewegingen plaats langs de oude breuken die gedurende de eerste fase waren ontstaan (dit is in meer detail uitgewerkt in bijlage 2).

¹⁰ siltstones, claystones, evaporites and dolostones

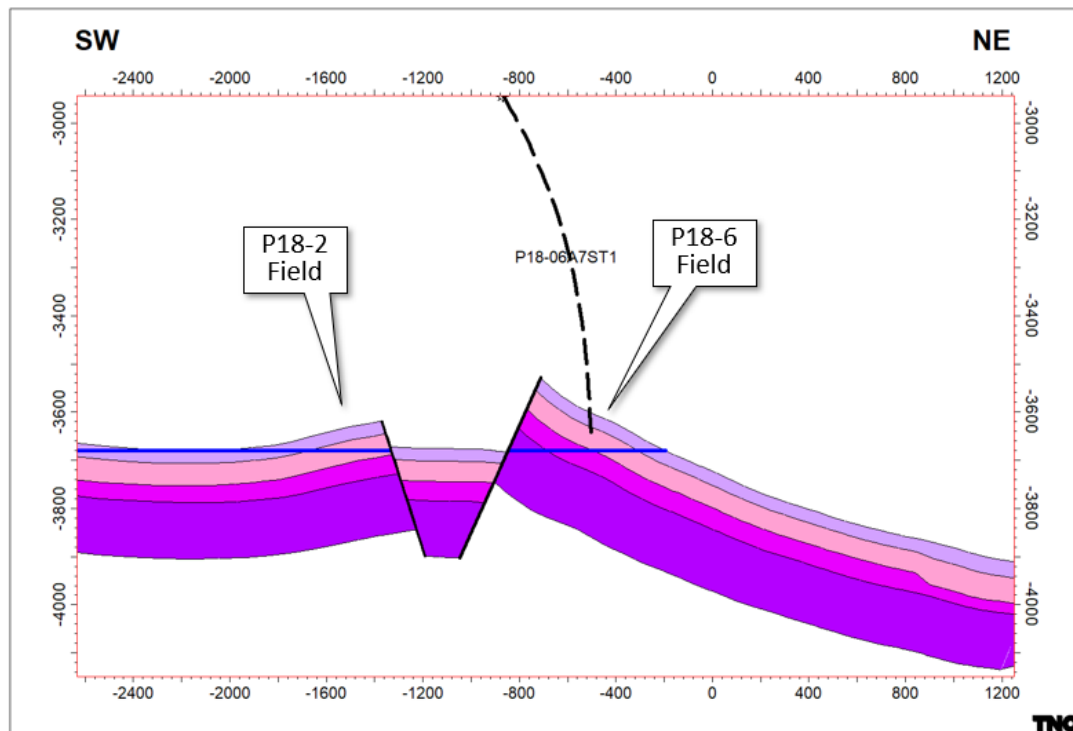


Figuur 4.4. Kaartje van de drie P18 velden met daarin schematisch aangegeven de belangrijke breuken, aangegeven met F (Fault = breuk) en een nummer. (Bron: TNO, 2019)

Drukmetingen in de P18-reservoirs tijdens de productieperiode hebben aangetoond dat sommige van de aanwezige breuken inderdaad gas doorlaten (bijvoorbeeld F17 in figuur 4.4). Tijdens de gasproductie kon verder worden aangetoond dat de breuken tussen Compartiment I en Compartiment III (F19 en F3, figuur 4.6) geen of slechts kleine hoeveelheden gas doorlaten.

Brekzone tussen P18-2 en P18-6

De breukzone tussen P18-2 en P18-6 is een zogenaamde 'vallei-breuk' gevuld door een blok van reservoirgesteente omsloten door twee breuken (F500 en F57, respectievelijk links en rechts in figuur 4.5) gevuld met verpoederd materiaal van de afsluitende bovenliggende schalielaag.

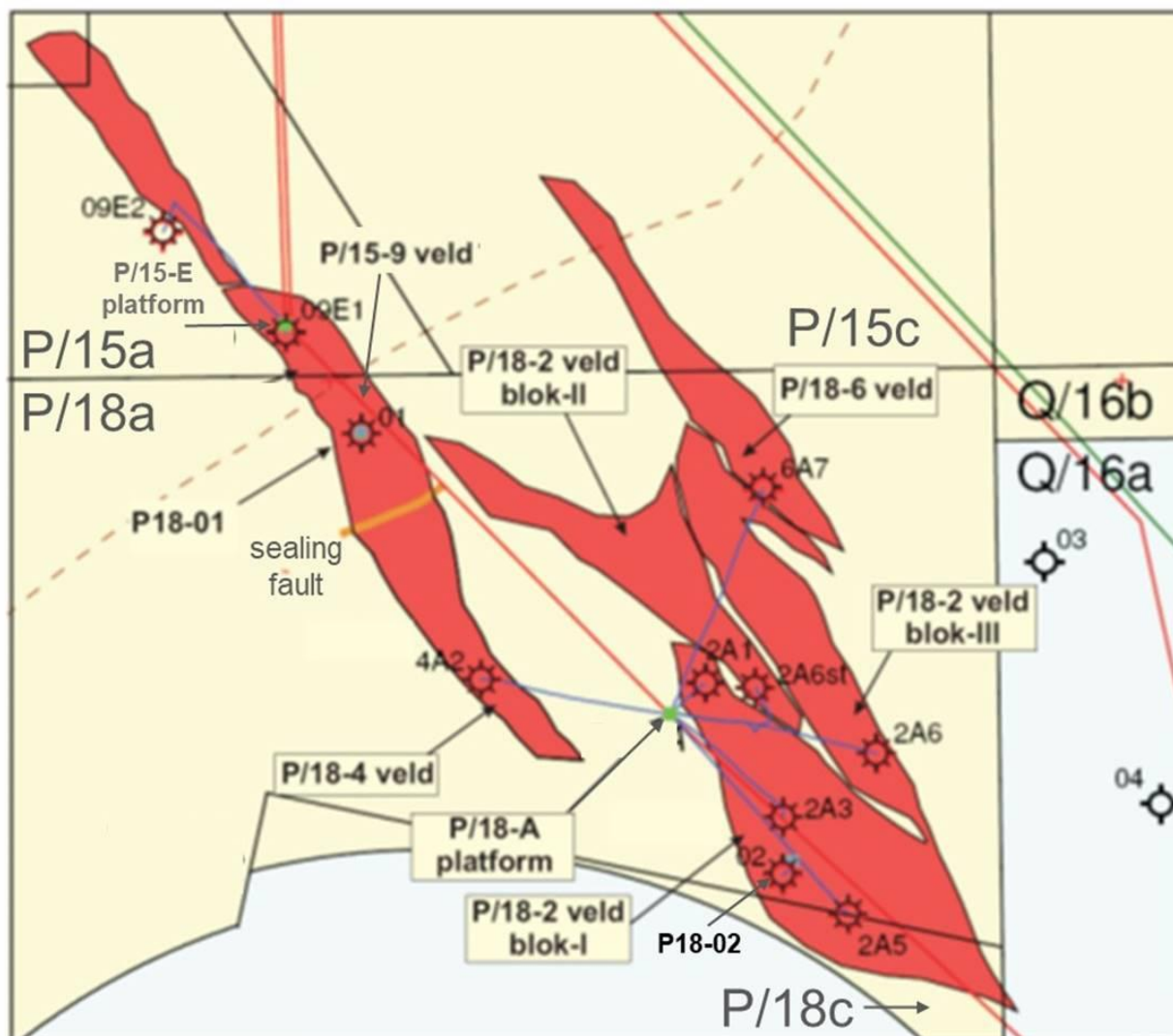


Figuur 4.5. Dwarsprofiel van het P18-2 reservoir en het aangrenzende P18-6 reservoir (Bron: TNO, 2019)

Het enige contact dat de velden met elkaar hebben is door de Volpriehausen juxtaposition, aan de rechterkant van de vallei-breuk, dat een lage permeabiliteit heeft (<1 mD). Door de aanwezigheid van een reservoir juxtapositie tussen P18-2 en P18-6 is connectiviteit mogelijk als (één van) beide breukzones van de vallei-breuk zelf niet gasdicht (is) zijn. CO₂-migratie tussen reservoir P18-2 en P18-6 kan dus alleen maar plaatsvinden via een reservoir juxtapositie wanneer deze in combinatie met een niet gasdichte breukzone voorkomt. Het drukverloop van het P18-6 reservoir verschilt significant van het drukverloop van de P18-2 compartimenten. Dit ondersteunt de argumentatie dat er geen connectiviteit tussen P18-2 en P18-6 is op een productietijdschaal.

Begrenzing reservoir P18-4 en P15-9

Het reservoir P18-4 wordt aan de noordzijde begrensd door een breuk (F02, zie figuur 4.4). Ten noorden van de breuk bevindt zich een ander gasveld, dat zich gedeeltelijk in blok P18 (noordelijk deel van het blok) en voor een groter deel in het blok P15 bevindt. Dit reservoir wordt aangeduid als P15-9 en hierin zal geen CO₂-injectie plaatsvinden in het kader van het Porthos-project. In figuur 4.6 is de locatie van de breuk met een groene pijl aangegeven.



Figuur 4.6. Detailweergave van de P18-reservoirs (bron: TAQA)

Ook voor dit contact is het van belang na te gaan of door het breukvlak gasmigratie kan plaatsvinden. Indien in reservoir P18-4 CO₂ wordt geïnjecteerd en tegelijkertijd reservoir P15-9 wordt leeg geproduceerd, ontstaat er een drukverschil over de breukzone tot circa 300 bar. Er is aangenomen dat over het grootste gedeelte van F02 niet aan beide zijde reservoirgesteente aanwezig is, waardoor er dus geen gas kan migreren door deze breuk. Het is dus mogelijk dat er aan een kant van de breuk Hardegse aanwezig is en aan de andere kant Volprieheuse. Van belang hier is echter dat de Volprieheuse op zijn best een heel slecht doorlatend reservoirgesteente is en het daarom dus niet waarschijnlijk is dat er gas kan migreren van de Hardegse naar de Volprieheuse via de breuk. Ook uit de productiegeschiedenis en de aangetroffen gascompositie van de twee velden zijn er geen aanwijzingen dat de F02 breukzone gas doorlaat.

Re-activatie van breuken tijdens gaswinning

Re-activatie van bestaande breuken als gevolg van gaswinning is een veel voorkomend fenomeen. Dit kan plaatsvinden als gas wordt geproduceerd en de druk in de reservoirs wordt verlaagd. Als gevolg hiervan treden er kleine breukbewegingen op die kunnen resulteren in aardbevingen (aardschokken). Het KNMI heeft een dicht meetnetwerk in Nederland waar deze kleine aardbevingen worden geregistreerd.

Tot nu toe is er geen seismische activiteit gemeten door het meetnetwerk van KNMI dat kan worden toegeschreven aan gasproductie uit de P18-reservoirs.

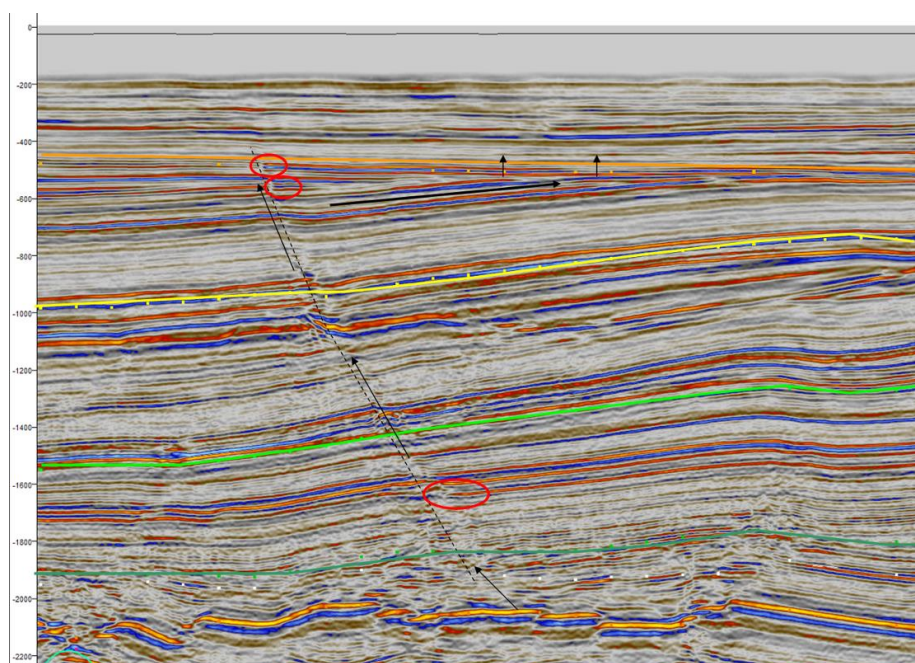
4.6 Ondiepe gasaccumulaties

De diepe ondergrond is in beeld gebracht aan de hand van seismische profielen. Deze kunnen aanwijzingen geven dat er gas aanwezig is in lagen. Dergelijke aanwijzingen worden ook wel anomalieën genoemd. Op veel plaatsen in Nederland, zowel op land als onder de zeebodem, worden ook anomalieën in ondiepe lagen aangetroffen. Dit kan wijzen op gas, indien aanwezig, dat gevormd kan zijn door bacteriën (moerasgas is hiervan een voorbeeld), maar kan ook afkomstig zijn uit de dieper gelegen lagen en naar boven zijn gemigreerd. Zeer kleine hoeveelheden gas opgelost in grondwater kunnen aanzienlijk anomalieën opleveren.

De seismiek over P18 laat anomalieën zien die mogelijk door aanwezigheid van gas kunnen zijn veroorzaakt. Dit verschijnsel is niet alleen in P18 te zien, maar ook op andere plaatsen in het Noordzee gebied. Deze anomalieën langs breuken boven P18 kunnen aanwijzingen zijn dat er gas uit diepere lagen naar boven migreert of naar boven is gemigreerd in het verleden (figuur 4.7).

Een logische onderzoeksvraag is hier om te bepalen welke oorsprong dit gas zou kunnen hebben. Namelijk wanneer het gas afkomstig zou zijn van de dieper gelegen P18 Trias reservoirs, zou dit kunnen betekenen dat er een risico op migratie van CO₂ uit de P18-reservoirs bestaat.

Onderzoek naar de oorsprong van olie en gas in West Nederland laat zien dat ook de Posidonia Formatie (Jura) gas heeft gegenereerd. De Posidonia Formatie is een bekend olie- en gasproducerend moedergesteente aanwezig onder West Nederland. De Posidonia Formatie ligt in de Altena Groep, circa 1.000 m ondieper dan de Trias-reservoirs. Figuur 4.7, afkomstig uit het CATO-rapport, laat deze anomalieën zien en met pijltjes zijn mogelijke migratiepaden aangegeven.



Figuur 4.7. Mogelijke migratieroute (met zwarte pijlen aangegeven) van aardgas uit de Posidonia Formatie (te zien als de duidelijke blauw-oranje lijn aan de basis van de onderste pijl) langs een breukzone (gestreepte lijn) boven de Altena Groep. Rode cirkels geven de mogelijke gasaccumulaties weer. (Bron: CATO2 feasibility study P18 - bijlage 1).

De seismiek over P18 is onduidelijk over de diepere lagen en vormt geen sluitend bewijs dat gas uit de Posidonia Formatie wel of niet de oorzaak is van deze anomalieën. De seismische anomalieën vormen echter geen signaal dat de integriteit van de Trias-reservoirs in P18 niet voldoende is. Meer waarschijnlijk is dat gas (als het aanwezig zou zijn) via watervoerende lagen (aquifers) in het Krijt en het Tertiair naar hogere niveaus zal migreren.

4.7 Winningsgeschiedenis

1977-1983: exploratie

De exploratie activiteiten zijn begonnen door Amoco Nederland BV die in 1977 een opsporingsvergunning verkrijgt voor deelblok P18a en deze in 1983 vernieuwd. De opsporingsvergunning voor deelblok P18c is verleend in december 1989.

1987-1989: exploratieboringen

De exploratie put P18-01 is geboord in de winter van 1987-1988. Hiermee is olie ontdekt in het Onder Krijt en gas in de Trias, maar alleen het gas voorkomen is getest. De exploratie put P18-2 is geboord in 1989 en ontdekt gas in de Trias.

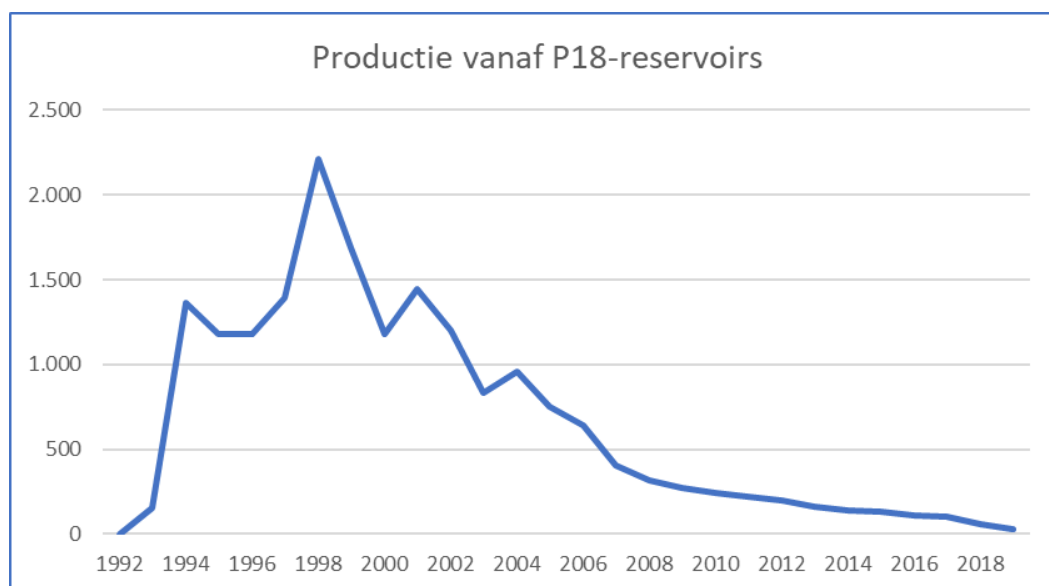
1990-1993: productieboringen

Naar aanleiding van de gasvondsten heeft Amoco een winningsvergunning aangevraagd. De winningsvergunning voor P18a is verleend in april 1992, en die voor P18c in juni 1992. P18c is verleend omdat P18a net niet groot genoeg bleek te zijn, aangezien een van de ontdekte reservoirs door loopt tot buiten de P18a winningvergunning; winningvergunning P18c corrigeert dit.

Al voor de winningvergunning is verleend, is Amoco begonnen met het boren van evaluatieputten. P18-2A1 is geboord in de zomer van 1990 en resulteert in een gasvondst. P18-4A2 is geboord in het voorjaar van 1991 en resulteert eveneens in een gasvondst. P18-2A3 is geboord gedurende het voorjaar en de zomer van 1993. Al deze putten zijn geboord vanuit de locatie van het (latere) P18-A platform.

1993: plaatsing (satelliet) P18-A platform en constructie pijpleiding

In 1993 wordt het platform P18-A geplaatst. Daarbij is eveneens een pijpleiding van P18-A naar platform P15-D aangelegd. De gasproductie is begonnen in 1993.



Figuur 4.8. Jaarproductie van de P18-reservoirs uitgedrukt in miljoen Nm³.

1993-heden: gasproductie en boren

De jaarlijkse gasproductie van P18 is te zien in de grafiek van figuur 4.8. Deze grafiek is gebaseerd op openbare gegevens van TNO (NLOG). De totale productie tot en met april 2019 bedraagt 18,7 miljard standaard m³.

De productieputten P18-2A5, P18-2A6 zijn geboord in de winter van 1996-1997. Hun aandeel in de totale gasproductie is duidelijk te zien in de grafiek van figuur 4.8. Een nieuwe zijtak ("sidetrack") is vanuit P18-2A6 geboord in de zomer van 2003 (P18-2A6-S1) en ook P18-6A7 is geboord in dezelfde periode. Ook de nieuwe zijtak en nieuwe put leveren een vergroting van de productie op.

Amoco, inclusief de Nederlandse werkmaatschappij zijn in 1998 gekocht door British Petroleum (BP). BP exploiteerde de gaswinning van de P18-reservoirs tot 2007. Dan verkoopt BP de exploratie- en productietak van de Nederlandse werkmaatschappij aan TAQA. Vanaf 2007 is TAQA de exploitant van de P18-reservoirs.

4.8 Autonome ontwikkelingen

Voor de toetsing in het MER is het van belang om naast de huidige situatie, zoals bovenstaand beschreven, aan te geven of er de komende jaren ontwikkelingen gaan plaatsvinden, die tijdens de aanlegfase of in de operationele periode van belang zijn.

Ten aanzien van de diepe ondergrond en de benutting van de diepe ondergrond, is de belangrijkste verandering dat de gaswinning zal zijn gestopt. Dit betekent voor de drie reservoirs dat de bestaande putten beschikbaar zijn. Voor de putten geldt dat er al een workover plaats vindt, waarbij de operationele putten aangepast zijn voor CO₂-injectie en de geabandonneerde putten voldoen aan de nieuwe omstandigheden, waarbij er verhoogde CO₂-druk in de reservoirs ontstaat.

5 CO₂-opslag in P18 reservoirs

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe CO₂-injectie en opslag mogelijk is in de P18 reservoirs. Hierbij wordt de geschiktheid van de reservoirs voor CO₂-opslag beschreven. Met behulp van meerdere modellen is nagegaan hoe de CO₂-opslag kan plaatsvinden. De gebruikte modellen worden beschreven en nader toegelicht in de als bijlage toegevoegde rapporten. De gevolgen van CO₂-opslag worden als veranderingen en risico's beschreven.

Binnen Porthos is het de bedoeling dat over een periode van 15 jaar, ieder jaar gemiddeld 2,5 Mton wordt geïnjecteerd. Gedurende de gehele periode komt dat neer op in totaal 37,5 Mton. Daarbij wordt gebruik gemaakt van drie of vier putten in P18-2, één put in P18-4 en een startup put in P18-6. Gemiddeld wordt dan per put 0,5 dan wel 0,625 Mton per jaar geïnjecteerd. Putten zullen soms buiten bedrijf zijn, zodat andere putten dan wat extra moeten kunnen injecteren.

Debiet van het te injecteren gas

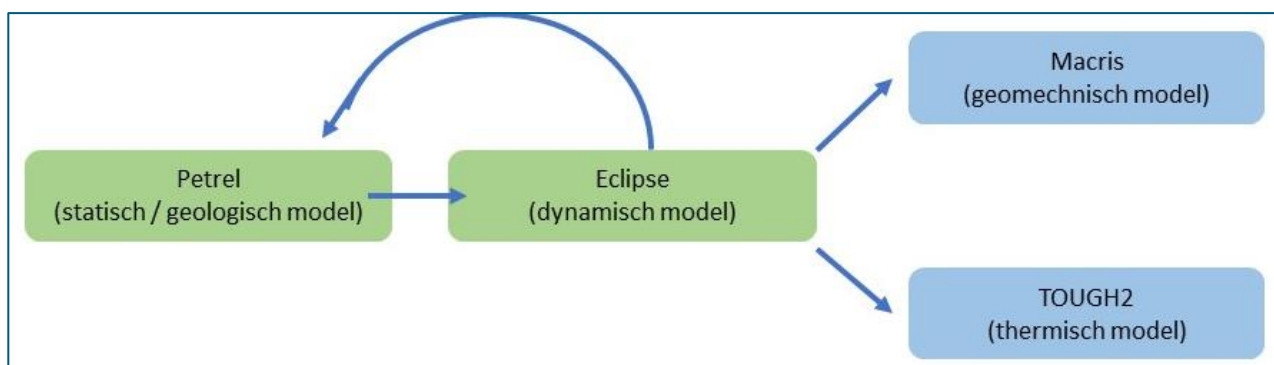
Het CO₂ wordt middels een transportleiding aangevoerd vanaf de kust, waar zich een compressorstation bevindt om de juiste druk te reguleren. Bij het ontwerp van het compressorstation is rekening gehouden met verschillende maximaal benodigde debieten. In de voorgenomen activiteit is uitgegaan van het maximum van 360 ton/uur. Dit komt overeen met 100 kg/s en 3 Mton CO₂ per jaar. Het systeem is flexibel opgezet, zodat het debiet kan fluctueren tussen 0 en 360 ton CO₂ per uur. Het gehele ontwerp is zodanig aangelegd dat het debiet kan worden uitgebreid tot 1.250 ton CO₂ per uur.

Voor de putten wordt er van uitgegaan dat de putten gezamenlijk gemiddeld 100 kg/s zullen injecteren. Per put wordt uitgegaan van een maximum van 70 kg/s. Uit de berekeningen van TNO blijkt dat dit mogelijk een te grote doorstroming voor de putten geeft, maar dat de injectiviteit van de reservoirs hiervoor groot genoeg is. Het is de bedoeling dat zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van een free-flowing situatie, waarbij de druk vanuit de transportleiding verdeeld wordt over de putten zonder per put een beperking aan te brengen.

5.1 Methodiek modellering

5.1.1 Toegepaste simulatiemodellen voor CO₂-injectie

De P18-reservoirs zijn goed bekend dankzij de informatie uit verschillende boringen, seismische profielen en de geschiedenis van aardgasproductie. Hiermee is zicht op de verspreiding van verschillende formaties en de bijbehorende karakteristieken, zoals de doorlatendheid en porositeit. Deze informatie is gebruikt om te bepalen hoe CO₂-injectie zal plaatsvinden.



Figuur 5.1. Overzicht van de verschillende modellen waarmee de CO₂-injectie in beeld is gebracht door TNO

Opbouw statisch model - Petrel

De ondergrondse structuren zijn weergegeven in een geologisch model. Hierin zijn de verschillende formaties als driedimensionale ondergrondse structuren opgenomen. De formaties hebben kenmerkende eigenschappen, die ruimtelijk kunnen variëren. Daarnaast zijn er in het model breukzones opgenomen. Hiermee is het statisch Petrel model opgebouwd.

Dynamisch model – Eclipse300

Het statisch model van de diepe ondergrond is gebruikt als input voor het dynamisch model Eclipse 300. Met behulp van het dynamisch model en productie- en test-data worden ontwikkelingen zoals de drukverdeling, en veranderingen hierin als gevolg van injectie, in de reservoirs en bovenliggende lagen doorgerekend. Na de productie van aardgas is er een onderdruk in de reservoirs ontstaan. Met de injectie van CO₂ zal er een nieuwe drukverdeling ontstaan in het reservoir. Daarbij wordt de verspreiding van deze druk richting de breukzones en bij de put aansluiting op de caprock specifiek in beeld gebracht.

Verificatie van de modellen

De kwaliteit van de modellen is getoetst aan de meetreeksen uit de periode van aardgasproductie. De gemeten drukwaarden in de reservoirs in de loop van de jaren is vergeleken met de berekende druk, om zodoende vast te stellen of de modellering een betrouwbare weergave vormt van de werkelijkheid.

Aanvullende modellen

De beide gebruikte modelleerpakketten, Petrel en Eclipse, zijn standaard pakketten, die veel in de olie- en gaswereld worden toegepast. Specifiek voor de modellering van CO₂-opslag heeft TNO aanvullende modellen ontwikkeld en toegepast. Met deze modellen kan het geomechanisch karakter van CO₂-opslag worden weergegeven (Macris) en kan de verandering van temperatuur worden gesimuleerd (TOUGH2 ECO2MG, een thermisch model).

Modellering CO₂ in injectieput

Naast het gedrag van CO₂ in het reservoir is het tevens van belang zicht te hebben op de temperatuur, druk en mogelijke faseovergangen van het CO₂ in de injectieput. Hiervoor is gebruik gemaakt van modellering met behulp van OLGA.

Monitoring in de put en in het reservoir

Tijdens de CO₂-injectie vindt monitoring plaats in de injectieput, waarbij druk en temperatuur worden gemeten. Indien de meetwaarden afwijken van datgene wat wordt verwacht op basis van de modellering, kan dit leiden tot aanpassingen in de injectieprocedure. De verspreiding van CO₂ in het reservoir is lastig met monitoring in beeld te brengen. Dit onderschrijft het belang van betrouwbare modellen.

Bevindingen in onderliggende rapportages

De resultaten van deze modelleringen zijn door TNO beschreven in drie nieuwe rapporten:

- CO₂-gedrag in de injectieputten in het flow-assurance rapport (bijlage 1);
- CO₂-opslag in het P18-2 reservoir in het P18-2 rapport (bijlage 2);
- CO₂-opslag in het P18-6 reservoir in het P18-6 rapport (bijlage 3).

Voor P18-4 is de opslag al uitgewerkt bij de aanvraag opslagvergunning P18-4, in de CATO2 rapportage. De informatie uit bovengenoemde rapporten is in dit MER meegenomen voor de huidige aanvraag opslagvergunning.

5.1.2 Bevindingen modellering

TNO-modellering in het verlengde van de CATO2 modellering in 2010

De TNO-modellering geeft inzicht in de mogelijkheden voor CO₂-opslag in de P18 reservoirs, waarbij de nadruk ligt op het in beeld brengen van mogelijke risico's. Er is nadrukkelijk gekeken naar risico's dat CO₂ weglekt of migreert uit het reservoir (breach of confinement). Zo kan met behulp van deze modellering een uitspraak worden gedaan onder welke omstandigheden de CO₂-opslag veilig en permanent kan plaatsvinden.

Operationele uitwerking in detailmodel

Bij de nadere uitwerking zal er een integraal model worden ontworpen door TAQA en EBN, waarbij per put de injectiviteit kan worden ingebracht en waarbij temperatureffecten in de dynamische modellering kan worden meegenomen. Hiermee kan in meer detail de injectie en verspreiding van CO₂ in het reservoir worden berekend.

Bevindingen temperatureffecten

De TNO-modellering geeft in deze fase voldoende inzichten in de voorgenomen CO₂-opslag om vast te stellen hoeveel CO₂ kan worden opgeslagen en in hoeverre risico's worden voorzien met betrekking tot migratie of lekkage langs en reactivatie van breukzones. Hieruit blijkt dat in de periode dat de druk in het reservoir minder dan 50 bar bedraagt, de kans bestaat dat een zeer lage temperatuur in de put en het reservoir leidt tot gashydraatvorming. Om dit te voorkomen zijn speciale eisen gesteld aan de injectiestrategie.

De TNO modellering van de temperatuur in de put, geeft aan dat er ter plaatse van de injectieput rekening gehouden moeten worden met temperatuurverschillen tussen het CO₂ in de injectieput en het omringende gesteente. Dit kan leiden tot het ontstaan van de zogenaamde micro annuli. Dit is verder beschreven in hoofdstuk 6.2 : Risicoanalyse lekkage CO₂ uit de P18 reservoirs: Lekkage langs putwand.

Bevindingen CO₂-opslag in P18-2 reservoir

Voor het P18-2 reservoir geldt dat er vier compartimenten zijn. Injectie vindt middels drie putten plaats in compartiment I, die in verbinding staat met compartiment II. De modellering laat de verspreiding zien van CO₂ in compartiment I en vervolgens in compartiment II. Daarnaast vindt optioneel injectie plaats in compartiment III, dat niet in verbinding staat met andere compartimenten. Voor compartiment IV geldt dat zich hierin geen put bevindt. Dit is verder een geïsoleerd blok waaruit het verleden geen aardgas is geproduceerd. Er wordt nu ook geen opslag van CO₂ in dit compartiment verwacht. De breukzone tussen het P18-2 en P18-6 reservoir wordt als afsluitend gezien.

P18-2 wordt aan de noord kant en aan de zuidwest kant begrenst door een vrij waterniveau (FWL). Bij simulatie met hoge druk toont eventuele migratie van zeer kleine hoeveelheden CO₂ langs dit vrij waterniveau. Het opslagreservoir strekt zich uit voorbij deze zones.

Bevindingen CO₂-opslag in P18-4 reservoir

In het P18-4 reservoir bevindt zich één put, zoals nader onderzocht door CATO2 in het kader van het CCS project ROAD.

Bevindingen CO₂-opslag in P18-6 reservoir

TNO heeft aanvullende modellering uitgevoerd voor CO₂-opslag in P18-6. De einddruk na productie zal circa 50 bar bedragen. In eerste instantie is dit reservoir bedoeld voor start-up situaties, in de periode dat de druk in de reservoirs P18-2 en P18-4 lager is dan 50 bar. Op termijn kan het veld tevens gebruikt worden om verder op te vullen en het totale opslagvolume te vergroten.

In het reservoir is één put aanwezig, die zich relatief dicht bij een breukzone bevindt, op circa 100 meter afstand en een watercontact. De berekeningen van TNO geven aan dat bij CO₂-injectie gedurende een beperkte periode het relatief koude CO₂-front de breukzone niet zal bereiken (zie ook hoofdstuk 5.3.3 over thermische veranderingen).

Het reservoir heeft een relatief lage permeabiliteit zodat de aardgasproductie beperkt is gebleven. Bij de historie match is gebleken dat de reservoir eigenschappen in de buurt van de put waarschijnlijk zeer slecht zijn en dat de rest van het reservoir zeer heterogeen is (afwisselend goede eigenschappen en slechte eigenschappen). Dit is in het dynamische model gesimuleerd met twee extra breuken haaks op de grote afsluitende noordwest - zuidoost breuk.

5.2 Afbakening opslagvoorkomen en opslagcomplex

Opslagvoorkomen en opslagcomplex

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de opslaglocatie (ook wel aangeduid als opslaglocatie) en het opslagcomplex. Beide dienen afgebakend te worden, waarbij voor de afbakening uitgegaan wordt van de definitie zoals vastgelegd in de CCS Richtlijn (artikel 3, definities). Onderstaand worden de definities weergegeven.

Definities

In de Mijnbouwwet (artikel 1) staan de volgende definities:

- “opslagvoorkomen”: een voorkomen dat gebruikt wordt voor opslag
(In de CCS Richtlijn is dat omschreven als “opslaglocatie”: een omschreven volumegebied binnen een geologische formatie, dat gebruikt wordt voor de geologische opslag van CO₂ en bijbehorende bovengrondse voorzieningen en injectiefaciliteiten¹¹);
- “CO₂-opslagcomplex”: opslagvoorkomen voor CO₂ en de omringende geologische gebieden die een weerslag kunnen hebben op de algehele integriteit van de opslag en de veiligheid ervan.
(In de CCS Richtlijn is hieraan toegevoegd: dat wil zeggen omliggende opslagformaties die CO₂ kunnen gaan bevatten);

In de CCS Richtlijn is daarnaast gedefinieerd:

- “lekkage”: het weglekken van CO₂ uit het opslagcomplex;
- “migratie”: de beweging van CO₂ binnen het opslagcomplex.

In het kader van ETS wordt een enigszins aangepaste definitie van lekkage toegepast, waarbij lekkage optreedt indien CO₂ weer in de biosfeer terecht komt.

Opslagvoorkomen

De Nederlandse vertaling van de CCS Richtlijn spreekt van ‘opslaglocatie’, de Mijnbouwwet spreekt van ‘opslagvoorkomen’. In beide gevallen wordt gerefereerd aan de storage site, zoals beschreven in de oorspronkelijk Engelse tekst van de richtlijn. Conform deze Engelse definitie bestaat het opslagvoorkomen uit drie onderdelen:

- de geologische formatie waarin CO₂-opslag plaatsvindt ;
- de injectieputten tot het puttenhoofd;
- de injectiefaciliteit, in dit geval het op het P18-A platform geplaatste puttenhoofd, de regelklep en de bemetering op de put.

¹¹De Mijnbouwwet definieert opslagvoorkomen: een voorkomen dat gebruikt wordt voor opslag

Opslagcomplex

Het opslagcomplex bestaat uit de opslaglocatie en omliggende formaties die CO₂ kunnen gaan bevatten. De definitie geeft aan dat dit omringende gebieden zijn, die een weerslag kunnen hebben op de opslag en veiligheid van de opslaglocatie.

Dit kan op twee manieren worden uitgelegd:

- de omringende formaties waarin in de toekomst CO₂ kan worden opgeslagen of waar andere activiteiten kunnen plaatsvinden, waardoor de opslaglocatie bedreigd kan worden (effect van buiten naar de opslaglocatie);
- de omringende formaties die, ongewenst en niet verwacht, CO₂ zouden kunnen bevatten, mocht er ooit CO₂ uit de opslaglocatie verdwijnen (effect vanuit de opslaglocatie naar omgeving).

5.2.1 Opslagvoorkomen P18-2, P18-4 en P18-6**Injectiefaciliteiten met de bijbehorende bovengrondse voorzieningen**

In de CCS-Directive is aangegeven dat het opslagvoorkomen bestaat uit het opslagreservoir, bovengrondse voorzieningen en injectiefaciliteiten. De voorzieningen zouden kunnen bestaan uit de injectieputten en de faciliteiten op het platform vanaf het punt waarop de transportleiding bij het platform aan komt (bij de riser). Voor de aanlegfase en gebruiksfase is dit een goed toepasbare afbakening. In het Mijnbouwwet staat echter in artikel 31i dat bij beëindiging van CO₂-opslag een opslagvoorkomen wordt afgesloten en de injectiefaciliteiten met de bijbehorende bovengrondse voorzieningen worden verwijderd.

In de praktijk zullen de putten op tenminste 6 meter onder de zeebodem worden afgesloten en verwijderd. Echter de bestaande voorzieningen op het platform zijn mogelijk nog in gebruik voor andere functies, waaronder productie, CO₂-opslag in andere velden of anderszins. Dit zou er toe kunnen leiden dat het juridisch verstandig is het opslagvoorkomen te definiëren als het opslagreservoir inclusief de bijbehorende putten, tot de bovenkant van de put.

Basis van de P18-reservoireenheden

Aan de basis van de reservoireenheden zijn schalielagen aanwezig die functioneren als barrières voor CO₂-stroming. De diepste reservoireenheid (Volpriehausen) is nauwelijks doorlatend (permeabel). Deze diepe eenheid is relatief heterogeen en wordt als niet-producerend beschouwd.

P18-2 - CO₂-opslag

Het P18-2 reservoir, bestaande uit vier compartimenten, heeft de grootste opslagcapaciteit van de P18-reservoirs. In het P18-2 reservoir zijn vier operationele putten aanwezig, waarvan één tevens met een producerende zijtak. De drie putten in compartiment I zijn in de toekomst beschikbaar voor CO₂-injectie, maar moeten nog wel worden gecontroleerd en worden omgebouwd. Vanuit deze putten kan CO₂-injectie plaatsvinden in compartiment I en door de onderlinge verbinding tevens in compartiment II. De vierde put bestaat uit een 'moederput' in compartiment III en een zijtak van deze put in compartiment II. Deze kunnen niet samen omgebouwd worden tot injectieputten. De zijtak P18-2A6-S1 bevindt zich in compartiment II, dat door de verbinding met compartiment I al wordt opgevuld. Het is daarom de bedoeling de moederput P18-2A6 in te zetten als injectieput, zodat hiermee compartiment III kan worden gevuld. De mogelijkheid tot het ombouwen van deze put is nog onderwerp van nader onderzoek.

De modelberekeningen (TNO, 2019) geven de mogelijke opslagcapaciteit, afhankelijk van de einddruk bij injectie. Bij einddruk van 351 bar (hydrostatische druk) is de opslagcapaciteit 30,6 Mton CO₂

P18-4 - CO₂-opslag

In het P18-4 reservoir is 1 operationele put aanwezig. In principe is deze put geschikt voor CO₂-injectie, maar de put moet wel gecontroleerd en omgebouwd in lijn met de P18-2 putten.

Voor het P18-4 reservoir is de verwachting dat circa 8,1 Mton CO₂ kan worden opgeslagen.

P18-6 – CO₂-opslag

In het P18-6 reservoir is één operationele put aanwezig. In principe is deze put geschikt voor CO₂-injectie, maar de put moet wel omgebouwd worden.

Dit reservoir heeft duidelijk andere reservoir eigenschappen dan de beide andere P18-reservoirs. Het gesteente heeft een lagere permeabiliteit, de totale producerende dikte is kleiner en het reservoir is waarschijnlijk sterk beïnvloed door de verbreukte zone waarin het zich bevindt. Ook heeft de enige put, P18-6A7, een smaller onderste gedeelte, waardoor de injectiesnelheid in deze put geringer zou kunnen zijn. Dit is afhankelijk van de injectiedruk en de samenstelling en temperatuur van de CO₂ stroom.

Door deze onzekerheid is de verwachte opslagcapaciteit van het P18-6 reservoir moeilijk in te schatten. Het dynamische reservoir model suggereert 0,6 Mton, maar mogelijk is de opslagcapaciteit groter.

P18-6 heeft slechte reservoirkwaliteit, maar doordat hier een restdruk van boven 50 bar heerst, kan het reservoir worden gebruikt voor CO₂-injectie in situaties (bijvoorbeeld bij de opstart van CO₂-injectie) waarin het aangeleverde CO₂ een relatief lage temperatuur heeft, wat bij injectie in de reservoirs P18-2 en P18-4 tot hydraatvorming kan leiden in de periode dat de reservoirdruk onder 50 bar is.

Samenvattend

Met de volgende aspecten dient specifiek rekening gehouden te worden:

- De hydrostatische einddruk is bepalend voor de hoeveelheid opgeslagen CO₂.
- Reservoir P18-2 kan is het reservoir met de meeste opslagpotentie.
- Reservoir P18-6 heeft slechte reservoirkwaliteiten, maar doordat er een restdruk van boven 50 bar heerst, kan het reservoir worden gebruikt voor opstartsituaties.

Tabel 5.1. Kenmerken van de CO₂-opslag in de P18-reservoirs

Reservoir	Capaciteit Opslag CO ₂	Aantal injectieputten	Huidige reservoir druk (circa)	Initiële reservoirdruk
P18-2	30,6 Mton	3 of 4	17 - 20 bar	375 bar
P18-4	8,1 Mton	1	20 bar	348 bar
P18-6	0,6 Mton	1	50 bar	377 bar

5.2.2 Integraal opslagcomplex

Het opslagcomplex heeft betrekking op alle gebieden die mogelijk in aanraking zouden kunnen komen met CO₂, als gevolg van CO₂-injectie in de P18-reservoirs. Naast het opslagvoorkomen, zoals bovenstaand beschreven en de bijbehorende afsluitende laag, zijn dat de onderliggende lagen.

Integraal opslagcomplex voor alle P18-reservoirs

Er zijn drie afzonderlijke P18-velden die ieder als opslagvoorkomen functioneren. Voor ieder reservoir is het opslagcomplex benoemd. De zo gedefinieerde opslagcomplexen hebben een grote mate van overlap. Aangezien Porthos de intentie heeft in de drie reservoirs tegelijk CO₂ op te slaan, ligt het voor de hand een integraal opslagcomplex te definiëren. Onderstaand wordt het integrale opslagcomplex beschreven.

Tabel 5.2. Eigenschappen van de verschillende geologische eenheden in P18-2

Eenheid No		Stratigrafische eenheid	Dikte* [m]	Diepte top* mTVDss	Dichtheid** [kg/m ³]
1	Tertiair	Upper North Sea Group, NU	417	33,5	1.960
2	Tertiair	Middle and Lower North Sea Group, NM+NL	503	451	2.600
3	Krijt – upper	Kalk Group (Chalk Group), CKGR	956	920	2.300
4	Krijt – lower	Rijnland Group, KN	652	1.876	2.650
5	Jura	Schieland Group, SL	44	2.528	2.100
Afsluitende lagen (primary seal)					
6	Jura	Altena Group, (AT)	497	2.573	2.600
7	Trias – upper	Upper Germanic Trias (RN) (Keuper Fm, Muschelkalk Fm, Röt Claystone Mb, Röt Evaporite Mb, Solling Claystone Mb)	162	3.070	2.600
Reservoir					
8	Trias – lower	Lower Germanic Trias (RB) = Hardeggen Fm (RBMH) + Upper Detfurth Sandstone Mb (RBMDU) Reservoir, upper part, good producer	74	3.232	2.600
9	Trias	Lower Germanic Trias (RB) = Lower Detfurth Sandstone Mb (RBMDL) + Volprieausen Sandstone Mb (RBMV) Reservoir, lower part	137	3.305	2.600
Basis					
10	Trias	Rogenstein Mb, RBSHR + Main Clayst Mb, RBSHM (Lower part of Lower Germanic Trias)	140	3.442	2.600
11	Perm	Zechstein Group, ZE (Permian)	27	3.582	2.100
12	Perm / Carboon	Slochteren Fm, ROSL (Upper Rotliegend Group) + Carboniferous, Limburg Group (waarschijnlijk Ruurlo Fm)	>23	3.608	2.650

Toelichting

* : Dikte en diepte zijn gebaseerd op de put P18-02 aangezien deze put alle eenheden tot aan de basis van het Carboon doorboort.

** : Dichtheid van het gesteente is gebaseerd op de gebruikelijke waarde van de verschillende lithologiën.

Bovenliggende lagen

De afsluitende bovenlaag (ook wel seal of caprock genoemd) bovenop het gasvoerende reservoir wordt gevormd door een dik pakket met onder meer schalies van Trias ouderdom 150 tot 180 m dik. Deze caprock grenst direct aan het reservoir. Bovenop de Trias afdeklaag zorgt een 400 tot 500 m dik pakket van Jura kleien (onderdeel van de Altena groep) ook voor afsluiting. Beide lagen samen worden in dit rapport de afsluitende bovenlaag genoemd. Deze afsluitende bovenlaag maakt onderdeel uit van het opslagcomplex.

Ook zijn er dikke kleipakketten aanwezig in de hierboven gelegen afzettingen uit het Krijt en het Tertiair. Het geheel van afzettingen boven het reservoir wordt ook wel aangeduid als overburden.

Basis (baseseal)

De basis van de P18-reservoirs wordt gevormd door gesteentelagen uit de lower-Buntsandstein (Rogenstein en Main Claystone). De Rogenstein bestaat uit rood-bruin kleisteen en silt met een dikte van 80-90 m. Onder de Rogenstein bevindt zich de Main Claystone van de Buntsandstein, bestaande uit rood-bruine klei met dunne laagjes silt/zand en anhydriet. De dikte is circa 80 m. Alle eigenschappen zijn weergegeven in tabel 5.2, waarin de verschillende geologische eenheden van de P18 gasvelden zijn weergegeven.

Opslagcomplex zoals beschreven in de opslagvergunning voor P18-4

In het kader van het CCS ROAD project is door de toenmalige initiatiefnemers de opslagvergunning aangevraagd voor CO₂-opslag in reservoir P18-4. Deze opslagvergunning maakt het mogelijk om in het reservoir P18-4 CO₂ op te slaan. Aanvullend zal een aanvraag voor CO₂-opslag voor de reservoirs P18-2 en P18-6 worden aangevraagd. In de opslagvergunning voor P18-4 is afwijkend van de voorgestelde afbakening voor de reservoir P18-2 en P18-6.

Bij het opslagcomplex is in de vergunning een uitgebreidere afbakening opgenomen, ten aanzien van de aanvraag, op basis van het advies van TNO en SodM:

Het opslagcomplex, als bedoeld in artikel 31d, aanhef en eerste lid, onder b, van de Mijnbouw-wet, bestaat uit:

- het opslagvoorkomen, als bedoeld in het eerste lid,
- de boven het opslagvoorkomen P18-4 liggende lagen tot aan de basis van de Kalklagen (Chalk Group), bestaande uit Upper Germanic Triassic Group, Altena Group, Schieland Group, Rijnland Group, en aquifer intervals Rijn/Rijswijk sandstone, Holland Greensand, en Texel Greensand,
- de breukzones rondom het opslagvoorkomen P18-4,
- het naast gelegen voorkomen P15-9,
- de onder het opslagvoorkomen P18-4 liggende lagen, bestaande uit Rogenstein en Main Claystone.

De onderstreepte formaties zijn toegevoegd ten opzichte van de aanvraag en zoals voor het reservoir P18-2 en P18-6 zal worden aangevraagd. Daarnaast is het reservoir P15-9 als opslagcomplex toegevoegd.

Voorstel oorspronkelijke afbakening van opslagcomplex

In dit deelrapport is aangegeven dat het de voorkeur heeft de oorspronkelijk aangeduide afbakening van het opslagcomplex aan te houden, dus exclusief Schieland Group, Rijnland Group, en de aquifer intervals Rijn/Rijswijk sandstone, Holland Greensand, en Texel Greensand en het naast gelegen voorkomen P15-9.

5.3 Effecten op de diepe ondergrond

5.3.1 Relevante aspecten voor CO₂-injectie

Het injecteren van CO₂ leidt tot veranderingen in de diepe ondergrond. In deze paragraaf worden de veranderingen in de ondergrond beschreven, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen mechanische, chemische, en thermische veranderingen, alsook beperking van overig gebruik en invloed op bovenliggende lagen.

In de volgende paragrafen wordt voor de vijf beschreven vormen van ondergrondse veranderingen een toetsing uitgevoerd.

5.3.2 Mechanische veranderingen

Mechanische veranderingen

Door de injectie van CO₂ neemt de druk in het leeggeproduceerde gasreservoir toe. Drukveranderingen tijdens de injectiefase kunnen leiden tot mechanische veranderingen in de vorm van scheurtjes in het reservoirgesteente en/of in de deklaag. Daarnaast kunnen nabij gelegen breuken worden beïnvloed. Een ander proces dat plaats kan vinden als gevolg van injectie is bodemstijging. Dit is een iets complexere verandering, omdat het de potentiële bodemdaling als gevolg van gasproductie (gedeeltelijk) ongedaan kan maken.

Maatlat effectbeschrijving

Ten opzichte van de natuurlijke situatie, is het aanbrengen van mechanische veranderingen in de ondergrond per definitie een ongewenste gebeurtenis. Tijdens de winning van aardgas uit de P18-reservoirs is de druk van de reservoirs gedaald ten opzichte van de natuurlijke situatie. Hierdoor ontstaan spanningen tussen het reservoir (met een relatief lage druk) en de omgeving (met een relatief hoge druk). Bij de beoordeling van mechanische veranderingen wordt uitgegaan van de situatie ten opzichte van de referentiesituatie. In dit geval is de referentiesituatie de situatie waarin de gasreservoirs vrijwel zijn leeggeproduceerd.

Onderstaande tabel 5.3 geeft de maatlat voor de effectbeoordeling voor het aspect mechanische verandering. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de mechanische aantasting van de geologische structuur en mogelijk herstel van de huidige situatie naar de natuurlijke situatie in de ondergrond (i.e. de situatie voor de winning van gas).

Tabel 5.3. Maatlat mechanische veranderingen

Score	Mechanisch	
	Aantasting structuur	Herstel natuurlijke situatie
+++	Nvt	Nvt
++	Nvt	Volledig herstel natuurlijke situatie
+	Nvt	Gedeeltelijk herstel natuurlijke situatie
0	Geen effect	Geen effect
-	Wel mechanische veranderingen, maar geen aantasting van de structuur van het gesteente	Risico op overschrijding initiële druk
--	Gecontroleerde aantasting structuur van het gesteente,	Lichte overschrijding initiële gasdruk
---	Ongecontroleerde aantasting van de structuur van het gesteente	Overschrijding initiële gasdruk

Effect op breukbewegingen

In het kader van het Porthos project is voor de reservoirs van P18-2 en P18-6 door TNO onderzoek gedaan naar de gevolgen van CO₂-injectie op de aanwezige breukzones in de P18 reservoirs (zie bijlage 2 en 3 van dit deelrapport). In het kader van het ROAD-project is voor P18-4, binnen het CATO2 programma, onderzocht welke geomechanische effecten op kunnen treden (zie rapportage CATO2, 2011). Uit de onderzoeken is naar voren gekomen dat indien de injectie niet direct plaatsvindt in een breukzone, of in de directe nabijheid van een breukzone, de spanning over de breukzone zal afnemen tot het moment dat de injectie is afgerond.

Effect op structuur reservoirgesteente

Het is mogelijk dat de bodem als gevolg van CO₂ injectie kan stijgen. In het geval van CO₂ injectie in een leeggeproduceerd gasreservoir ligt dit iets complexer, aangezien het heel goed mogelijk is dat het reservoirgesteente als gevolg van de voorafgaande gasproductie gecompacteerd is. Wat heeft kunnen leiden tot een bodemdaling. Om bodemstijging als gevolg van CO₂ injectie te berekenen is het daarom van belang om eerst de compactie en bijbehorende bodemdaling als gevolg van de gasproductie te berekenen. Fenix Consulting Delft heeft voor Porthos onderzoek gedaan naar de bodemdaling als gevolg van gasproductie (bijlage 5). Om de bodemdaling van een gebied dat onder invloed van gaswinning staat te berekenen, wordt er gerekend met een schijfvormig gebied. De maximale bodemdaling in het beïnvloedde gebied vindt plaats in het midden van het gebied, en neemt af naar de randen toe. Een bodemdaling van minder dan 10 cm van de zeebodem wordt als gering beschouwd, waarbij er eigenlijk geen praktische consequenties optreden. Het platform zal, evenals de leidingen naar het platform toe, gedurende de productie periode mee bewegen met de bodemdaling. En doordat de beweging geleidelijk is, treden er geen waarneembare effecten op.

Uit het onderzoek van Fenix Consulting is een maximale bodemdaling als gevolg van gasproductie van 7,6 cm bij het P 18-A platform, dat in het midden van het reservoir ligt, gekomen. Doordat er tijdens de gasproductie geen registratie van de bodemdaling als gevolg van gasproductie in P18 heeft plaats gevonden, is het niet mogelijk om met zekerheid vast te stellen dat de berekende bodemdaling daadwerkelijk heeft plaats gevonden.

Vervolgens heeft Fenix Consulting berekeningen uitgevoerd voor de bodemstijging als gevolg van CO₂ injectie. Omdat het goed mogelijk is dat een gedeelte van de compactie als gevolg van gasproductie permanent is, en het reservoir dus niet helemaal “terug kan veren” naar zijn situatie voor gasproductie, is er gerekend met twee verschillende scenario's. In het eerste scenario is het compactie gedrag van het reservoir als volledig elastisch gemodelleerd en in het tweede scenario is het reservoir met hysteresis gemodelleerd. Wat wil zeggen dat een gedeelte van de compactie permanent is en een gedeelte van de compactie elastisch is. Het reservoir “veert” dus niet helemaal terug, maar zal gedeeltelijk permanent gedeformeerd zijn. Daarnaast is rekening gehouden met de verschillende mogelijke einddrukken. De resultaten van deze studie zijn weergegeven in tabel 5.4.

Tabel 5.4. Gemodelleerde bodembeweging als gevolg van CO₂-injectie in de P18-reservoirs

	Druk in reservoir (bar)			Maximale bodemdaling (cm)	
	P18-2	P18-4	P18-6	Volledig elastisch	Reservoir hysteresis
2023 – Einde productie / start injectie	20	20	45	7,6	7,6
2035 – Einde injectie (90% hydrostatische druk)	316	290	321	1,3	6,0
2035 – Einde injectie (100% hydrostatische druk)	351	322	357	0,5	5,8
2035 – Einde injectie (initiële druk)	375	340	377	0,0	5,7

Vaststellen bodemstijging door CO₂-injectie

Met behulp van gestandaardiseerde modelberekeningen is de bodemdaling als gevolg van gasproductie in P18 gemodelleerd en de mogelijke opwaartse beweging ten gevolge van CO₂-opslag. De belangrijkste conclusies hieruit zijn:

- De berekende bodemdaling ten gevolge van de gaswinning bedraagt 7,6 centimeter. Dit treedt op bij platform P18-A, wat in het midden van het reservoir ligt;
- Indien de druk in de reservoirs weer geheel wordt verhoogd tot aan de initiële druk, zal de opwaartse bodembeweging bij het platform, bij geheel elastisch gedrag van het gesteente, -7,6 centimeter bedragen;
- Indien er sprake is van gedeeltelijk niet-elastisch gedrag van het reservoir (hysterese), is de opwaartse beweging beperkt tot 2 centimeter bij terugkeer naar de initiële druk. Als gevolg daarvan is er uiteindelijk een resterende bodemdaling van 5,6 centimeter.

Aanlegfase (0)

In de aanlegfase vindt geen injectie van CO₂ plaats, waardoor veranderingen in de ondergrond niet optreden. De geologische structuur wordt niet aangetast en de natuurlijke situatie wordt niet hersteld of verslechterd. De score is neutraal (0).

Injectiefase (0, ++)

Bij de injectie van CO₂ wordt de druk in het reservoir geleidelijk verhoogd. Deze drukverhoging is een verandering op zich, maar kan ook de integriteit van het reservoirgesteente en het gesteente van de afdekkende bovenlaag beïnvloeden, door het optreden van scheurvorming (fracking). Onder normale omstandigheden zal er geen fracking optreden, waardoor het effect nihil is (0).

Anderzijds komt een drukverhoging naar het oorspronkelijke drukniveau de geologische stabiliteit van het reservoir ten goede. In geen geval wordt de druk opgevoerd tot boven de initiële gasdruk. Voor het aspect 'herstel natuurlijke situatie' is daarom een positieve score toegekend (++). Voor reservoir P18-6 geldt dit in mindere mate aangezien deze mogelijk slechts beperkt benut wordt (score +).

Als laatste komt door de drukverhoging naar het oorspronkelijke drukniveau de bodem weer omhoog. Zelfs in het geval van hysterese zal er een kleine bodemstijging plaats vinden. Aangezien de bodemstijging net als de bodemdaling tijdens de gasproductie geleidelijk plaats vindt wordt er daarom een licht positieve score toegekend (+).

Afsluitfase (0)

Door de eigenschappen van het reservoirgesteente worden lokale drukverschillen tijdens de injectiefase snel opgeheven en ontstaat een stabiele situatie. Wanneer de injectiefase stopt, vinden dan ook geen mechanische veranderingen meer plaats.

De geologische structuur en herstel van de natuurlijke situatie worden niet beïnvloed. Wel worden de putten permanent afgesloten. De score is voor beide aspecten neutraal (0).

Lange termijn (0)

Op de lange termijn is een stabiele situatie van toepassing, waardoor geen significante mechanische veranderingen meer optreden. De geologische structuur en herstel van de natuurlijke situatie worden niet beïnvloed. De score is voor beide aspecten neutraal (0).

Wellicht treedt na de injectie van CO₂ nog een geringe drukverhoging op, doordat het CO₂ langzaam de omgevingstemperatuur aanneemt en daardoor iets uitzet. Dit is besproken bij thermische veranderingen (paragraaf 5.3.3). Mogelijke lange termijn chemische reacties leiden niet tot mechanische veranderingen. Dit is besproken bij chemische veranderingen (paragraaf 5.3.4).

Bijzondere omstandigheden (--)

Onder normale omstandigheden vindt de injectie plaats onder de te bepalen kritische temperatuur- en drukwaarden. In geval van calamiteiten is het mogelijk dat deze kritische grenzen worden overschreden, waardoor een risico op beschadiging van putmaterialen en gesteentestructuur ontstaat. Dit wordt gezien als negatief effect (--).

Overzicht score

De scores die zijn toegekend zijn in tabel 5.5 weergegeven.

Tabel 5.5. Overzicht scores mechanische veranderingen

Mechanische verandering	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	++	++	+
Afsluitfase	0	0	0
Lange termijn	0	0	0
Bijzondere omstandigheden	--	--	--

Hieruit blijkt dat mechanische veranderingen van toepassing zijn in de injectiefase. Enerzijds zorgt de drukverhoging voor een verandering ten opzichte van de referentiesituatie. Anderzijds draagt deze gecontroleerde drukverhoging bij aan het herstel van de natuurlijke situatie. Aanwezige drukverschillen in de ondergrond worden langzaam opgeheven, waardoor de spanning op het gesteente afneemt.

5.3.3 Thermische veranderingen

In de P18 opslagreservoirs heerst een stabiele temperatuur van ongeveer 127°C. Tijdens de injectiefase wordt CO₂ geïnjecteerd met een veel lagere temperatuur, waardoor een lokale temperatuurverlaging ontstaat in de put en daar waar CO₂ het reservoir instroomt. Op termijn ontstaat er een balans tussen de injectie van koud CO₂ en de opwarming van het aanwezige CO₂ in het reservoir, zodat het koude front zich uitstrekt tot een maximale afstand. Tot die tijd kunnen de thermische veranderingen als gevolg van injectie leiden tot:

- Kleine scheurtjes in het gesteente ("thermal fracking"), wat kan leiden tot veel grotere scheuren in de koudezone;
- Micro-annuli in het cement langs de buitenkant van de put, waardoor er een migratieroute naar bovenliggende lagen kan ontstaan;
- Reactivatie van breukzones, waardoor aardbevingen kunnen ontstaan of een route kunnen vormen voor migratie van opgeslagen CO₂.

Maatlat effectbeschrijving

Ten opzichte van de natuurlijke situatie, is het aanbrengen van thermische veranderingen in de ondergrond per definitie een ongewenste gebeurtenis. Hoe kouder het aangeleverde CO₂, des te groter het temperatuurverschil tussen het CO₂ en de omgeving, als gevolg daarvan de potentiële gevolgen/impact. Daarnaast, treedt er extra afkoeling op rondom de put en in een zone in het reservoirgesteente, doordat geïnjecteerd CO₂ uitzet wanneer het de put verlaat. Onderstaande tabel 5.6 laat zien hoe de beoordeling plaatsvindt.

Tabel 5.6 Maatlat thermische veranderingen

Score	Thermisch
+++	Nvt
++	Nvt
+	Nvt
0	Geen effect
-	Thermische veranderingen, niet verstorend
--	Ongewenste veranderingen, mogelijk permanent
---	Ontoelaatbare thermische veranderingen, zeker permanent

De bevindingen uit het CATO2 onderzoek en de TNO-onderzoeken in bijlage 2 en 3 zijn gebruikt voor onderstaande effectbepaling.

Effect op het reservoirgesteente en/of de caprock

De injectie van koude CO₂ in het relatief warme reservoirgesteente kan leiden tot de vorming van kleine scheurtjes (thermal fracturing) in het reservoirgesteente. Wanneer deze scheurtjes, of fractures, door continue injectie verder groeien (propageren), kunnen ze leiden tot grotere scheuren (fractures). Deze scheuren ontstaan meestal in de horizontale richting, parallel aan de verplaatsing van het CO₂ koudefront vanaf het instroompunt. De ontwikkeling van de scheuren vergroot lokaal de permeabiliteit en daarmee de injectiviteit van het reservoir rondom de put. Wel moet door zorgvuldig injecteren voorkomen worden dat deze horizontale scheuren zich in de verticale richting gaan ontwikkelen. De migratie van het koudefront gaat in alle richtingen en het bereik van het koudefront is afhankelijk van het ondiepste injectiedeel van de injectieput in het reservoirgesteente ten opzichte van het reservoir/caprock contact.

Effect op de put en cementering

De temperatuurveranderingen hebben invloed op de put. Omdat temperatuurverschillen zich op termijn zullen opheffen, zijn eventuele effecten van thermische veranderingen tijdelijk en lokaal, i.e. direct rondom van de put, van aard. Indien de temperatuurverschillen leiden tot verandering in het materiaal, zoals de formatie van micro-annuli, dan is de verandering mogelijk niet tijdelijk, maar permanent en heeft dit ook op de langere termijn mogelijk een effect voor de integriteit van de put. Beschadigingen kunnen optreden in de casing, het cement of op het contact tussen het cement en het reservoirgesteente. Het effect van deze beschadigingen en de mitigerende maatregelen zijn beschreven in sectie 6.2.

Kans op reactivatie van een breuk

De thermische modellering laat zien dat bij injectie een koude front ontstaat. Indien het koudefront een breukzone bereikt, kan dit leiden tot thermische spanningen over een toch al kritisch gespannen onderdeel van een reservoir en ontstaat er een hogere kans op breukreactivatie. Het ontstaan van thermische spanning hoeft niet per definitie (direct) te leiden tot reactivatie van de breuk, maar vergroot de kans tot reactivatie. Het is daarom van belang dat dit koude front niet tot aan een breukzone komt om verhoogd risico op reactivatie als gevolg van thermische spanningen te voorkomen. Modelberekeningen zijn daarom gebruikt om vast te stellen bij welke injectiestrategie thermische effecten bij een breukzone kunnen worden voorkomen.

Het TNO-rapport laat zien dat de meeste putten op zodanige afstand van breukzones staan dat de kans zeer gering is dat het koudefront tot een breukzone reikt, met uitzondering van de put in P18-6. Deze wordt periodiek ingezet, waarbij het van belang is dat de periode en debiet van injectie beperkt is. Nadere berekeningen zullen moeten aangeven welke periode en welk volume hiervoor als maximum moet worden aangehouden.

Aanlegfase (0)

In de aanlegfase vindt nog geen injectie van CO₂ plaats en zijn thermische veranderingen in de ondergrond niet van toepassing. De score is neutraal (0).

Injectiefase (--)

De injectiestrategie is zodanig ontworpen dat bij een normale operatie, met een temperatuur van de CO₂ boven op het platform van minimaal 40°C, de temperatuur in de reservoirs boven de 15°C blijft. Onder normale omstandigheden vinden dus wel thermische veranderingen plaats, maar deze veranderingen zijn tijdelijk en zeer lokaal rondom de put. Wanneer de injectie stopt, nemen ook de thermische veranderingen af.

De thermische veranderingen kunnen leiden tot aantasting van het cement rond de put waardoor micro-annuli ontstaan, waardoor de integriteit van de put afneemt. Dit is in potentie een route voor migratie, tenzij de druk bij de put niet boven de hydrostatische druk uitkomt. Er is een negatieve score toegekend (-).

Afsluitfase (0)

Tijdens de afsluitfase stopt de injectie van CO₂ en worden de putten afgesloten. In deze periode vinden geen specifieke thermische veranderingen plaats, waardoor de score neutraal is (0).

Lange termijn (0)

Opgeslagen CO₂ warmt langzaam op tot de omgevingstemperatuur. Op de lange termijn is dus een stabiele situatie van toepassing, waardoor geen grote thermische veranderingen meer optreden. Als gevolg van de opwarming kan de druk in het reservoir iets toenemen. Met deze beperkte druktoename wordt rekening gehouden bij het definitief vaststellen van de veiligheidsmarge in de maximaal toegestane einddruk na de injectiefase. Hierdoor vormt deze mogelijke drukstijging geen bedreiging. De score is neutraal (0).

Bijzondere omstandigheden (--)

Onder normale omstandigheden vindt de injectie plaats onder de te bepalen kritische temperatuur- en drukwaarden. In geval van calamiteiten is het mogelijk dat deze kritische grenzen worden overschreden, waardoor een risico op beschadiging van putmaterialen en gesteentestructuur ontstaat. Dit wordt gezien als negatief effect (--).

Overzicht score

De scores die zijn toegekend zijn in tabel 5.7 weergegeven.

Tabel 5.7. Overzicht scores beperking toekomstig gebruik

Thermische verandering	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	--	--	--
Afsluitfase	0	0	0
Lange termijn	0	0	0
Bijzondere omstandigheden	--	--	--

Hieruit blijkt dat thermische veranderingen van toepassing zijn in de injectiefase. Onder normale omstandigheden zal bij de injectiestrategie rekening gehouden moeten worden met mogelijke gevolgen voor thermische effecten. In het geval van calamiteiten of koude injectie van CO₂, ontstaat een risico op ongewenste veranderingen.

5.3.4 Chemische veranderingen

Chemische veranderingen

In combinatie met (formatie/poriën)water, kan het geïnjecteerde CO₂ mogelijk reacties aangaan met de aanwezige gasen of gesteenten in de ondergrond.

Dit kan potentieel leiden tot de aantasting van de structuur van het gesteente, en daarmee de stabiliteit van de ondergrond, aantasting van de materialen van de putten, of tot verlaging van de injectiviteit. Chemische reacties kunnen op verschillende tijdschalen plaatsvinden, variërend van seconden tot duizenden jaren.

Maatlat effectbeschrijving

Ten opzichte van de natuurlijke situatie, is het aanbrengen van veranderingen in de ondergrond per definitie een ongewenste gebeurtenis. In geval van de injectie van CO₂, zal een chemische verandering altijd optreden; CO₂ wordt immers in het reservoir gepompt. De score met betrekking tot chemische veranderingen wordt bepaald door de het type chemische reacties dat op kan treden en de mate waarin deze reacties van invloed zijn op de structurele eigenschappen van het reservoir.

Onderstaande tabel 5.8 laat zien hoe de beoordeling plaatsvindt.

Tabel 5.8. Maatlat chemische veranderingen

Score	Chemisch
+++	Nvt
++	Nvt
+	Nvt
0	Geen effect
-	Chemische veranderingen, niet verstorend
--	Ongewenste chemische reacties en/of veranderingen veroorzaakt door chemische reacties
---	Ontoelaatbare chemische reacties en/of veranderingen veroorzaakt door chemische reacties

De bevindingen uit het CATO2 onderzoek en de TNO-onderzoeken in bijlage 2 en 3 zijn gebruikt voor onderstaande effectbepaling.

Samenstelling van het CO₂-mengsel

Bij CO₂-injectie wordt voornamelijk CO₂ in het reservoir gebracht (95% of meer van het gasmengsel), maar het betreft geen pure CO₂. Met het CO₂ komen dus ook andere stoffen uit het gasmengsel in het reservoir terecht. De overige stoffen kunnen leiden tot aangepaste fase overgangen tussen gasvorming, vloeibaar en superkritisch van het geïnjecteerde gasmengsel. Daarnaast kunnen chemische reacties hierdoor ook worden beïnvloed.

Mogelijk aanwezig water in de reservoirs

In geen van de putten is water in het reservoir aangeboord. Het GWC (contactlaag van gas en `vrij` water) wordt bij het modelleren daarom aangenomen als zijnde ver onder het diepste punt van de gasreservoirs zoals aangeboord.

Anderzijds, de poriën in het reservoir zelf zijn gevuld met gas en water; dat wordt gemeten met behulp van de elektrische well logs waarmee een waterverzadiging van 30-60% wordt gemeten. Dit betekent een gasverzadiging van 70-40%. Voor zover bekend wordt er geen vrij water met het gas meegeproduceerd, aangezien er in de gepubliceerde productie cijfers geen melding gemaakt wordt van meegeproduceerd water. Dat betekent dus dat het water wat in de poriën zit niet produceerbaar is.

Chemische reacties in het reservoirgesteente

Chemische reacties in het reservoirgesteente hebben een lichte invloed op de porositeit van het reservoirgesteente.

Op de korte termijn (uren tot maanden) speelt vooral de daling van de pH een rol. CO₂ lost op in formatiewater dat aanwezig is in het reservoir, volgens de volgende reacties:

- $\text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$

Door het oplossen van CO₂ daalt de pH naar een waarde van minimaal 3,5. Op de middellange termijn (jaren tot decennia) wordt de pH weer hoger (tot 4,2), door de bufferende werking van (trage) oplosreacties van mineralen, zoals carbonaten en sulfaten. Door de beperkte aanwezigheid van deze mineralen (<5%) zal dit slechts tot een zeer kleine toename in porositeit leiden. Op de lange termijn (geologische tijdsschaal) wordt langzaam maar zeker een thermodynamisch evenwicht bereikt. De chemische reacties die hiermee gepaard gaan zorgen voor het oplossen en neerslaan van bepaalde mineralen. Uiteindelijk zorgen deze reacties ervoor dat de porositeit met 0,3 pp (percentage point) afneemt. Mogelijk kan ook compactie optreden door het oplossen van mineralen in het reservoirgesteente, waardoor de porositeit verder afneemt.

Chemische reacties in de afdeklaag

Chemische reacties in de afdeklaag hebben ook een lichte invloed op de pH en porositeit van het gesteente van de afdeklaag. De werking hiervan verschilt echter van de reacties in het reservoirgesteente, doordat de afdeklaag een ondoorlatende barrière vormt. Mogelijk kan opgelost CO₂ vanuit het reservoir de afdeklaag binnendringen. Dit is echter een langzaam migratieproces, dat zich zeer lokaal afspeelt op het grensvlak tussen de afdeklaag en het reservoirgesteente. In geen enkel geval is het zo dat de gehele afdeklaag, met een dikte van vele honderden meters, beïnvloed wordt door CO₂.

Het verloop van de reacties is op hoofdlijnen vergelijkbaar met de reacties in het reservoirgesteente. Door het oplossen van CO₂ daalt de pH in de caprock naar een waarde van minimaal 3,2.

Op de middellange termijn (jaren tot decennia) wordt de pH weer hoger (tot 4,3), door de bufferende werking van (trage) mineraal reacties. De porositeit wordt in deze fase niet significant beïnvloed. Op de lange termijn (duizenden jaren) zorgen chemische reacties voor het oplossen en neerslaan van bepaalde mineralen, waardoor de porositeit met 0,2 pp (percentage point) toeneemt.

Chemische veranderingen in het reservoirgesteente en de afdeklaag treden op, maar het versturende effect is zeer beperkt en vormt geen bedreiging. Voor de modelberekeningen is bovendien aangenomen dat er voldoende formatiewater aanwezig om de reacties plaats te laten vinden. In de praktijk is de beperkte beschikbaarheid van formatiewater een sterk limiterende factor, waardoor de uitkomsten van de modelberekeningen overschat kunnen zijn. Daarom is een licht negatieve score (-) toegekend.

Aanlegfase (0)

In de aanlegfase vindt nog geen injectie van CO₂ plaats en zijn chemische veranderingen in de ondergrond niet van toepassing. De score is neutraal (0).

Injectiefase, afsluitfase en lange termijn (-)

De impact van chemische veranderingen hangt samen met het type reactie en de snelheid van chemische reacties. Dergelijke reacties vinden plaats op verschillende tijdschalen: kort (vrijwel direct na injectie van CO₂), middellang (maanden of jaren na injectie, maar tijdens de injectiefase) of lange termijn (geologische tijdsschaal). Chemische veranderingen zijn, ook op de lange termijn, niet uit te sluiten.

Bijzondere omstandigheden (-)

In geval van bijzondere omstandigheden treden mogelijk chemische veranderingen op. Een voorbeeld hiervan is een calamiteit waarbij het CO₂ dat wordt geïnjecteerd is verontreinigd met andere (ongewenste) componenten. Een van de belangrijkste potentiële verontreinigingen is zuurstof (O₂). Onder normale omstandigheden is de maximale O₂ concentratie kleiner dan 40 ppm. Als worst-case scenario is onderzocht wat het effect is van een veel hoger O₂ concentratie. Hieruit blijkt dat, zelfs op de lange termijn, effecten van verhoogde zuurstof concentratie geen significant effect hebben op de porositeit van het gesteente. Wel wordt de hoeveelheid pyriet die oplost en de hoeveelheid anhydriet die neerslaat licht verhoogd. Er is een licht negatieve score toegekend.

Overzicht score

De scores die zijn toegekend zijn in tabel 5.9 weergegeven.

Tabel 5.9. Overzicht scores chemische veranderingen

Chemische verandering	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	-	-	-
Afsluitfase	-	-	-
Lange termijn	-	-	-
Bijzondere omstandigheden	-	-	-

Hieruit blijkt dat chemische veranderingen van toepassing zijn in de injectiefase, de afsluitfase en de lange termijn. Chemische veranderingen zullen wel optreden, maar het verstorende effect van deze veranderingen wordt niet als bedreiging beschouwd.

5.3.5 Beperking toekomstig gebruik

Beperking overig gebruik

Door een veranderd perspectief betreffende het gebruik van de ondergrond zouden leeggeproduceerde reservoirs (in de toekomst) voor meerdere doeleinden kunnen worden hergebruikt. Zo zouden ze kunnen worden gebruikt om er verschillende gassen permanent in op te slaan, of tijdelijk te bufferen. Als gevolg daarvan is het mogelijk dat de directe omgeving van een opslagreservoir wordt beïnvloed door potentiële ontwikkelingen van andere initiatieven of projecten, zoals bijvoorbeeld de winning van aardwarmte in de nabijheid van het opslagreservoir. Aangezien voor het Porthos-project de opslag offshore plaats vindt zal dit hier niet van toepassing zijn.

Maatlat effectbeschrijving

Leeggeproduceerde reservoirs kunnen (in de toekomst) voor meerdere doeleinden worden hergebruikt. Het is niet ondenkbaar dat hier in de toekomst nog meer gebruiksfuncties bij komen. Maar door de permanente opslag van CO₂ in P 18 worden andere mogelijkheden van en in de directe nabijheid van dit opslagcomplex uitgesloten.

Onderstaande tabel 5.10 laat zien hoe de beoordeling plaatsvindt.

Tabel 5.10. Maatlat beperking overig gebruik

Score	Overig gebruik
+++	Nvt
++	Nvt
+	Nvt
0	Geen effect
-	Tijdelijke uitsluiting van andere gebruiksfuncties
--	Permanente uitsluiting van andere gebruiksfuncties
---	Nvt

Aanlegfase (0)

Gezien het feit dat de geplande CO₂-injectie nog niet is gestart, is een eventuele beperking van overig gebruik nog niet van toepassing. De score is neutraal (0).

Injectiefase, afsluitfase en lange termijn (--)

Het is de bedoeling dat CO₂ permanent wordt opgeslagen. Het gevolg hiervan is dat het opslagreservoir volledig en permanent wordt gebruikt, waarmee alle andere gebruiksmogelijkheden vervallen.

Bijzondere omstandigheden (0)

Bijzondere omstandigheden (calamiteiten) niet direct van toepassing voor de beperking van toekomstige benutting van het leeggeproduceerde gasreservoir.

Overzicht score

De scores die zijn toegekend zijn in tabel 5.11 weergegeven.

Tabel 5.11. Overzicht scores beperking toekomstig gebruik

Beperking toekomstig gebruik	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	--	--	--
Afsluitfase	--	--	--
Lange termijn	--	--	--
Bijzondere omstandigheden	0	0	0

Hieruit blijkt dat benutting van de P18-reservoirs voor de opslag van CO₂ voorgoed beslag legt op de reservoirs.

5.3.6 Invloed op bovenliggende lagen

De invloed op bovenliggende lagen heeft betrekking op migratie van CO₂ naar nabijgelegen gasreservoirs. Nabijgelegen reservoir kunnen in bezit zijn van andere operators en er kan gas- of oliewinning plaats vinden. Verstoring van dergelijke olie- en gasvoorraden als gevolg van CO₂-opslag in de P18-reservoirs is niet gewenst.

Maatlat effectbeschrijving

Het aspect invloed op bovenliggende lagen heeft betrekking op de mogelijke migratie van CO₂ uit de P18 velden naar bovenliggende lagen. In de nabijheid van de P18-reservoirs liggen diverse andere producerende olie- en gasreserves. Veelal zijn deze in bezit van verschillende operators. Migratie van CO₂ uit het opslagreservoir is uiteraard ongewenst, waarbij migratie naar andere olie- of gasreserves als extra nadelig wordt beschouwd.

Onderstaande tabel 5.12 laat zien hoe de beoordeling plaatsvindt.

Tabel 5.12. Maatlat invloed op bovenliggende lagen

Score	Invloed bovenliggende lagen
+++	Nvt
++	Nvt
+	Nvt
0	Geen effect
-	Risico op migratie van CO ₂ naar bovenliggende lagen
--	Migratie/lekkage van CO ₂ naar bovenliggende lagen, waarbij CO ₂ mogelijk wordt ingevangen in andere olie- en gasreserves
---	Migratie/lekkage van CO ₂ naar bovenliggende lagen, waarbij CO ₂ wordt ingevangen in andere olie- en gasreserves

Aanlegfase (0)

In de aanlegfase vindt nog geen injectie van CO₂ plaats en is het aspect invloed op bovenliggende lagen niet van toepassing. De score is neutraal (0).

Injectiefase (0), afsluitfase en lange termijn (0)

In hoofdstuk 6 zijn de risico's op migratie van CO₂ uit het reservoir in detail uitgewerkt. De conclusie hiervan is dat het risico hiervan (verwaarloosbaar) laag is, waardoor een neutrale score is toegekend (0).

Bijzondere omstandigheden (-)

Bijzondere omstandigheden hebben in deze paragraaf betrekking op het mogelijke risico op lekkage van CO₂ uit het reservoir. In het basisalternatief vormen de putten het belangrijkste aandachtspunt. In het geval van calamiteiten kunnen echter ook andere vormen van CO₂-lekkage uit het reservoir spelen. Dit is verder uitgewerkt in hoofdstuk 6, migratiescenario's.

In geval van calamiteiten kan sprake zijn van een verhoogd risico op CO₂-migratie naar bovenliggende lagen. De score hiervoor is licht negatief (-).

Overzicht score

De scores die zijn toegekend zijn in tabel 5.13 weergegeven.

Tabel 5.13. Overzicht scores invloed bovenliggende lagen

Invloed bovenliggende lagen	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	0	0	0
Afsluitfase			
Lange termijn			
Bijzondere omstandigheden	-	-	-

Dit aspect hangt samen met het risico dat CO₂ uit het reservoir kan migreren. Dit is onderzocht door middel van een risico-evaluatie (zie hoofdstuk 6). Uit deze evaluatie blijkt dat het risico op migratie van CO₂ uit het reservoir verwaarloosbaar klein is. Daarmee is ook het risico dat CO₂ van invloed is bovenliggende lagen verwaarloosbaar klein. De alternatieven en varianten zijn niet onderscheidend.

5.4 Effecten op biosfeer

Bovenstaand zijn de veranderingen in de ondergrond beschreven, waarbij onderscheid is gemaakt tussen mechanische veranderingen, chemische veranderingen, thermische veranderingen, beperking overig gebruik en invloed op bovenliggende lagen.

In deze paragraaf wordt onderzocht wat de doorwerking van deze veranderingen is naar de biosfeer (de ondergrond vanaf 500 meter diepte tot aan maaiveld). Aspecten die hierbij aan bod komen zijn bodembeweging en aardbevingen (bodemtrillingen).

In tabel 5.14 is de maatlat voor de waardering van de effecten voor dit thema weergegeven. In het Hoofdrapport van dit MER behoren de aspecten bodembeweging en bodemtrilling toe aan het aspect 'bodem'.

Tabel 5.14. Maatlat bodembeweging en -trilling

Score	Bodembeweging	Risico aardbeving (trilling)
+++	Volledig herstel oorspronkelijke situatie (opheffen eerdere bodemdaling)	Nvt
++	Gedeeltelijk herstel oorspronkelijke situatie (opheffen eerdere bodemdaling)	Nvt
+	Tot stilstand brengen van bodembeweging	Verminderen kans op trilling
0	Geen effect	Geen effect
-	Meetbaar effect	Meetbaar effect
--	Gevolgen duidelijk merkbaar	Gevolgen duidelijk merkbaar
---	Gevolgen onacceptabel	Risico trillingen onaanvaardbaar

5.4.1 Bodembeweging

Zoals in paragraaf 5.3.1 beschreven wordt, is door Fenix consulting Delft een rapport opgesteld met betrekking tot de mogelijke bodemdaling en bodemstijging bij de P18-velden. Dit rapport is als bijlage 5 opgenomen bij dit deelrapport. In het rapport zijn berekeningen uitgevoerd voor de bodemdaling tijdens de productie van aardgas en voor de mogelijke opwaartse beweging ten gevolge van het injecteren van CO₂, voor verschillende einddrukken.

In hoofdstuk 5.3.2 is uitgebreid aandacht besteed aan de bodembeweging ten gevolge van CO₂-injectie. Daaruit volgt dat de bodemdaling ten gevolge van de gaswinning naar verwachting geheel of grotendeels zal worden opgeheven. De oorspronkelijk daling van de bodem op dit deel van de Noordzee met enkele centimeters heeft op het milieu geen invloed. De bodemstijging scoort wel positief als verandering in de ondergrond, maar voor het milieu is het effect nihil.

Bodembeweging tijdens injectie van CO₂ (0)

De opwaartse bodembeweging van de zeebodem heeft geen invloed op het platform of de leidingen nabij het platform. Dit effect wordt geclassificeerd als nihil (0).

5.4.2 Risico van aardbevingen (bodemtrillingen)

De Seismische Risico Analyse (SRA) is uitgevoerd om na te gaan hoe groot de kans is op een aardbeving (of trilling) en wat de mogelijke gevolgen hiervan zijn.

De mogelijkheid dat de beschreven veranderingen in reservoirs kunnen leiden tot aardbevingen (of bodemtrillingen) is in het kader van het Porthos project onderzocht door Fenix consulting Delft in de vorm van een seismische risico analyse (SRA). Deze SRA is als bijlage 6 toegevoegd aan dit deelrapport.

Re-activatie van breuken tijdens gaswinning

Tot nu toe is er geen seismische activiteit gemeten door het meetnetwerk van KNMI dat kan worden toegeschreven aan gaswinning in de P18-reservoirs. In andere gedeelten van het West Nederland Bekken met producerende gasreservoirs in de Trias is beperkte seismische activiteit waargenomen.

Risico Reactivatie van breuken door CO₂ injectie

Chemische interacties

De aanwezigheid van bepaalde mineralen, zoals (fijn korrelige) carbonaat, in de breukzone kan mogelijk leiden tot een verhoogd risico op reactivatie. Onder invloed van oplossingsreacties van carbonaten in het CO₂ satureerde poriënwater, kan de porositeit toenemen of het gesteente zwakker worden. Dit kan niet alleen een effect hebben op de gasdichtheid van de breuk, maar ook op de sterkte en stabiliteit van de breuk. Het heeft ook een effect op de sterkte en stabiliteit van een breuk en die neemt af als carbonaten oplossen.

Mechanische reactivatie

Drukveranderingen als gevolg van injectie leiden niet alleen tot veranderingen in het spanningsveld in een reservoir, maar ook om een breuk. Een verandering van het spanningsveld kan vervolgens leiden tot stressverlichting door verplaatsingen langs een breukvlak (breukbewegingen), wat weer kan leiden tot een veranderde (een lagere of een hogere) doorlatendheid van de breukzone. Zulke verplaatsingen kunnen mogelijk tijdens de gasproductie fase zijn opgetreden, maar kunnen ook optreden tijdens de injectiefase. Dit betekent dat injectie geïnduceerde vervorming (deformatie) van het reservoir, volgend op een continue veranderend spanningsveld, kan leiden tot breuk reactivatie.

Daarnaast, als de mineralogie van de breukzone verandert doordat carbonaten oplossen, kan de potentie tot breuk reactivatie toenemen door een afnemende weerstand tot verplaatsing (sterkte) van de breuk compositie. In dit geval gaat een afname in sterkte gepaard met een toename in stabiliteit, wat wil zeggen dat hoewel verplaatsing mogelijk makkelijker wordt, het karakter minder vatbaar is voor aardbevingen.

Thermische reactivatie

De thermische modellering laat zien dat bij injectie een koude front ontstaat. Indien het koudefront een breukzone bereikt, bestaat de kans op reactivatie door een eenzijdige, thermisch geïnduceerde verandering van het spanningsveld rondom de breuk. Dit hoeft niet direct te leiden tot reactivatie van de breuk, maar vergroot wel de kans tot reactivatie. Het is daarom van belang dat dit koudefront niet tot aan een breukzone komt om een ongewenste situatie te vermijden. De modelberekeningen zijn gebruikt om vast te stellen bij welke injectiestrategie thermisch geïnduceerde spanningseffecten bij een breukzone kunnen worden voorkomen.

De rapportage komt tot de onderstaande conclusies:

- Bij de gaswinning van P18-reservoirs kan compactie optreden en daarmee seismiciteit. Er is geen seismiciteit geregistreerd tijdens de gaswinning (vanaf de detectielimiet van KNMI);
- Aangezien de druk gedurende CO₂-injectie weer wordt hersteld en er geen waarneembare seismiciteit heeft opgetreden tijdens de gaswinning, wordt het risico van waarneembare seismiciteit gedurende injectie als klein gezien (Teatini et al., 2019)¹²;
- Seismiciteit voor P18 valt in de categorie 1¹³, waarvoor alleen monitoring middels een regionaal netwerk vereist is;
- Reactivatie van breuken tijdens de injectie fase is onwaarschijnlijk. De lokale drukopbouw tijdens injectie is relatief klein zodat geomechanische drukeffecten verwaarloosbaar klein zijn.

Bodemtrillingen tijdens injectie van CO₂ (0), op de lange termijn (+)

Samenvattend geldt dat trillingen in dit gebied in het verleden niet zijn opgetreden. Tijdens de injectie van CO₂ wordt de kans op een meetbare aardbeving als nihil gezien (0).

Op de lange termijn neemt de kans op bodemtrillingen af doordat de reservoirs worden gevuld met CO₂ en drukverschillen in de ondergrond worden opgeheven. Dit aspect wordt licht positief (+) beoordeeld.

Bodemtrillingen bijzondere omstandigheden (-)

Op basis van de beschikbare informatie is geconcludeerd (Fenix, 2019) dat in het geval er zich een aardbeving voordoet, deze geringe kracht heeft. Berekeningen laten zien dat dit op een afstand van 10

¹² Teatini, P., C. Zoccarato, M. Ferronato, A. Franceschini, G. Isotton, M. Frigo, C. Janna, (2019), "KEM-01 Geomechanical factors determining fault criticality during pressure cycling of underground gas storage

¹³ Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning tijdelijke leidraad voor adressering MBB. 24.1.P, Versie 1.2

kilometer amper waarneembaar. Dat wil zeggen dat aan de kust een dergelijke aardbeving niet of nauwelijks merkbaar is. Zelfs bij de maximale berekende waarde zal er hooguit een licht trilling aan de kust waarneembaar zijn. Dit wordt als een beperkt negatief effect gescoord (-)

De trilling zal niet leiden tot een vloedgolf. De treedt op als er een beving is in een diepe zee, waarna de golf zich voortzet richting ondiep gebied. In dit geval bevinden de reservoirs zich onder een relatief ondiepe zee (circa 30 meter diep), waardoor geen vloedgolf ontstaat.

Een aardbeving zal niet leiden tot het ontsnappen van een grote hoeveelheid CO₂ uit het reservoir. De enige directe route naar de buitenlucht is via een injectieput. Indien nodig kunnen de injectieputten worden ingesloten. Hiervoor zijn meerdere afsluitmechanismen beschikbaar in de put.

Tabel 5.15. Overzicht scores effecten op de biosfeer

Effecten op de biosfeer	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	0	0	0
Afsluitfase	0	0	0
Lange termijn	+	+	0
Bijzondere omstandigheden	-	-	-

Zoals blijkt uit de scoretabel 5.15 zijn de effecten op de biosfeer beperkt. Er is een verschil tussen de reservoirs met betrekking tot de lange termijn, doordat de P18-2 en P18-4 reservoirs worden opgevuld tot hydrostatische druk en het P18-6 reservoir mogelijk niet. Dit leidt (theoretisch) tot minder bodemstijging, hoewel dit niet meetbaar zal zijn naast de effecten van de reservoirs P18-2 en P18-4.

5.5 Samenvatting MER-beoordeling

De bevindingen betreffende alle mogelijke veranderingen in zowel de diepe ondergrond als in de biosfeer zijn in de onderstaande tabel samengevat. Hieruit blijkt dat er:

- Een positieve score is voor de mechanische verandering, doordat de onderdruk in de reservoirs veroorzaakt door de winning van aardgas grotendeels wordt opgeheven. Dit werkt positief door op het effect bodembeweging;
- Een negatieve score is voor de thermische verandering tijdens de injectie fase, veroorzaakt door het koudefront dat ontstaat in het reservoir. Als mitigerende maatregel vindt aanpassing van de injectiestrategie plaats;
- Een negatieve score is voor beperking toekomstig gebruik, aangezien het reservoir door de opslag van CO₂ niet meer voor andere doeleinden gebruikt kan worden.

Daarnaast toont de onderstaande tabel aan dat voor bijzondere omstandigheden er een “beperkt negatieve” of een “negatieve” score optreedt. De bijzondere omstandigheden kunnen leiden tot effecten op de biosfeer ten gevolge van aardbevingen, zoals in hoofdstuk 5.4 beschreven. Specifiek voor CO₂-opslag geldt dat er een mogelijk risico kan zijn dat de opgeslagen CO₂ door bijzondere omstandigheden migreert of lekt uit het opslagvoorkomen. Hiervoor is een risicoanalyse uitgevoerd, beschreven in hoofdstuk 6.

Tabel 5.16. Overzicht scores diepe ondergrond

Mechanische verandering	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	++	++	+
Afsluitfase	0	0	0
Lange termijn	0	0	0
Bijzondere omstandigheden	--	--	--
Thermische verandering	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	--	--	--
Afsluitfase	0	0	0
Lange termijn	0	0	0
Bijzondere omstandigheden	--	--	--
Chemische veranderingen			
Aanlegfase	0		
Injectiefase	-		
Afsluitfase			
Lange termijn			
Bijzondere omstandigheden			
Beperking toekomstig gebruik	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	--	--	--
Afsluitfase			
Lange termijn			
Bijzondere omstandigheden	0	0	0
Invloed bovenliggende lagen			
Aanlegfase	0		
Injectiefase	0		
Afsluitfase	0		
Lange termijn	0		
Bijzondere omstandigheden	-		
Effecten op de biosfeer	P18-2	P18-4	P18-6
Aanlegfase	0	0	0
Injectiefase	0	0	0
Afsluitfase	0	0	0
Lange termijn	+	+	0
Bijzondere omstandigheden	-	-	-

6 Risicoanalyse lekkage CO₂ uit de P18 reservoirs

Dit hoofdstuk beschrijft het risico dat lekkage optreedt van de opgeslagen CO₂ uit het reservoir naar de biosfeer. Aan de hand van mogelijke lekkagescenario's wordt vastgesteld onder welke omstandigheden deze lekkage zou kunnen optreden en wat de mogelijkheden zijn om de kans op lekkage te minimaliseren.

CO₂ wordt permanent opgeslagen in de P18-reservoirs. Dit houdt in dat tijdens de injectiefase, maar ook op de (zeer) lange termijn het geïnjecteerde CO₂ veilig in de opslagvoorkomens blijft. Zowel de CO₂-injectie als de CO₂-opslag dienen zodanig plaats te vinden, dat de kans op lekkage van CO₂ uit het opslagvoorkomen minimaal is. Het is onwenselijk dat CO₂ migreert vanuit het opslagvoorkomen naar het opslagcomplex. Desalniettemin zal het CO₂ bij lekkage uit het opslagcomplex in eerste instantie ondergronds opgeslagen worden in de overburden. Indien het daar niet blijft opgeslagen, bestaat de mogelijkheid dat het CO₂ ook in de biosfeer terecht komt. Dit heeft mogelijk negatieve milieugevolgen voor de biosfeer, die dan ook moeten worden beoordeeld. Daarnaast is er dan ook geen sprake meer van ondergrondse opslag van CO₂.

Verschillende studies hebben aangetoond dat er (hypothetische) scenario's zijn, waardoor lekkage van CO₂ uit een reservoir zou kunnen optreden. Deze scenario's zijn gekoppeld aan mogelijke lekkagepaden voor CO₂ en worden in dit hoofdstuk beschreven.

Elk lekkagescenario wordt volgens een vast stramien onderzocht. Eerst worden de mogelijke lekkagescenario's vastgesteld en beschreven. Vervolgens wordt per scenario met behulp van de bow-tie risicoanalyse de kans op voorkomen en beperken beoordeeld. Tot slot wordt het resterend risico per scenario in de risico-matrix weergegeven.

Paragraaf 6.1 beschrijft nader de verschillende stappen van de risico-evaluatie methodiek. Vervolgens wordt in paragraaf 6.2 lekkage via de putten beschreven. In paragraaf 6.3 tot en met 6.5 worden drie aanvullende scenario's nader uitgewerkt, met lekkagepaden vanuit het reservoir via de diepe ondergrond. In de lekkagescenario zijn twee fasen van belang, namelijk tijdens en na CO₂-injectie. De bevindingen hebben betrekking op de aanlegfase (benodigde aanpassingen specifiek in de putten), de gebruiksfase en de afsluitfase.

6.1 Methodiek risicoanalyse

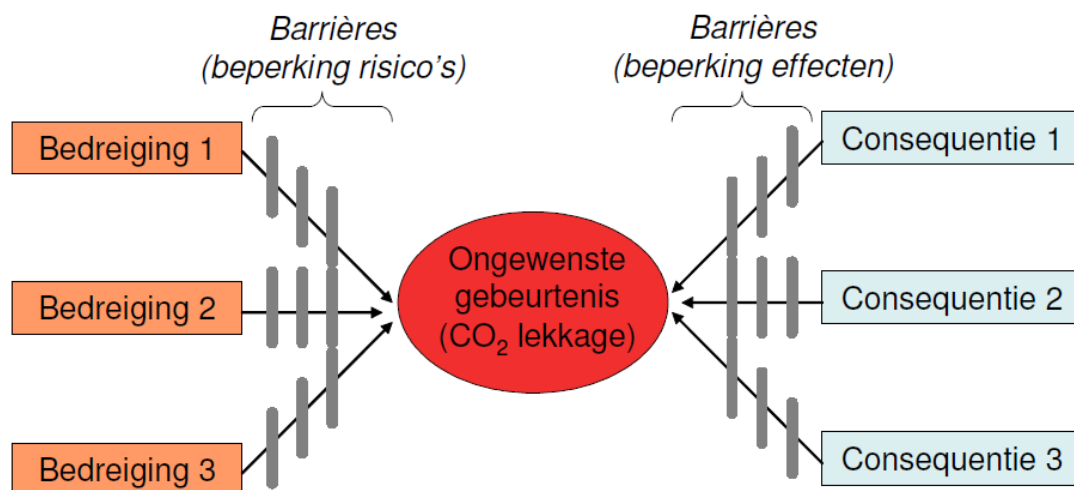
6.1.1 Lekkagescenario's

In deze risicoanalyse wordt uitgegaan van vier mogelijke lekkagescenario's. Deze vier scenario's vertegenwoordigen de vier potentiële lekkagepaden die eerder zijn vastgesteld in het generieke MER voor CO₂-opslag, AMESCO, en later zijn toegepast in de MER's voor CCS Barendrecht en CCS ROAD. Het betreft de volgende potentiële lekkagescenario's:

- Lekkage langs of door de putten;
- Lekkage door de afdichtende bovenlaag;
- Lekkage langs geologische breuken;
- Lekkage door overvulling van het reservoir (spillpoint).

Deze lekkagescenario's worden in hoofdstuk 6.2 tot en met 6.5 nader beschreven.

6.1.2 Risicoanalyse middels bow-tie methodiek per scenario



Figuur 6.1. Schematische weergave van de bow-tie methodiek

De bow-tie methodiek biedt de mogelijkheid bij een ongewenste gebeurtenis, in dit geval een lekkage scenario, de mogelijke oorzaken en gevolgen in beeld te brengen. De bedreigingen worden aan de linkerkant geplaatst en de consequenties aan de rechterkant. Aan beide kanten worden barrières benoemd, waarmee respectievelijk de kans dat het scenario zich voordoet wordt beperkt en de gevolgen indien het scenario optreedt, wordt beperkt.

Voor ieder lekkagescenario worden zodoende zes stappen onderscheiden:

1. Beschrijving van het betreffende lekkagescenario.
2. Beschrijving van de bedreigingen en mogelijke barrières.
3. Beschrijving van de specifieke situatie.
4. Inschatting van het risico dat de lekkage optreedt.
5. Een overzicht van beschikbare mitigerende maatregelen, monitoring en beheersmaatregelen.
6. Beschrijving van het resterende risico.

6.1.3 Gebruik van de risico-matrix per scenario

Voor ieder lekkagescenario wordt tijdens de laatste stap van de bow-tie methodiek het resterende risico vastgesteld. Dit resterende risico wordt weergegeven in de risicomatrix, waarbij de waarschijnlijkheid dat de lekkage optreedt, wordt afgezet tegen de gevolgen van de lekkage (zie Figuur 6.2). Op basis van dit resterende risico kan worden bepaald of CO₂-opslag verantwoord kan plaatsvinden. De matrix vormt zo een waardevolle methodiek om de aanwezige risico's te visualiseren.

Likelihood ->		A	B	C	D	E
Consequence ->	Containment function	Very low	Low	Medium	High	Very high
	1 Nil or negligible amount of CO ₂ migrates out of the reservoir.	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1
	2 Very small amount of CO ₂ migrates out of the reservoir but stays in the storage complex.	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2
	3 Small amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3
	4 Large amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4
	5 Very large amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and out of the storage complex.	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5

Risk level	Monitoring necessity	Risk reduction
 Low	Optional	Optional
 Medium	ALARP	ALARP
 High	YES	YES

Figuur 6.2. Risicomatrix zoals toegepast voor CO₂-opslag (TNO, 2019 rapporten) ¹⁴

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' van een reservoir betekent de beginsituatie zoals deze van nature voorkomt, in dit geval dus hier voor de gasproductie. De 'veiligheidsfactoren' zijn gebaseerd op de veranderingen veroorzaakt door het project. Indien besloten wordt het reservoir tot een lagere druk op te vullen dan in de oorspronkelijke druk, leidt dit er toe dat de afstand tot de omgevingsdruk toeneemt. Dit wordt aangeduid als een vergroting van de veiligheidsfactor.

¹⁴ ALARP bij het medium risico niveau staat voor 'as low as reasonable possible'

6.1.4 Toelichting Risico Matrix

Met betrekking tot de aanvaardbaarheid van risico's aangaande de ondergrondse opslag van CO₂ is het volgende van toepassing:

Mogelijke gevolgen

De mogelijke gevolgen worden getoetst afhankelijk van de mate waarin CO₂ uit het reservoir ontsnapt. Indien een zeer beperkte hoeveelheid 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: Binnen de natuurlijke variatie en niet meetbaar;
- Zeer klein: Meetbaar, en geen invloed op de biosfeer;
- Klein: Meetbaar en mogelijk kleine invloed op de biosfeer;
- Groot: Meetbaar met mogelijk invloed op de biosfeer;
- Zeer groot: Meetbaar met mogelijk nadelige invloed op de biosfeer.

Waarschijnlijkheid

De waarschijnlijkheid wordt beschreven volgens de onderstaande indeling:

- Zeer laag/verwaarloosbaar: aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit en hoge veiligheidsfactoren;
- Laag: geen aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit, maar wel hoge veiligheidsfactoren;
- Midden: aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit, maar geen hoge veiligheidsfactoren;
- Hoog: geen aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit en geen hoge veiligheidsfactoren;
- Zeer hoog: geen aantoonbaar bewijs voor initiële integriteit en kleine of geen veiligheidsfactoren.

Laag-risico scenario's

Deze scenario's hebben in zijn totaliteit een laag risico (groen – figuur 6.2). De risico's kunnen worden geaccepteerd, wanneer de lekkage 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 (oranje – figuur 6.2). Er zal monitoring dienen plaats te vinden op aanwezigheid van mogelijke oorzaken die kunnen leiden tot lekkage van CO₂ uit het reservoir en om zeker te stellen dat de barrières, die voorkomen dat lekkage optreedt, in tact zijn. Monitoring van het lekkagepad (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 (rood – figuur 6.2). Indien hoog-risico scenario's zijn geïdentificeerd, zal er door middel van studiewerk worden bekeken of het risico inderdaad hoog is of dat meer gedetailleerde informatie 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.

Randvoorwaarde resultaat risicoanalyse

Lekkage van CO₂ uit het reservoir is een ongewenste gebeurtenis. Alle risico's waardoor een dergelijke lekkage kan optreden, dienen voordat de injectie start minimaal 'laag' te zijn. Dit betekent dat de risico's op lekkage van CO₂ uit het reservoir in het groene gebied moeten zitten, voordat de injectie begint.

6.2 Lekkagescenario: Lekkage langs putwand

Binnen Porthos wordt er van uitgegaan dat de bestaande putten kunnen worden aangepast en hergebruikt voor CO₂-injectie. Technisch gezien is het goed mogelijk om voormalige gaswinputten in te zetten voor CO₂-injectie, waarbij vooral de kwaliteit van de materialen van belang is. De putten die niet gebruikt worden voor CO₂-injectie (of monitoring) worden op dezelfde wijze afgesloten als de injectieputten na afronding van de CO₂-injectiefase.

Beschrijving scenario

De putten in de P18-reservoirs vormen in potentie een directe verbinding tussen het reservoir waarin CO₂ is opgeslagen en de biosfeer. Migratie of lekkage zou kunnen optreden door de put, of langs de putwand. In dit lekkagescenario worden de mogelijke routes waarbij CO₂ door de put of langs de put migreert of lekt onderzocht. Daarbij wordt gekeken naar de huidige operationele putten, maar tevens naar de eerder afgesloten putten, aangezien die ook als een verbinding tussen het reservoir en de biosfeer kunnen fungeren.

In het scenario is onderscheid gemaakt tussen lekkage door de put en langs de putwand:

- Lekkage door de put is bekeken voor de situatie na afronding van de CO₂-injectie en afsluiting van de putten. Tijdens de CO₂-injectiefase zou lekkage kunnen optreden in de vorm van een blow out. Daarbij komt mogelijk een grote hoeveelheid CO₂ in de buitenlucht. Het scenario is apart beschreven als onderdeel van mogelijke incidenten met gevolgen in de biosfeer (zie het Samenvattend Hoofdrapport);
- Lekkage langs de put is in dit lekkagescenario bekeken voor de situatie tijdens CO₂-injectie en na afsluiting.

Barrières tegen lekkage

In potentie kan lekkage van CO₂ vanuit het reservoir door de put of langs de putwand plaatsvinden. Barrières worden standaard aangebracht om dit te voorkomen.

Omdat de putten een directe verbinding vormen tussen het reservoir en maaiveld (in het geval van een offshore reservoir is dit de zeebodem of een platform), is het belangrijk dat de putten in een goede staat verkeren. In het bijzonder geldt dit voor de kwaliteit van de materialen ter hoogte van de afdekkende gesteentelagen boven het reservoir. Wanneer de kwaliteit van deze materialen goed is, vormt de cementering tussen de buitenkant van de put en het gesteente een ondoordringbare barrière voor CO₂, zodat CO₂ niet langs de putwand omhoog kan migreren.

Maatregelen bij gereedmaken van de putten voor CO₂-injectie

Om de put geschikt te maken voor CO₂ injectie, wordt de put voordat de injectie start aangepast. Op grond van de huidige inzichten worden daarbij de volgende stappen doorlopen:

- Verificatie van het cement tussen de buitenwand van de casing/liner en het gesteente van het boorgat. Voor de verificatie van de cement kan gebruik gemaakt worden van druktesten en inspectie bijvoorbeeld met ultrasone geluidsapparatuur
- Indien nodig wordt een cementreparatie uitgevoerd aan de buitenkant van de put. Dit gebeurt door middel van perforaties van de casing/liner en een cement squeeze injectie of door het wegfresen van

een stuk casing, cement en formatie en het zetten van een afdichting waarachter gecementeerd kan worden met voor CO₂ geschikt cement.

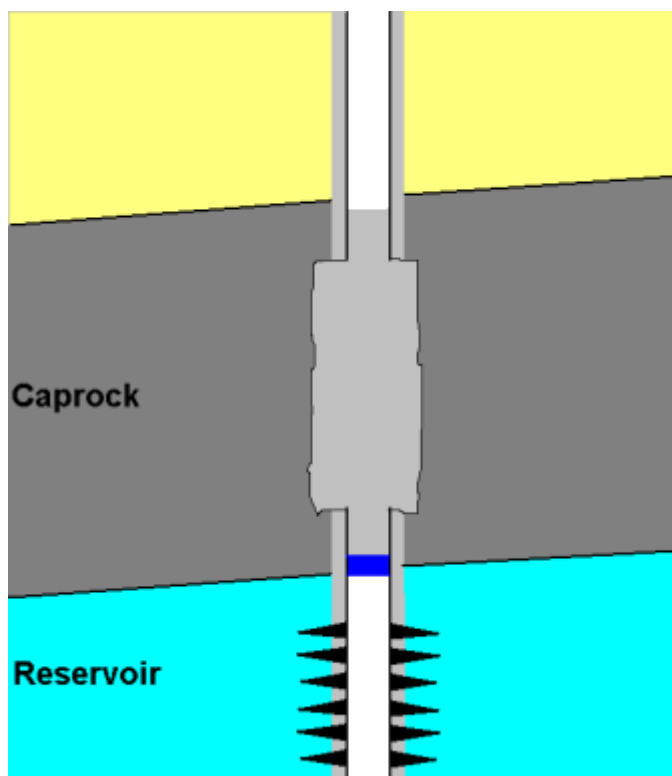
- Tegelijk met de verificatie van het cement wordt ook de wanddikte van de casing/liner gemeten. Eventueel worden herstelwerkzaamheden in geval van ontoelaatbare wanddikte afname uitgevoerd.
- Er wordt een nieuwe tubing en putafwerking aangebracht.

Afsluiten van de putten

Alle putten in de reservoirs dienen veilig afgesloten te worden. Dit geldt zowel voor de gebruikte injectieputten bij het beëindigen van de CO₂-injectie, als de overige putten die in contact staan met het opgeslagen CO₂. Voor de veilige afsluiting van de putten zijn protocollen beschikbaar die gevolgd dienen te worden.

Bij afsluiting worden secties aan de binnenkant van de put opgevuld met een cementprop. Dit voorkomt dat CO₂ via de binnenkant van de put omhoog kan migreren. Een dergelijke cementprop wordt een 'plug' genoemd en is een standaard maatregel binnen de olie- en gassector wanneer putten buiten gebruik worden gesteld.

Ter hoogte van de afdekkende laag wordt een pannenkoekplug ('fullbore formation plug') (zie figuur 6.3) of een equivalente afsluiting worden aangebracht. Dit is een minstens 50 meter dikke cementlaag die in de afdekkende laag wordt aangebracht, zodanig dat dit direct aansluit op de afdekkende laag. Daartoe wordt op deze diepte de buis van de put verwijderd door middel van wegfresen.



Figuur 6.3. Principe van de pannenkoekplug (fullbore formation plug), met in blauw een mechanische plug als basis¹⁵

¹⁵ (bron: Detailed workover & abandonment Design TAQA CCS P18-4A2 Version: final v2 Publication date: January 18th, 2011 Prepared by: ir. E. H. van Heekeren (WEP))

Beschrijving van bedreigingen

Wanneer de kwaliteit van de putten of de putafsluiting niet voldoende is, ontstaat er een risico op lekkage via of langs de put. Er zijn diverse bedreigingen die een rol kunnen spelen en de kwaliteit van de materialen van de put nadelig kunnen beïnvloeden. Dit omvat mechanische, chemische of thermische processen en effecten, die zich op verschillende tijdschalen kunnen afspelen. Chemische bedreigingen zijn op zowel de korte termijn (dagen tot maanden) als de lange termijn (geologische tijdschaal) van toepassing. Mechanische en thermische bedreigingen spelen vooral een rol tijdens de injectiefase, een periode die voor het Porthos-project circa 15 jaar duurt.

Chemische bedreigingen

Onder voorwaarde dat er vrij (poriën) water aanwezig is, lost CO₂ op en kunnen de producten van deze oplosreactie reageren met mineralen in het reservoirgesteente (zoals carbonaten, evaporieten), maar ook met de materialen van de put. Het cement van de put kan chemisch verweren, en het staal kan gaan corroderen. Sommige chemische processen zijn zeer traag, waardoor chemische bedreigingen op de langere termijn, de geologische tijdschaal, ook relevant zijn.

Mechanische bedreigingen

Drukverschillen als gevolg van injectie kunnen van invloed zijn op de kwaliteit, en daarmee integriteit, van de gebruikte materialen in de put. Dit geldt voornamelijk voor de injectiefase, waarin de druk in het reservoir toeneemt van circa 20 bar tot circa 350 bar. Tijdens verhoging van de druk kunnen de materialen van de put beschadigd raken door bijvoorbeeld micro-scheurtjes in de cementmantel. Na beëindiging van de injectiefase is er een stabiele, hydrostatische druk in de put en zullen geen nieuwe mechanische bedreigingen optreden.

Thermische bedreigingen

De temperatuur in de P18-reservoirs is circa 127 °C. Tijdens de injectiefase wordt CO₂ geïnjecteerd met een veel lagere temperatuur waardoor een lokale temperatuurverlaging ontstaat in de put en daar waar CO₂ het reservoir instroomt. Het temperatuurverschil tussen het koude CO₂ in de injectieput en het warme omringende gesteente kan van invloed zijn op het materiaal van de put, vanwege (ongelijkmatig) uitzetten en krimpen van de materialen en/of schade door bevriezing van water in de poriën van het cement. Wanneer de injectie van CO₂ wordt beëindigd, komt de temperatuur weer langzaam terug in evenwicht met de temperatuur van het omliggende gesteente (127 °C) en verdwijnt het risico van het genoemde temperatuurverschil. Echter de ontstane veranderingen zullen blijven bestaan.

Ontstaan van micro-annuli langs de putwand

Krimp van de put, door het transport van koude CO₂ in de injectieput, kan leiden tot hele kleine scheurtjes in de cementlaag tussen de put en het gesteente. Deze scheurtjes, aangeduid als micro-annuli, kunnen indien ze onderling verbonden zijn, een route vormen waar CO₂ langs de put omhoog kan migreren. Ter plaatse van de injectieput moet daarom rekening gehouden worden met het ontstaan van deze zogenaamde micro-annuli. Hiervoor zijn mitigerende maatregelen nodig, zoals verderop beschreven.

Temperatuurdaling door expansie CO₂ in het reservoir

Naast het directe temperatuurverschil, tussen de geïnjecteerde CO₂ en de temperatuur in en rondom het uitstroompunt van de put, is ook het drukverval bij het injectiepunt van belang. Dit geldt vooral aan het begin van de injectiefase, wanneer de druk in het reservoir laag is. Wanneer hoge druk CO₂ onderin de put het lage druk reservoir instroomt, expandeert het CO₂ wat resulteert in een temperatuurdaling (tot zelfs onder de nul graden) onafhankelijk van de temperatuur van het geïnjecteerde gas. Dit kan resulteren in de bevriezing van poriën water, aangezien dat onder lage drukken eerder kan bevriezen, wat weer kan leiden tot een mechanische bedreiging.

Beschrijving van consequenties

Bij lekkage aan de binnenkant van de putverbuizing kan CO₂ ontsnappen naar de atmosfeer. Bij migratie aan de buitenkant van de verbuizing komt CO₂ in eerste instantie in de hogere gesteentelagen terecht.

Migratie

Bij migratie van CO₂ via de buitenkant van de verbuizing komt CO₂ in het 500 m dikke pakket Onder Jura schalies terecht. Deze zijn enigszins plastisch en zullen dus de eventuele aanwezige open ruimtes bij de verbuizing dichtdrukken. Dit verkleint de kans dat CO₂ in de bovenliggende zanden van de Boven Jura en Onder Krijt terecht komt.

Lekkage

Indien CO₂ wel in de Boven Jura-Onder Krijt zanden terecht komt, wordt dit gezien als lekkage. Dit is als hypothetisch scenario onderzocht binnen het CATO-2 programma. Indien CO₂ in voldoende grote hoeveelheden in de Boven Jura-Onder Krijt zanden terecht komt, kan er een secundaire CO₂-opeenhopingen ontstaan. Door de goede afsluitende toplaag van deze zanden zullen deze secundaire opeenhopingen een permanent karakter hebben. Ook eventuele verdere migratie paden in hogere zandpakketten zijn onderzocht binnen deze CATO-2 studie. De kans dat de CO₂ uiteindelijk de zeebodem bereikt, zal ook op de een termijn van tienduizenden jaren nihil zijn.

Lange termijn integriteit

Op de lange termijn (geologische tijdschaal) is de integriteit van de putten belangrijk. Het is immers de bedoeling dat de opgeslagen CO₂ permanent blijft opgeslagen. Zoals eerder in deze paragraaf al is beschreven, kunnen verschillende processen een bedreiging vormen voor de (lange termijn) integriteit van de put. Dit zijn mechanische, chemische en thermische processen. Een gevolg hiervan is dat mogelijke aantasting van de putmaterialen zich op verschillende tijdschalen kan afspelen.

Mechanische en thermische effecten vormen uitsluitend in de injectiefase een aandachtspunt. Chemische processen kunnen zich ook op de lange termijn kunnen afspelen. De lange termijn integriteit van de P18 putten is onderzocht. Hieruit blijkt dat chemische verwerking van de cementering en de cement-plug beperkt optreedt. Laboratorium experimenten, waarbij de omstandigheden ideaal zijn voor verwerking van cement, tonen aan dat de verwerking, langs de put omhoog, in de orde van meters is over een periode van 10.000 jaar. Zelfs bij extreem hoge temperaturen is de maximale verwerking beperkt, met circa 12,4 meter in een periode van 10.000 jaar. In de praktijk zijn de omstandigheden verre van ideaal, doordat bijvoorbeeld water niet vrij beschikbaar is. Dit is belangrijk, want zonder water treedt geen chemische verwerking op. Bovendien is het zo dat door de injectie van CO₂, het aanwezige water als het ware 'weggeduwd' wordt door het CO₂-front dat uit de put stroomt. Vooral in de omgeving van de put zullen de omstandigheden dan ook relatief droog zijn.

Wel kan zogenaamd gebonden (connaat) water aanwezig zijn, dat ingesloten is tussen de poriën van het gesteente. Anderzijds is de hoeveelheid van dit gebonden water in de P18-reservoirs zeer gering en de reactiviteit van dit water laag door het hoge zoutgehalte en hoge gehalten aan magnesium en calcium. Ook is het reactieoppervlak in de ondergrond veel kleiner dan in de laboratorium experimenten (in deze experimenten werd het cement compleet ondergedompeld in een bad met superkritisch CO₂), omdat een groot deel van het cement aan gesteente grenst in plaats van aan water met opgelost CO₂. In werkelijkheid liggen de verwerkingssnelheden van cement dan ook veel lager dan de resultaten van de laboratorium experimenten doen vermoeden.

Cementpluggen moeten volgens de Mijnbouwwet, afhankelijk van de situatie, minimaal 50 tot 100 meter dik zijn, waarbij in sommige gevallen meerdere cement pluggen in een put worden aangebracht. Dus ongeacht het potentiële bereik van het verweringsfront en de aanwezigheid van connaat water, is het effect van chemische verwerking op de integriteit van een put laag door de dikte van de cementpluggen. Corrosie van het staal van de putten is in theorie een sneller proces dan chemische verwerking van het cement, namelijk rond de enkele mm's per jaar. Echter, in de praktijk wordt corrosie van de stalen verbuizing sterk geremd door de beperkte aanwezigheid van water rondom de put. Een gedetailleerde beschrijving over dit onderwerp is beschreven door het International Energy Agency (IEA, 2009). Corrosie van de stalen verbuizing is normaal gesproken geen probleem bij putten in de gasvelden op de Noordzee.

Beschrijving van de specifieke situatie bij de putten P18-velden

Om de waarschijnlijkheid van CO₂-lekkage via de putten in te kunnen schatten, wordt eerst een beeld geschetst van de huidige status van de putten in P18. De huidige status geeft de initiële integriteit van de put weer. Vervolgens wordt een beschouwing gegeven van de lange termijn integriteit van de putten in P18.

Huidige status putten P18

In het kader van het CATO2 onderzoeksprogramma en door TNO in de onderzoeksrapporten voor P18-2 en P18-6 is de huidige toestand en status van putten in de P18-reservoirs in kaart gebracht en beschreven in:

- Geschiedenis en Beschrijving van de P18 velden, PanTerra (2011).
- CO₂ storage feasibility in the P18-2 depleted gas field, TNO 2019 R11635, TNO. (2019).
- CO₂ storage feasibility in the P18-6 depleted gas field, TNO 2019 R11212, TNO. (2019).

De putten in de P18-reservoirs hebben goed en zonder problemen gefunctioneerd tijdens de gasproductie. Het is daarom waarschijnlijk dat deze putten ook goed zullen functioneren bij de CO₂-injectie. In de studies zijn aanbevelingen gedaan om de putten geschikt te maken voor CO₂-injectie. De conclusie is dat alle putten in de P18-reservoirs in principe geschikt gemaakt kunnen worden voor CO₂-injectie.

Onderstaand wordt dit specifiek per reservoir beschreven. De praktische uitwerking zal naderhand in het kader van de opslagvergunning plaatsvinden.

6.2.1 Bevindingen putten P18-2

In het P18-2 reservoir bevinden zich 5 putten, waarvan één put is afgesloten en één put een zogenaamde moederput heeft met een side track.

Tabel 6.1. Productieputten in het P18-2 reservoir

Reservoir; compartiment	Aanwezige putten	Jaar geboord	Status	Opmerkingen
P18-02; compartiment I	P18-02	1989	Gedeeltelijk verlaten	Ontdekking P18-2 reservoir
	P18-2A1	1990	productie	oude naam put P18-03
	P18-2A3	1993	productie	Formeel aangeduid als P18-2A3ST2
	P18-2A5	1996-1997	productie	Formeel aangeduid als P18-2A5ST1
P18-02; compartiment II	P18-2A6-S1	2003	productie	Zijtak van P18-2A6
P18-02; compartiment III	P18-2A6	1997	productie	

Toets op gedeeltelijk verlaten put (gesuspendeerd) – P18-02

In de P18-reservoirs is één gedeeltelijk verlaten put aanwezig, P18-02. Hoewel de huidige afsluiting voldoende is voor het afsluiten van een (lage druk) leeggeproduceerd gasveld, wordt de afsluiting als onvoldoende ingeschat voor hogedruk CO₂-injectie. Deze put is gedeeltelijk verlaten en daarom nog wel toegankelijk. In het geval van CO₂-injectie in reservoir P18-2, dient deze put te worden verlaten (geabandonneerd) met behulp van een pannenkoekplug of vergelijkbare afsluiting ter hoogte van een afsluitende laag (caprock).

Toets op de drie putten in compartiment I

Er zijn drie putten in compartiment I van het P18-2 reservoir. Bij het aanpassen van de put van gaswinput naar CO₂-injectieput wordt naast de standaard maatregelen (waaronder installatie van een nieuwe opvoerserie (completion)) specifiek rekening gehouden met het volgende:

- P18-2A-01
Plaatsing van een production packer wordt geoptimaliseerd aan de hand van nieuwe putmetingen van de cementatie (Cement Bond Log).
- P18-2A-03/-S1/-S2 (Compartiment I)
Geen bijzonderheden.
- P18-2A-05/-S1 (Compartiment I)
De oorzaak van de druk in de A-annulus zal onderzocht worden en gerepareerd.

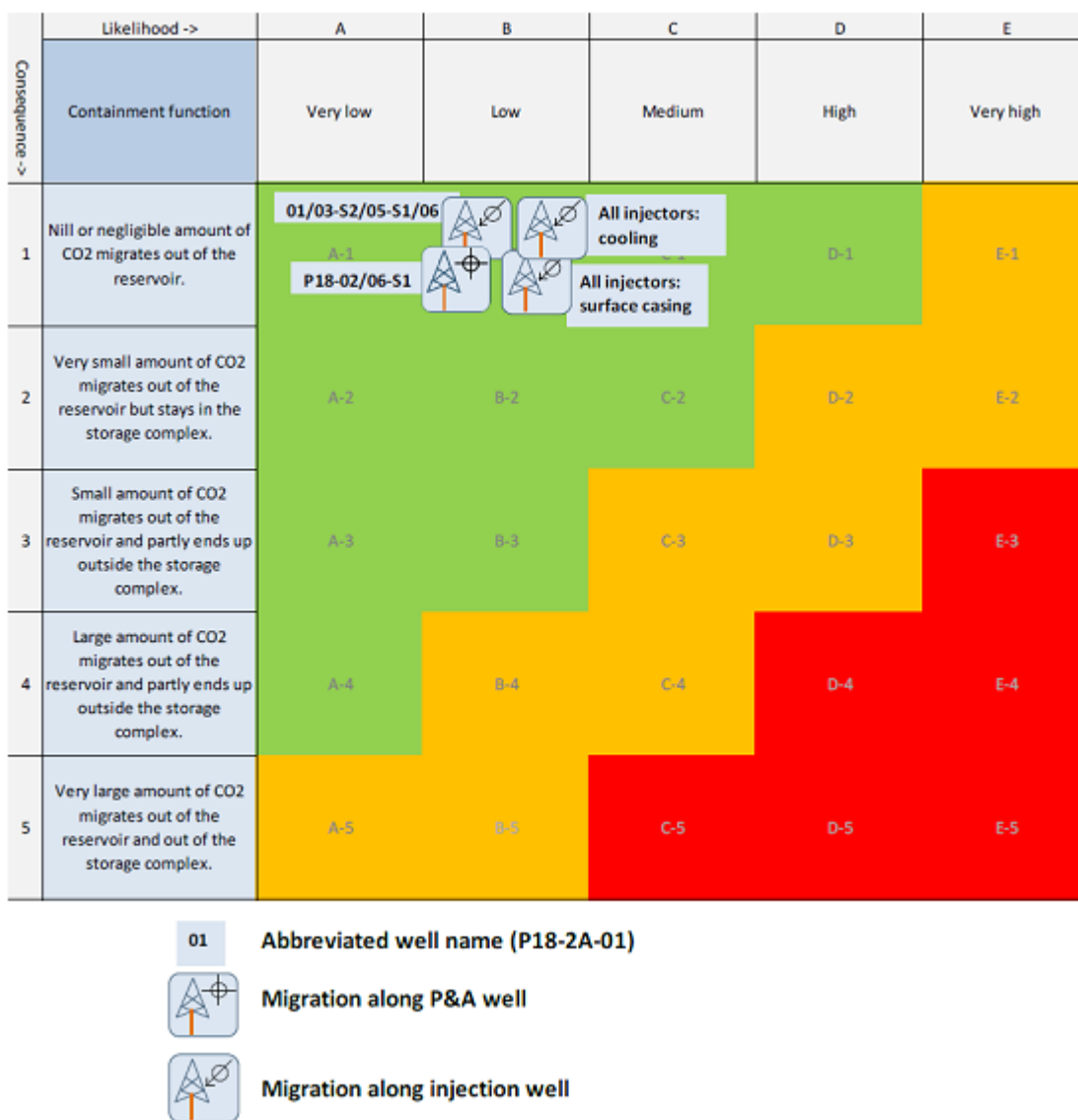
Toets op put in compartimenten II en III

Er is één put met de moedertak in compartiment II en een zijtak in compartiment III. De sidetrack P18-2A6S1 kan verlaten worden en het sidetrack window hersteld. De moederput P18-2A6 zal zodanig aangepast worden dat deze geschikt is voor CO₂-injectie. Dit resulteert in een verwaarloosbaar risico op lekkage langs de put.

Risico-inschatting

Als gevolg van de onzekerheden zal getracht worden de kwaliteit van de cementatie van de putten te controleren en waar mogelijk te verbeteren. In de praktijk kan het echter voorkomen dat niet met zekerheid te zeggen is of pogingen om de cementatie te verbeteren succesvol zijn verlopen.

Op de lange termijn kan de integriteit van de putten voldoende worden gewaarborgd, zodat de veiligheid niet nadelig wordt beïnvloed. Dit betekent dat de risico's van lekkage van CO₂ via de putten klein zijn en vooral aanwezig zijn tijdens de injectiefase van circa 15 jaar. Wel is het belangrijk dat de werkzaamheden bij de aanpassing of abandonnering van de putten zorgvuldig worden voorbereid en uitgevoerd.



Figuur 6.4. Risico-matrix voor de putten in P18-2

De risico-matrix geeft aan dat voor alle putten van P18-2 de waarschijnlijkheid van een lekkage als laag wordt beschouwd (mede door de mitigerende maatregelen die hieronder zijn beschreven). In het geval dat de lekkage zich toch voordoet, zal de hoeveel CO₂ dat weglekt verwaarloosbaar zijn.

6.2.2 Bevindingen put P18-4

In het P18-4 reservoir komt één put voor. Uit de CATO₂-studie (2010) naar de putintegriteit, de geschiktheid van de put en simulaties naar stroom en thermodynamisch gedrag tijdens CO₂-injectie is naar voren gekomen dat een aanpassing aan de put nodig is om P18-4A2 geschikt te maken voor CO₂ injectie. De bevindingen uit deze studie zijn nog steeds geldig. In het kader van het Porthos project is hier geen aanvullende studie naar gedaan door TNO, waardoor de risico evaluatie gebaseerd is op de eerdere bevindingen zoals gerapporteerd bij CCS ROAD.

Bij het aanpassen van de put van gaswinput naar CO₂-injectieput wordt naast de standaard maatregelen (waaronder installatie van een nieuwe opvoerserie (completion)) specifiek rekening gehouden met het volgende:

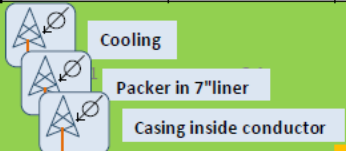
- De packer kan dicht bij de perforaties gezet worden, hierdoor wordt de blootstelling aan het CO₂ van de 7" koolstof verbuizing (liner) onder in de put geminimaliseerd.

6.2.3 Bevindingen put P18-6

In het P18-6 reservoir komt alleen put P18-6A7 voor. Deze is in detail onderzocht. Bij het aanpassen van de put van gaswinput naar CO₂-injectieput wordt naast de standaard maatregelen (waaronder installatie van een nieuwe opvoerserie (completion)) specifiek rekening gehouden met het volgende:

- De productie packer is geplaatst in de 7" verbuizing boven de afsluitende laag. Hierdoor is een kort stuk van de koolstofstalen verbuizing (7" liner) dat de eerste barrière naar de overburden vormt, blootgesteld aan vloeistoffen in de put met een risico van corrosie en een lek naar de overburden. De packer diepte kan veranderd worden om zo tot een geoptimaliseerde plaatsing te komen. Zo kan de packer dieper worden gezet of kan er een verbinding gemaakt worden met de 5" liner om de blootstelling van de 7" koolstof stalen verbuizingen aan het CO₂ te beperken of kan de packer op een andere diepte geplaatst worden waar de cement bond log aangeeft dat er een goede cementatie is.

Voor de put in reservoir P18-6 wordt het risico van lekkage, na het aanpassen van de put, als laag ingedeeld, met een verwaarloosbare hoeveelheid CO₂ dat het opslagvoorkomen kan verlaten.

Likelihood ->		A	B	C	D	E	
Consequence ->	Containment function	Very low	Low	Medium	High	Very high	
	1 Nil or negligible amount of CO2 migrates out of the reservoir.	A-1				D-1	E-1
	2 Very small amount of CO2 migrates out of the reservoir but stays in the storage complex.	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2	
	3 Small amount of CO2 migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3	
	4 Large amount of CO2 migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4	
	5 Very large amount of CO2 migrates out of the reservoir and out of the storage complex.	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5	



Migration along injection well



Migration along injection well

Figuur 6.5. Risico-matrix P18-6 put

De risico-matrix geeft aan dat voor drie onderzochte lekkagepaden geldt dat de put van P18-6 de waarschijnlijkheid van een lekkage als laag wordt beschouwd (mede door de mitigerende maatregelen die hieronder zijn beschreven). In het geval dat de lekkage zich toch voordoet, zal de hoeveel CO₂ dat weglekt verwaarloosbaar zijn.

6.2.4 Mitigerende maatregelen

In het verlengde van de risicoanalyse zijn er mitigerende maatregelen vastgesteld, die er voor zorgen dat het risico van lekkage via/langs de put zoveel mogelijk wordt beperkt.

Maatregelen in de aanlegfase

De putten worden zodanig aangepast voor CO₂-injectie om het risico op lekkage te beperken volgens de huidige inzichten, zodat het CO₂ permanent opgeslagen zal blijven in het reservoir. Dit vergt aanvullend onderzoek aan een sommige putten en vervolgens aanpassing van de putten dat hierboven is benoemd:

- Opvoerserie uitwisselen;
- Meting kwaliteit cement aan de buitenkant van de put en indien nodig een cementreparatie;
- Verificatie wanddikte van de productie casing/liner en herstelwerkzaamheden in geval van ontoelaatbare afname wanddikte.

Maatregelen in de gebruiksfase

Tijdens de gebruiksfase worden de volgende beheermaatregelen toegepast:

- Monitoring in de putten om vast te stellen dat de CO₂-injectie verloopt zoals verwacht. Indien de meetwaarden afwijken, kan volgens een reactieplan worden bepaald welke ingreep nodig is.
- Vooral tijdens de eerste periode van injectie, waarbij de druk in het reservoir relatief laag is, zal de CO₂-injectie zodanig worden gecontroleerd dat er geen hydraatvorming ten gevolge van temperatuurdaling zal optreden in het reservoir;
- De reservoirs zullen niet gevuld worden tot een druk boven de hydrostatische druk. Hierdoor zal de druk in en nabij de put slechts een korte periode tijdens het injecteren boven de hydrostatische druk uitkomen. Hierdoor is de druk in de caprock en de overburden hoger dan de druk in de reservoirs en kan het CO₂ niet uit de reservoirs migreren.

Maatregelen in de afsluitfase

Er zijn twee mitigerende maatregelen die er voor zorgen dat het risico van lekkage via/langs de put zoveel mogelijk wordt beperkt. Beide maatregelen zijn onderdeel van de operationele planning en ontwerp:

- Bij afsluiting wordt een pannenkoekplug of equivalente afsluiting gezet, ter hoogte van de afdekkende laag;
- In de putten worden verder conventioneel pluggen geplaatst.

Daarnaast zal tijdens en na de afsluitfase de druk in de reservoirs niet hoger zijn de hydrostatische druk. Hierdoor is de druk in de caprock en de overburden hoger dan de druk in de reservoirs en kan het CO₂ niet uit de reservoirs migreren.

Monitoring

Naast een zorgvuldige afsluiting van de putten is monitoring ook van belang. Hiervoor wordt een uitgebreid monitoringsplan opgezet. In hoofdstuk 7 is een opzet van het monitoringsplan opgenomen.

6.3 Lekkagescenario: lekkage door de afsluitende bovenlaag

Beschrijving scenario

Lekkagepaden door de afsluitende bovenlaag zijn onderzocht, waarbij gekeken is naar de mogelijkheid dat CO₂ via scheurtjes (thermo fracking) in de bovenlaag komt, via aanwezige breuken kan migreren of middels diffusie migreert naar bovenliggende lagen.

In principe is de gesteentelaag direct boven het reservoir gesteente een afsluitende bovenlaag, caprock, die, in combinatie met de overburden, een barrière vormt die het aardgas miljoenen jaren heeft afgesloten van bovengelegen lagen en biosfeer. De initiële integriteit van de caprock is dan ook goed, maar door de injectie van CO₂ zou de integriteit van de caprock aangetast kunnen worden. Dit zou kunnen resulteren in een verbinding tussen het reservoir en overgelegen lagen of de biosfeer. In dit lekkage scenario worden de mogelijke routes waarbij CO₂ door de afsluitende bovenlaag migreert of lekt onderzocht.

Lekkage van CO₂ door de caprock is onderzocht binnen het CATO2 programma, en bevestigd in de TNO-studies (Bijlage 2 en 3). In de CATO2 studie is een worst-case scenario onderzocht, waarbij onredelijk grote hoeveelheden CO₂ zijn 'vrijgelaten' bij de caprock. In werkelijkheid zal dit nooit kunnen gebeuren, maar om een idee te krijgen van de lekkageroutes en welke mechanismen een rol spelen bij het invangen van migrerend CO₂, is toch een modelsimulatie uitgevoerd. Hieruit blijkt dat, in geval van lekkage door de

caprock (via geïnduceerde breuken), CO₂ hypothetisch kan worden ingevangen in de Rijn/Rijswijk zandsteen aquifer.

Op basis van het onderzoek dat is gedaan naar mogelijk lekkage door de afsluitende bovenlaag worden er twee routes beschouwd:

- Door nieuwe/oude breukzones die tijdens of na de injectie van CO₂ ontstaan/geactiveerd in de afsluitende bovenlaag, waardoor grote hoeveelheden CO₂ kunnen 'ontsnappen'. Dit wordt in het volgende lekkagescenario nader besproken;
- Langzame sijpelen van kleine hoeveelheden CO₂ over langere tijd door de afsluitende bovenlaag (bijvoorbeeld door diffusie processen).

Hieronder worden als eerste de bedreigingen en consequenties van het scenario beschreven. Daarna wordt de waarschijnlijkheid van het scenario bepaald. Op basis hiervan wordt een risico-inschatting gedaan. Aan de hand van de verschillende mitigerende maatregelen en monitoring wordt vervolgens een inschatting gemaakt van het uiteindelijke risico.

Beschrijving van bedreigingen en consequenties

Tijdens de injectie van CO₂ treden mechanische, chemische en thermische veranderingen op. De meest relevante aspecten worden hieronder toegelicht.

Mechanische bedreigingen

De winning van aardgas uit de P18-reservoirs heeft ervoor gezorgd dat de druk in de reservoirs is gezakt van circa 350 bar naar 20 bar, met uitzondering van het P18-6-reservoir waar de einddruk circa 50 bar bedraagt. Bij het opvullen van het reservoir met CO₂ zal de druk langzaam stijgen, totdat de druk in het reservoir de hydrostatische druk heeft bereikt. De drukveranderingen die hiermee gepaard gaan, kunnen van invloed zijn op de integriteit van de afsluitende bovenlaag. Door te hoge injectiedebieten, plotselinge faseveranderingen, dichtheidsveranderingen of heterogeniteit in het reservoir gesteente kunnen lokaal hogere drukken ontstaan. Een tweede mechanische bedreiging kan ontstaan door de gekozen einddruk wanneer de injectie van CO₂ wordt gestopt en het reservoir vol is.

Chemische bedreigingen

Door het licht reactieve karakter van CO₂ zijn er ook chemische bedreigingen waar rekening mee gehouden moeten worden. Wanneer CO₂ oplost in het poriën water dat aanwezig is in het reservoirgesteente of de afsluitende bovenlaag, kunnen geochemische reacties optreden. Dergelijke reacties kunnen een bedreiging vormen voor de integriteit van de afsluitende bovenlaag, doordat bijvoorbeeld de doorlatendheid van de afsluitende bovenlaag wordt vergroot.

Thermische bedreigingen

De injectie van koude CO₂ brengt ook twee thermische bedreigingen met zich mee. Ten eerste de temperatuur in de P18-reservoirs is circa 127°C. Afhankelijk van de temperatuur van de CO₂ die wordt geïnjecteerd (~15°C), kan het temperatuurverschil tot ~110°C op lopen, wat van invloed zijn op de integriteit van het overliggende gesteente, aangezien die bij krimp in reactie op koude kan leiden tot micro-breukjes.

Consequenties

De potentiële consequentie van de beschreven mechanische, chemische en thermische bedreigingen is dat CO₂ uit het reservoir door de afsluitende bovenlaag migreert en in bovenliggende lagen terecht komt. Hier kan het via bepaalde lekkagepaden vervolgens in andere bovenliggende lagen terecht komen. Een andere mogelijkheid is dat de CO₂ wordt ingevangen in bovenliggende lagen, omdat het oplost in het water dat deze lagen bevat.

Waarschijnlijkheid

Mechanische bedreigingen

Het mechanische gedrag van de caprock onder invloed van drukveranderingen is onderzocht voor het onderste gedeelte, direct bovenop het reservoir (zie bijlage 1, hoofdstuk 6). Belangrijk daarbij is na te gaan of er scheurtjes en scheuren kunnen ontstaan door drukveranderingen die plaatsvinden in het reservoir.

Het onderste gedeelte van de deklaag bestaat uit 41 tot 68 m (gemiddeld 50 m) anhydritische kleisteen (=schalies) en dunne dolomiet laagjes. Testen op gesteentemonsters laten zien dat de mechanische effecten op deze kleisteen gering zijn indien de drukken bij de injectieput in het reservoir (de zogenaamde bottom hole pressure) binnen de gestelde limieten blijven.

Het onderzoek concludeert dat alleen al de onderzochte, ongeveer 50 m dikke laag boven het reservoir, voldoende is om de CO₂ af te sluiten. Daarbij komt dat de totale dikte van het afsluitende laagpakket aanzienlijk groter is dan de laag die onderzocht is: namelijk in totaal tussen de 550 en 780 m. Dus zelfs bij een overschrijding van de druklimieten bij CO₂ injectie en hoge temperatuurverschillen zullen de afsluitende eigenschappen van het totale laagpakket van 550 tot 780 m dik niet in gevaar komen.

Chemische bedreigingen

Zoals beschreven in hoofdstuk 5.3.4 hebben chemische reacties in het gesteente van de afsluitende bovenlaag een lichte invloed op de porositeit, en permeabiliteit, van het gesteente. Echter een lichte toename van de porositeit vormt geen gevaar voor de integriteit van de afsluitende bovenlaag.

Daarnaast is een studie gedaan naar het gedrag van natuurlijk voorkomend CO₂ in en de integriteit van het afsluitende gesteente bovenop het Werkendam gasveld (De Bruin, 2008). Het gas in het Werkendam gasveld bestaat voor 80% uit CO₂.

Op basis van de huidige situatie kan worden geconcludeerd dat de afsluitlaag van dit gasveld perfect werkt. Dit bevestigt dat de kans op lekkage op de geologische tijdschaal door de afsluitende bovenlaag nihil is. Ook kan worden geconcludeerd dat de kans op geochemische veranderingen in de deklaag en als gevolg daarvan het slijpen van CO₂ door de deklaag verwaarloosbaar klein is.

De invloed van een zuurstof verontreiniging in de geïnjecteerde CO₂ is tevens onderzocht. Hieruit blijkt dat, zelfs op de lange termijn, effecten van verhoogde zuurstof concentratie geen significant effect hebben op de porositeit van het gesteente. Wel wordt de hoeveelheid pyriet die oplost en de hoeveelheid anhydriet die neerslaat licht verhoogd. Netto zou dit een verwaarloosbaar effect hebben op de integriteit van de caprock.

Voor het MER Barendrecht is uitgezocht wat het effect van resterend aardgas op lange termijn opslag van CO₂ in het reservoir is. De resultaten laten zien dat dit voor een mogelijke drukverhoging op de lange termijn kan zorgen. Als gevolg van volledige vermenging van het restgas en CO₂ door diffusie wordt een uiteindelijke drukverhoging van circa 7 bar na honderdduizenden of miljoenen jaren verwacht.

Een dergelijke drukverhoging speelt vooral een rol bij CO₂-injectie nabij de kritische druk voor CO₂ in relatief ondiep gelegen gasreservoirs (circa 800 meter diepte). Dit effect vermindert naarmate de diepte toeneemt. Bij diep gelegen reservoirs, zoals de P18-reservoirs, speelt dit effect naar verwachting geen rol meer.

Thermische bedreigingen

Als laatste zijn de effecten van temperatuur op de integriteit van de caprock onderzocht. Kleine scheurtjes zouden kunnen ontstaan wanneer het temperatuurverschil tussen het reservoir gesteente en de geïnjecteerde CO₂ meer dan 50° C is, maar ook door de gecombineerde effecten van temperatuur en druk in de laatste stadia van het vullen (als het reservoir bijna vol is). Binnen de gestelde limieten zullen geen scheurtjes ontstaan.

Risico-inschatting

Figuur 6.5 geeft het resultaat van de risicoanalyse voor het P18-2 reservoirs weer. De bevindingen voor P18-4 en P18-6 zijn vergelijkbaar. Het risico op lekkage via de afsluitende bovenlaag van het reservoir kan ontstaan door mechanische, chemische en thermische bedreigingen. Uit de onderzoeken die specifiek voor P18 zijn uitgevoerd blijkt dat:

- De onderste 50 meter van de afsluitende bovenlaag al voldoende bescherming biedt tegen lekkage door de afsluitende bovenlaag. In de praktijk is deze laag honderden meters dik en bovendien zijn er nog andere afsluitende lagen, gelegen boven de afsluitende bovenlaag, aanwezig. Het risico op lekkage door de afsluitende bovenlaag is daarom verwaarloosbaar;
- Het risico op lekkage van CO₂ door de afsluitende bovenlaag onder normale omstandigheden verwaarloosbaar klein is;
- Verontreiniging met hoge concentratie zuurstof geen significant effect heeft op de integriteit van de afsluitende bovenlaag, en als gevolg het risico op lekkage verwaarloosbaar is.

Likelihood ->		A	B	C	D	E
Consequence ->	Containment function	Very low	Low	Medium	High	Very high
	1 Nil or negligible amount of CO ₂ migrates out of the reservoir.	 Initial condition  Fracturing Chemical degradation				
	2 Very small amount of CO ₂ migrates out of the reservoir but stays in the storage complex.	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2
	3 Small amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3
	4 Large amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4
	5 Very large amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and out of the storage complex.	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5

 Migration through the caprock

Figuur 6.6. Risico-matrix voor P18-2 door afsluitende laag

Op basis van de risico-inschatting blijkt dat het risico dat CO₂ via de afsluitende bovenlaag uit het reservoir migreert verwaarloosbaar klein is. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de einddruk niet boven de initiële druk uitkomt, maar maximaal tot de hydrostatische druk komt.

Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan

Het risico dat CO₂ uit het reservoir migreert via de afsluitende bovenlaag is verwaarloosbaar klein. Toch is het zeer belangrijk dat tijdens en na de injectie van CO₂ de omstandigheden geheel onder controle zijn. Een op maat gemaakt risicobeheersplan en monitoringsplan zijn daarom essentiële onderdelen. Verder is het belangrijk dat de einddruk na injectie lager is dan de initiële reservoirdruk, namelijk de hydrostatische druk. Hierdoor is de druk in de caprock en de overburden hoger dan de druk in de reservoirs en kan het CO₂ niet uit de reservoirs migreren. Dit geldt ook voor het monitoren van de samenstelling van het te injecteren CO₂ en het temperatuurverschil tussen reservoirgesteente en CO₂ tijdens injectie. De injectie moet gecontroleerd plaats vinden, zodat thermische effecten geen bedreiging vormen.

6.4 Lekkagescenario: Lekkage langs breuken

Beschrijving scenario

Bij dit lekkagescenario wordt bekeken of CO₂ kan lekken uit de reservoirs middels de aanwezige breuken. Daarbij is het de vraag of de breukzones in de P18-reservoirs beïnvloed zijn door de gasproductie en in hoeverre CO₂-injectie de aanwezige breuken zal beïnvloeden.

Van nature bevinden zich breukzones in en rondom de P18-reservoirs, die in sommige gevallen de begrenzing van het reservoir vormen. Deze reeds bestaande breuken in en bij de gasreservoirs hebben er in het verre verleden niet toe geleid dat aardgas uit de reservoirs is ontsnapt. Dit betekent dat de breuken bewezen gasdicht zijn.

Beschrijving van bedreigingen en consequenties

Breuken komen voor in alle maten, variërend van breuken met een geringe verplaatsing tot breuken met een hele grote verticale verplaatsing. Bij de beoordeling van de breuken en de lek potentie is het van belang te weten welk type gesteentes aan beide zijden van het breukvlak grenzen.

Er worden twee bedreigingen geïdentificeerd die van invloed kunnen zijn op lekkage van CO₂ via breuken:

- Verandering in de breukzone als gevolg van chemische interacties;
- Verandering door mechanische/thermische reactivatie.

Consequenties

De consequenties van lekkage via een breukzone hangt sterk af van de eigenschappen van de breukzone. De hoeveelheid CO₂ die kan migreren hangt bijvoorbeeld af van de doorlatendheid van de breuk, en daarom dus indirect van de chemische reactiviteit van de compositie en de thermische en mechanisch geïnduceerde spanningsveranderingen, maar ook de breedte en omvang/bereik van de breukzone. Zo vormen breuken die tot aan maaiveld doordringen een groter risico dan breuken die zeer lokaal, in diepe gesteentelagen voorkomen.

Lekkage van CO₂ door een breuk is onderzocht binnen het CATO2 programma. In deze studie is een worst-case scenario onderzocht, waarbij onredelijk grote hoeveelheden CO₂ zijn 'vrijgelaten' in het gebied van de breuken. In werkelijkheid zal dit zo niet plaatsvinden, maar om een idee te krijgen van de lekkageroutes en welke mechanismen een rol spelen bij het invangen van migrerend CO₂, is toch een

modelsimulatie uitgevoerd. Hieruit blijkt dat, in geval van breuk reactivatie, CO₂ hypothetisch kan worden ingevangen in de Rijn/Rijswijk zandsteen aquifer.

Waarschijnlijkheid

Om de waarschijnlijkheid van CO₂-lekkage via breukzones te beoordelen moet eerst een beeld worden verkregen van de aanwezige breukzones in de P18-reservoirs. Vervolgens kan worden bepaald hoe waarschijnlijk het is dat CO₂ door chemische interacties in of via thermische/mechanische re-activatie van breuken kan migreren.

Aanwezige breuken

In hoofdstuk 4.5 zijn de breukzones beschreven. Onderstaand wordt specifiek ingegaan op de breukzone tussen P18-4 en P15-9 en tussen P18-2 en P18-6, aangezien bij deze breukzones de kans op lekkage via de breukzone op voorhand niet uit te sluiten is.

Chemische interacties

De aanwezigheid van bepaalde mineralen, zoals (fijn korrelige) carbonaat, in de breukzone kan mogelijk leiden tot een verhoogd risico op reactivatie. Onder invloed van oplossingsreacties van carbonaten in het CO₂ satureerde poriënwater, kan de porositeit toenemen of het gesteente zwakker worden. Dit kan niet alleen een effect hebben op de gasdichtheid van de breuk, maar ook op de sterkte en stabiliteit van de breuk. Het heeft een effect op de gasdichtheid, die over het algemeen beter wordt als carbonaten afnemen en de relatieve concentratie van kleien daarmee toeneemt.

Mechanische reactivatie van breuken door CO₂-injectie

Hoewel er breuken aanwezig zijn in de afsluitende bovenlaag, is tijdens de gasproductie gebleken dat deze breuken niet doorlatend zijn. De meeste van deze breuken reiken niet verder door dan de Altena Groep in het bovenliggende pakket, zo'n 200-300 meter hoger. Op figuur 4.7 is ook te zien dat sommige breuken wel verder reiken, tot in de Kalk lagen van de Rijnland Groep en de Noordzee Groep. Echter, deze ondieper gelegen breuken hebben een andere geologische oorsprong dan de breuken in de P18-reservoirs. Bovendien staan de breuken niet met elkaar in verbinding.

Vanwege de geologische omstandigheden in het gebied waarin de P18 velden liggen, is het niet waarschijnlijk dat de breuken vatbaar zijn voor re-activatie.

Het effect van CO₂ injectie is onderzocht op gesteentes aangetast door breuken. Ook hier kunnen kleine scheurtjes ontstaan indien injectie plaats vindt in de onmiddellijke omgeving van de breuken. Echter, deze ontstaan alleen in de directe omgeving van de injectie, waardoor geldt dat het afsluitende pakket van de Trias en de Jura met 550-780 meter zo dik is dat ook in geval van injectie bij een breuk het risico van lekkage uit het reservoir verwaarloosbaar klein is. Daarnaast is ook gekeken naar het effect van de lange termijn blootstelling van caprock en breuk materiaal daarvan aan CO₂.

Thermische reactivatie van breuken door CO₂-injectie

Het TNO-rapport laat zien dat de putten op zodanige afstand van breukzones staan dat de kans zeer gering is dat het koudefront tot een breukzone reikt, met uitzondering van de put in P18-6. Hier bevindt de breukzone zich op een afstand van circa 100 meter van de injectieput. Deze wordt periodiek ingezet, waarbij het van belang is dat de periode van injectie beperkt is. Nadere berekeningen zullen moeten aangeven welke periode en welk volume hiervoor als maximum moet worden aangehouden.

In P18-2 geldt dat de berekeningen laten zien dat bij continue CO₂-injectie het koudefront zich uitstrekt tot mogelijk 400 meter. Put P18-2A1 bevindt zich het dichtst bij een breukzone. De CO₂-injectie zal verdeeld

over de verschillende putten plaatsvinden, waarbij deze put naar verwachting niet bovenmatig veel CO₂ injecteert aangezien de injectiviteit van de put lager is dan bij andere putten.

Risico-inschatting

In de huidige situatie zijn de breuken gasdicht. Tijdens de productie van aardgas is de integriteit van de breuken niet aangetast. Wanneer het reservoir weer op druk wordt gebracht door de injectie van CO₂, wordt de spanning op de breukzones geleidelijk minder, waardoor de kans op re-activatie van breuken kleiner wordt. Lange termijn chemische aantasting van de breukzones na de injectie van CO₂ vormt geen risico. Wel dient voorkomen te worden dat het koudefront in reservoir P18-6 bij de breukzone komt.

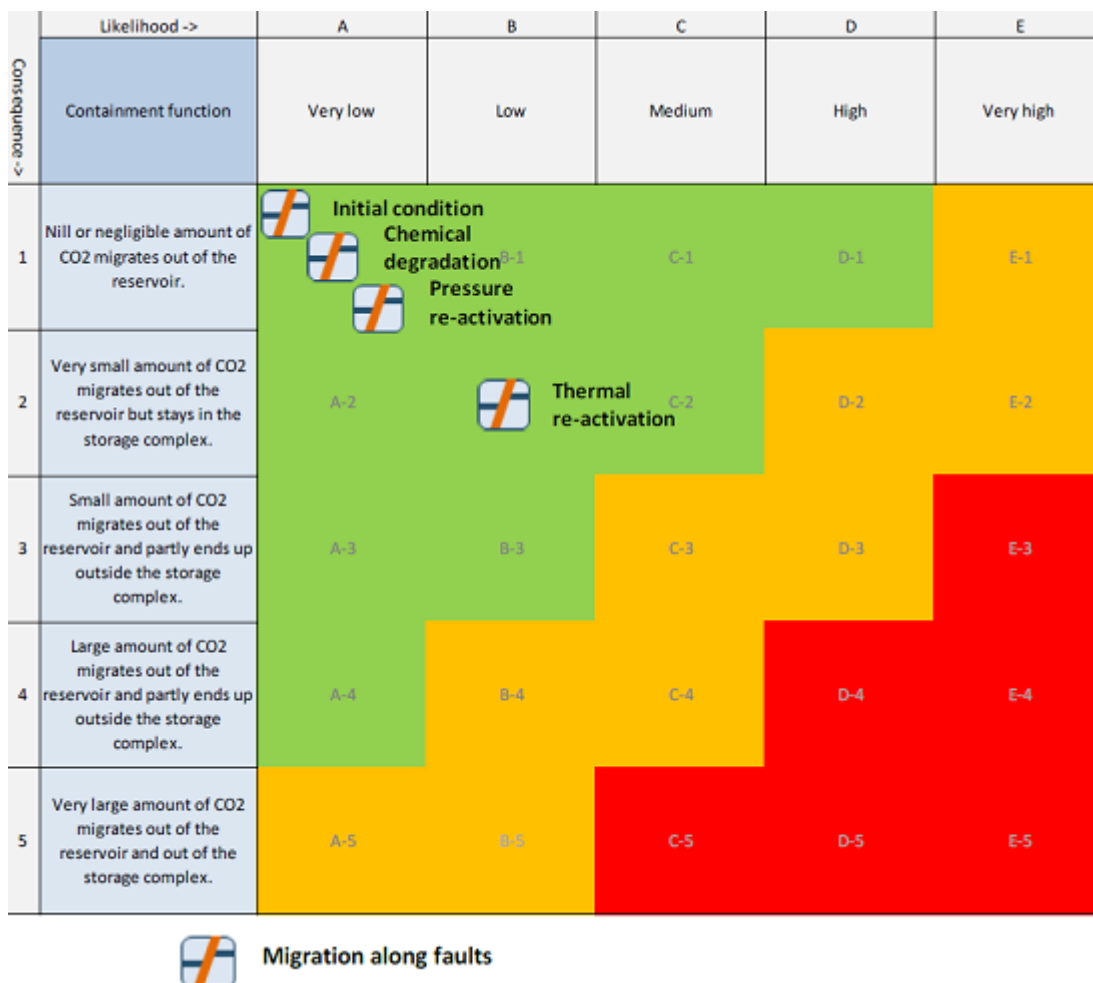
Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan

Het risico op lekkage via breuken is gebleken zeer laag te zijn. Echter, om ook onbekende risico's af te dekken wordt ook gekeken naar mogelijke aanvullende maatregelen om eventuele ongewenste veranderingen tijdig te signaleren. Daarbij is vastgesteld dat een seismische nulmeting voorafgaand aan injectie kan worden gebruikt om vast te stellen of er in de operationele fase geen breuken ontstaan of gereactiveerd zijn.

De waarschijnlijkheid dat lekkage optreedt door verspreiding van CO₂ vanuit reservoir P18-4, via de breuk, naar P15-9 en daar via de aanwezige putten naar de biosfeer wordt als laag beschouwd. In het geval dat de lekkage zich toch voordoet, zal de hoeveel CO₂ dat weglekt verwaarloosbaar zijn. In reservoir P15-9 kan monitoring plaatsvinden in één van de drie putten, twee producerende putten, P15-9E1 en P15-9E2, en een verlaten put, P18-1.

Resterend risico

In figuur 6.6 is de risico-matrix weergegeven voor de bevindingen bij P18-2. Voor P18-4 en P18-6 gelden vergelijkbare bevindingen.



Figuur 6.7. Risico-matrix voor lekkage langs breukzones bij P18-2.

Voor thermische reactivatie geldt dat de waarschijnlijkheid als laag wordt bepaald en de mogelijke hoeveelheid CO₂-lekkage als zeer klein. Voor de overige lekkagepaden geldt dat de waarschijnlijkheid van lekkage via breuken zeer laag is, met verwaarloosbare hoeveelheden CO₂. Het risico van thermische reactivatie wordt beperkt door de injectie in putten nabij breukzones te beperken in hoeveelheid of tijd.

6.5 Lekkagescenario: Lekkage via het overstromingspunt

Beschrijving scenario

Reservoirs kunnen worden begrensd door breuken (vorige scenario), en/of door de natuurlijke architectuur van het reservoir. Een voorbeeld van een natuurlijke grens is het zadelpunt ('spillpoint') van een driedimensionale structuur. Wanneer het opslagvolume voorbij het zadelpunt wordt gevuld, wordt de natuurlijke opslagcapaciteit overschreden en bestaat het risico dat CO₂ via de grens van het reservoir weg migreert. De term 'spillpoint' duidt op het natuurlijke overstromingspunt van de driedimensionale ruimte van het reservoir.

Beschrijving van bedreigingen en consequenties

Hieronder worden een viertal bedreigingen behandeld die mogelijke lekkage via het overstromingspunt tot gevolg kunnen hebben:

- Overvullen van de opslagcapaciteit van de P18 reservoirs;

- De aanwezigheid van voorkeursstromen in het reservoir;
- Oplossing van CO₂ in onderliggende waterlagen;
- Drukverhogingen op de lange termijn als gevolg van volume verandering in het reservoir.

Bedreiging 1: Overvullen

Indien teveel CO₂ wordt geïnjecteerd kan er sprake zijn van het overvullen van het reservoir. Er ontstaat een hogere druk in het reservoir waardoor het opgeslagen CO₂ lateraal zich verspreidt tot buiten het oorspronkelijke gasreservoir.

Bedreiging 2: Voorkeursstromen

Naast het overvullen van het reservoir, kan een lekkage van CO₂ via het overstromingspunt ook ontstaan door lekkage van CO₂ binnen het reservoir. Heterogene eigenschappen binnen een reservoir kunnen er toe leiden dat CO₂ door de opbouwende druk langs het overstromingspunt wordt geperst. De term voorkeursstromen heeft betrekking op dergelijke vloeistofstromingen in het reservoir.

Bedreiging 3: CO₂-oplossing

Wanneer CO₂ oplost in water dat zich onder het reservoir bevindt, bestaat het risico dat dit opgeloste CO₂ met de ondergrondse stroming van het water langs het spillpoint migreert. Dit is alleen van belang wanneer er sprake is van de aanwezigheid van water onder het reservoir en dit water daadwerkelijk onderhevig is aan stromingen.

Bedreiging 4: Drukverhogingen

Drukverhogingen zijn theoretisch mogelijk als gevolg van een aantal mechanismen. Voor het MER Barendrecht is aangetoond dat de aanwezigheid van resterend aardgas in het reservoir kan zorgen voor een drukverhoging op de lange termijn, doordat CO₂ en aardgas mengen. Tevens kan, op de lange termijn, doorgaande gasgeneratie in het Carboon en opvang van gas in de P18 Trias gasreservoirs voor een drukverhoging zorgen.

Consequenties

In het geval van overvullen van het reservoir, zal CO₂ migreren uit het opslagvoorkomen. Een lekkage van CO₂ via het spillpoint zal uiteindelijk gaan om een tijdelijke lekkage van beperkte hoeveelheden CO₂.

Waarschijnlijkheid

De kans dat CO₂ via het spillpoint weg lekt blijkt minimaal. Hieronder wordt de waarschijnlijkheid van de vier eerder genoemde bedreigingen besproken.

Bedreiging 1: Overvullen

Bij het plannen en ontwerpen van het Porthos-project wordt hier expliciet rekening mee gehouden, door ervoor te zorgen dat de initiële druk niet wordt overschreden. Door onder de reservoirs op te vullen tot gemiddeld de hydrostatische druk (circa 10 bar onder de initiële druk) zal er geen sprake zijn van het overvullen van het reservoir. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de mogelijkheid dat de opslagcapaciteit is verminderd doordat compactie van het reservoir is opgetreden als gevolg van inklinking bij gasproductie.

Bedreiging 2: Voorkeurstromen

Het voorkomen van voorkeurstromen zal door de inhomogeniteit van de gesteentelagen kunnen voorkomen. De reservoirstromingsmodellen laten bij de CO₂-injectie in P18-2 zien dat er mogelijke voorkeurstromen kunnen optreden. Voor reservoir P18-2 is een uitgebreid onderzoek gedaan naar mogelijke lekkage van CO₂ via een overstromingspunt ten gevolge van voorkeurstromen. TNO heeft hier verschillende scenario's voor doorgerekend.

Voor P18-2 is er aan de Noordwest zijde van compartiment I een overstromingspunt, waar lekkage van CO₂ kan optreden. Indien dit optreedt zal de een kleine hoeveelheid CO₂ uit het reservoir lekken tot buiten het opslagcomplex. Dit heeft er toe geleid dat injectie mogelijk is, waarbij CO₂ wordt opgeslagen in de zone van het opslagvoorkomen waar zich oorspronkelijk het aardgas bevond.

Bedreiging 3: CO₂-oplossing

De oplossing van CO₂ in het water van de waterlagen onder het gas zal een minimaal effect hebben. Het historische drukverloop gemeten tijdens de gasproductie laat zien dat er sprake is van kleine tot zeer kleine hoeveelheden water onder de gaslagen. Bovendien is het water dat aanwezig is onder het reservoir statisch (er is geen stroming aanwezig), waardoor de waarschijnlijkheid van lekkage van CO₂ langs het spillpoint nihil is.

Bedreiging 4: Drukverhogingen

Drukverhogingen zijn theoretisch mogelijk als gevolg van een aantal mechanismen. Voor het MER Barendrecht is aangetoond dat de aanwezigheid van resterend aardgas in het reservoir kan zorgen voor een drukverhoging op de lange termijn, doordat CO₂ en aardgas mengen. Tevens kan, op de lange termijn, doorgaande gasgeneraties in het Carboon en opvang van gas in de P18 gasreservoirs voor een drukverhoging zorgen. De waarschijnlijkheid van lekkage is gering, doordat rekening is gehouden met mogelijke drukverhoging bij het vaststellen van de maximale injectiedruk, ruim onder de initiële druk.

Risico-inschatting

Uit de scenarioanalyse blijkt dat de waarschijnlijkheid op lekkage langs het spillpoint via de geïdentificeerde bedreigingen minimaal is.

Mitigerende maatregelen, monitoring en risicobeheersplan

De meest belangrijke beheersmaatregel is dat de reservoirdruk voor, tijdens en na de injectie altijd onder de initiële reservoirdruk blijft. Door de hydrostatische druk als maximale gemiddelde reservoir aan te houden, is er een goed onderbouwde veiligheidsmarge ingebouwd. Met deze maatregel is het risico op lekkage via het spillpoint inderdaad verwaarloosbaar klein is.

Het reservoirmodel zal periodiek worden aangepast aan de hand van de gemeten data, zodat dit history matched model kan laten zien of alles nog volgens verwachting gaat.

Resterend risico

In figuur 6.5 is de risico-matrix weergegeven voor de bevindingen bij P18-2. Voor P18-4 en P18-6 gelden vergelijkbare bevindingen.

Likelihood ->		A	B	C	D	E
Consequence ->	Containment function	Very low	Low	Medium	High	Very high
	1 Nil or negligible amount of CO ₂ migrates out of the reservoir.	 NW Compartment II A-1 B-1 C-1 D-1 E-1  P18-2 <> P18-6				
	2 Very small amount of CO ₂ migrates out of the reservoir but stays in the storage complex.	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2
	3 Small amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	 NW Compartment I A-3 B-3 C-3 D-3 E-3				
	4 Large amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and partly ends up outside the storage complex.	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4
	5 Very large amount of CO ₂ migrates out of the reservoir and out of the storage complex.	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5

 **Spilling of CO₂ out of the reservoir**

Figuur 6.8. Risico-matrix P18-2 overstromingspunt

De risico-matrix toont dat voor P18-2 er aan de Noordwest zijde van compartiment I een overstromingspunt is, waar lekkage van CO₂ kan optreden. De waarschijnlijk is zeer gering. Indien dit optreedt zal de een kleine hoeveelheid CO₂ uit het reservoir lekken tot buiten het opslagcomplex. Voor de overige lekkagepaden geldt dat de risico's van uitstromend CO₂ verwaarloosbaar klein zijn. Ten eerste is de waarschijnlijkheid dat dit gebeurt klein, ten tweede indien het gebeurt, is de hoeveelheid verwaarloosbaar en blijft het binnen het opslagcomplex.

6.6 Bevindingen lekkagescenario's

De lekkagescenario's hebben in beeld gebracht welke lekkagepaden mogelijk zouden kunnen optreden. Het heeft betrekking op mogelijke lekkage via de put, de deklaag, breukzones en een overstromingspunt. De bijbehorende risicoanalyses geven aan dat, indien de juiste maatregelen worden getroffen, de kans op lekkage gering is en dat in het geval van lekkage de hoeveelheid CO₂ dat weglekt gering is. Onderstaand worden de belangrijkste aandachtspunten beschreven, waarmee de permanent CO₂-opslag kan worden gerealiseerd:

Aanlegfase

- Aanpassing van de injectieputten middels een workover.
- Verificatie van de cement hechting van de buitenwand van de casing/liner aan het gesteente van het boorgat.
- Indien nodig wordt een cementreparatie uitgevoerd aan de buitenkant van de put.

- Verificatie wanddikte van de productie casing/liner en herstelwerkzaamheden in geval van ontoelaatbare afname wanddikte;
- Er wordt een nieuwe opvoerserie en putafwerking aangebracht.
- Put specifieke aanpassingen, bijvoorbeeld ten aanzien van de packer.

Injectiefase

- Monitoring in de putten om vast te stellen dat de CO₂-injectie verloopt zoals verwacht. De gemeten waarden worden getoetst aan de verwachte waarden uit de modelberekeningen. Indien de meetwaarden afwijken, kan volgens een reactieplan worden bepaald welke ingreep nodig is.
- De reservoirs zullen niet gevuld worden tot een druk boven de hydrostatische druk. Hierdoor zal de druk in en nabij de put slechts een korte periode tijdens het injecteren boven de hydrostatische druk uitkomen.

Afsluitingsfase

- Bij afsluiting na CO₂-injectie worden secties aan de binnenkant van de put opgevuld met een cementprop. Dit voorkomt dat CO₂ via de binnenkant van de put omhoog kan migreren. Een dergelijke cementprop wordt een 'plug' genoemd en is een standaard maatregel binnen de olie- en gassector wanneer putten buiten gebruik worden gesteld.
- Ter hoogte van de afdekkende laag wordt een pannenkoekplug ('fullbore formation plug') of een equivalente afsluiting worden aangebracht.
- Op de lange termijn is de kwaliteit van de gebruikte materialen voor de putafsluiting van belang om een veilige opslag van CO₂ te kunnen garanderen.

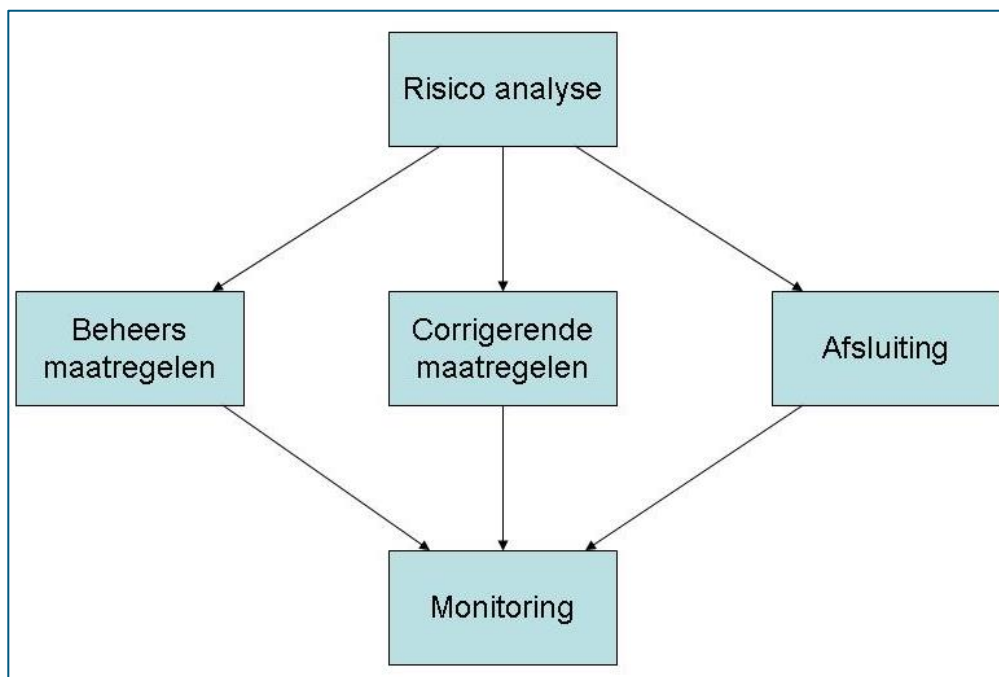
7 Monitoring

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op monitoringsvereisten voor de CO₂-opslag als onderdeel van het Porthos project. Daarnaast wordt beschreven hoe dit operationeel uitgewerkt kan worden. Verdere detaillering van het monitoringprogramma vindt plaats voorafgaand aan de start van de CO₂-injectie.

7.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is op basis van expert-judgement, ervaring met de reservoirs uit het verleden en ervaringen uit andere reservoirs, in combinatie met een grote hoeveelheid modelleerwerk, bepaald wat de verwachte gebeurtenissen zijn bij de opslag van CO₂ in de P18-reservoirs. Zodra de injectie daadwerkelijk gaat beginnen, is het mogelijk te verifiëren of de voorspelde effecten daadwerkelijk optreden. Hiervoor is een uitgebalanceerd monitoringsprogramma van belang. Daarbij is het wenselijk enkele essentiële parameters continu te meten. Doordat de opslaglocatie offshore is en het verkrijgen van monitoringsgegevens kostbaar kan zijn, dient de wens om veel te weten afgewogen te worden tegen de kosten die hiermee gepaard gaan. Dit vraagt zodoende om een afgewogen monitoringsprogramma. Naast het uitvoeren van metingen, is het van belang vooraf duidelijkheid te hebben over de rapportage, zowel de vorm als de intensiteit.

In de Mijnbouwwet worden condities met betrekking tot monitoring beschreven. Bij de aanvraag voor de opslagvergunning voor de P18-reservoirs worden per reservoir vier plannen ingediend. De plannen zijn gebaseerd op de risicoanalyse en beschrijven het risicobeheersplan, corrigerende maatregelen die worden genomen als er afwijkingen optreden, het afsluitplan en het monitoringsplan. Het risicobeheersplan bestaat uit de risicoanalyse (risk assessment) en de bijbehorende beheersmaatregelen (risk management). De risicoanalyse vormt de basis voor het corrigerende maatregelen plan en voor het voorlopige afsluitingsplan. Op basis van deze plannen is het monitoringsplan opgesteld.



Figuur 7.1. Consistentie tussen plannen bij aanvraag opslagvergunning

Het monitoringsplan is mede gebaseerd op de voorwaarden uit de EU Emission Trading System (ETS). Hierbij ligt de nadruk op het registreren van mogelijke lekkage uit het opslagcomplex.

Tot slot is het van belang dat de benodigde operationele parameters worden gemeten, zodat de operator sturing kan geven aan het injectieproces binnen de vooraf vastgestelde bandbreedten.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op datgene wat volgens de initiatiefnemers gezien wordt als een afgewogen, efficiënt en effectief monitoringsprogramma.

7.2 Opzet monitoringsplan

De opzet van het monitoringsplan op hoofdlijnen is beschreven in het monitoringsplan bij de aanvraag voor de opslagvergunning voor P18-2, P18-4 en P18-6. Hierbij zijn een aantal uitgangspunten van belang.

In het monitoringsplan worden verschillende fasen onderscheiden, te weten:

- Pre-injection (fase voordat de injectie van CO₂ start);
- Injection (operationele fase, waarin CO₂ wordt geïnjecteerd);
- Post-injection – observatie (voordat de putten permanent worden verlaten, wordt de kwaliteit van de afsluiting gecontroleerd);
- Post-injection – (post-) abandonnering (indien de kwaliteit van de afsluiting voldoende is aangetoond, worden de putten permanent verlaten);
- Post-injection – (post-)overdracht (wanneer een aantoonbaar stabiele situatie is bereikt, wordt het gevulde reservoir overgedragen aan de overheid);
- Lange termijn (na de overdracht worden de ontwikkelingen in het reservoir periodiek gevolgd).

Per fase zal in het monitoringsplan worden aangegeven wat de meetfrequentie is, welke parameters precies worden gemeten, welke technieken worden ingezet en vanaf welke locatie elke monitoringsactiviteit zal plaatsvinden. Tevens zal de verwachte duur van iedere monitoringperiode aangegeven worden.

De volgende categorieën van monitoring zijn geïdentificeerd¹⁶:

- Het injectieproces;
- De putten;
- Integriteit van het reservoir;
- Migratie van CO₂ uit het reservoir.

Voor elk van deze categorieën zijn verschillende technieken beschikbaar en wordt onderscheid gemaakt tussen:

- Verplichte onderdelen;
- Aanvullende (specifieke) onderdelen;
- Optionele contingency onderdelen.

Het principe van het monitoringsplan is gebaseerd op het zogenaamde stoplichtmodel. Hierin wordt per techniek onderscheid gemaakt tussen:

- Groen – bandbreedte van gemeten waarde, waarbij de opslag conform verwachting plaatsvindt;

¹⁶ Verspreiding van CO₂ in het reservoir (plume tracking), is in gasvelden niet goed mogelijk

- Oranje – signaalwaarde, bandbreedte van waarden waarbij blijkbaar de injectie anders verloopt dan verwacht. Dit vraagt om aandacht en wellicht extra metingen om vast te stellen hoe dit wordt veroorzaakt;
- Rood – actiewaarde, de meetwaarde is zodanig afwijkend van de verwachting dat voortzetting van injectie niet kan plaatsvinden, voordat duidelijk is wat hier aan de hand is en of dit CO₂-injectie verder onmogelijk maakt.

Het monitoringsplan zal periodiek worden doorgesproken met het bevoegd gezag en indien wenselijk bijgesteld worden.

7.3 Ontwerp van het monitoringsplan

Het ontwerp van het monitoringsplan voor CO₂-opslag in de P18-reservoirs bouwt voort op de kennis die is opgedaan tijdens de karakterisering van de reservoirs en de omgeving, en de risico-evaluatie door TNO.

In P18 zijn drie reservoirs aanwezig (P18-2, P18-4 en P18-6), die alle drie geschikt zijn bevonden voor veilige en permanente CO₂-opslag. Het monitoringssysteem is er op geënt om te kunnen verifiëren dat:

- Opgeslagen CO₂ daadwerkelijk in het reservoir wordt ingesloten, en;
- De integriteit van het opslagreservoir niet wordt aangetast, voornamelijk tijdens de operationele fase, waarin het CO₂ wordt geïnjecteerd.

Het uitgewerkte monitoringplan zal bij de aanvraag van de opslagvergunningen worden toegevoegd. Er zal tevens een inventarisatie gemaakt worden van de beschikbare monitoringinstrumenten van verschillende leveranciers.

Directe en indirecte monitoring

Er worden twee manieren onderscheiden om de bovenstaande punten te kunnen verifiëren. Enerzijds zijn er directe detectiemethoden, waarmee de afwezigheid van migratie van CO₂ uit het reservoir kan worden aangetoond, bijvoorbeeld via CO₂-metingen bij de putten.

Anderzijds zijn er ook indirecte detectiemethoden beschikbaar, waarmee kan worden geverifieerd dat het geïnjecteerde CO₂ zich gedraagt zoals voorspeld. Het voorspelde gedrag is gebaseerd op statische en dynamische modeleringen die vooraf zijn uitgevoerd, maar ook van de updates van deze modeleringen gebaseerd op beschikbaar gekomen monitoringsgegevens tijdens de injectiefase (bijvoorbeeld drukmetingen in de putten). In het ontwerp van het monitoringsplan zijn belangrijke parameters, ten behoeve van de indirecte monitoring, opgenomen, zoals:

- Representatieve druk- en temperatuurmetingen;
- Annuli drukken;
- Geïnjecteerd volume CO₂;
- Kwaliteit geïnjecteerd gas;
- Metingen van de integriteit van de put;
- Waarnemingen van onregelmatigheden op de zeebodem.

Afwijkingen van verwachtingen

Afwijkingen van het verwachte gedrag van geïnjecteerd CO₂ duiden mogelijk op migratie van CO₂ uit het reservoir. De belangrijkste componenten bij het meten van dergelijke afwijkingen van het verwachte gedrag is het monitoren van de druk en temperatuur. Na een gedegen en betrouwbare 'history matching' zijn afwijkingen van het verwachte drukverloop gedurende en na de operationele fase een sterke indicator voor migratie van CO₂ uit het reservoir. Hiertoe worden zowel de drukken bovenin de putten gemeten (in de wellhead), alsmede de drukken onderin de put (downhole).

Indien onverwachte afwijkingen worden gemeten en migratie van CO₂ uit het reservoir wordt vermoed, worden additionele maatregelen ingezet.

Putintegriteit

Voor het monitoren van de integriteit van de injectieputten kunnen diverse technieken ingezet worden, zoals:

- herhaalde logging over de diepte van de putten;
- meten van de drukken in de annuli van de putten;
- periodieke analyse van de inhoud van de annuli van de putten, om te testen op de aanwezigheid van CO₂.

Voordat de injectie van CO₂ start, worden de putten aangepast en status vastgesteld als baseline voor latere bepaling van de integriteit van de putten. Na de injectie worden de putten op een veilige manier afgesloten en permanent verlaten.

Monitoren ondiepe ondergrond

Tenslotte kan ondiepe monitoring worden uitgevoerd, op de zeebodem. Dit is vooral om aan te tonen dat er geen veranderingen optreden en dus geen migratie naar de zeebodem plaats vindt. Door middel van echotechniek (multi-beam echosounding) kunnen afwijkingen in de zeebodem als gevolg van veranderingen in de diepe ondergrond (zogenaamde pockmarks) en mogelijke CO₂-belletjes worden geïdentificeerd. Daarnaast kunnen zeebodemmonsters worden gebruikt om de afwezigheid van sporen van migrerend CO₂ vast te stellen. De locaties voor het nemen van de monsters hangt in eerste instantie samen met de locaties van de putten, maar op basis van de resultaten van de echotechniek kunnen ook andere locaties worden bemonsterd.

Breukzones

Voor beide issues met betrekking tot breukzones geldt dat nader onderzoek in het kader van dit MER het aannemelijk heeft gemaakt dat migratie door breukzones niet zal optreden. Dit betekent dat hiervoor geen aanpassing van de aanleg of werkwijze nodig is. Wel is het van belang om middels monitoring vast te stellen of de breukzones daadwerkelijk geen CO₂ doorlaten. In het reservoir P15-9 zal daarom bij de gaswinning de hoeveelheid meegeproduceerd CO₂ worden gemonitord. Indien dit hoger is dan verwacht, zal voortzetting van CO₂-injectie alsnog overwogen moeten worden. Voor de andere breukzones geldt dat indien de druktoename in het reservoir sterk achterblijft bij de verwachting, eveneens het vervolg van CO₂-injectie overwogen moet worden.

7.4 Meetprogramma

Het meetprogramma wordt uitgevoerd in combinatie met het integrale meetprogramma van de Porthos infrastructuur. De meetwaarden met betrekking tot druk, temperatuur en samenstelling zijn gekoppeld aan de metingen bij het compressorstation en deels bij de CO₂-leveranciers. Voor het opslagdeel van de CCS-keten zijn de monitoringseisen apart uitgewerkt in een meetprogramma.

Voor het meetprogramma wordt gebruik gemaakt van meetapparatuur in de putten. Daarnaast is het mogelijk dat één van de beschikbare putten gebruikt wordt als monitoringsput, zodat informatie uit het reservoir kan worden verkregen op afstand van de injectieputten. Het is tevens mogelijk dat putten tijdelijk hiervoor worden gebruikt, in een periode dat er geen injectie in plaats vindt.

Metingen gerelateerd aan mogelijke lekkage van CO₂ uit het opslagcomplex:

- Druk en temperatuur in de putten (zowel bovenin de putten als onderin);
- Annulaire drukken in de putten (om na te gaan of er door de putwand lekkage ontstaat);
- Samenstelling van het te injecteren CO₂-mengsel;
- Volume van geïnjecteerd CO₂, gebaseerd op een volume meting en informatie over percentage CO₂ in het gasmengsel, zoals afkomstig van de leveranciers;
- Metingen van onregelmatigheden op de zeebodem.

In de onderstaande tabel (TNO, 2019) is een overzicht gegeven van de in te zetten meetapparatuur en methoden. Dit wordt in het monitoringsprogramma voorafgaand aan de start van injectie in meer detail uitgewerkt, maar geeft een indicatie van de mogelijke monitoringsactiviteiten.

Tabel 7.1. Overzicht monitoringsactiviteiten diepe ondergrond

		Meting apparatuur / methode
	Injectieproces	
1	Injectie hoeveelheid	Flow meter
2	CO ₂ concentratie in gasmengsel	Monsters & analyses: online systeem
3	Samenstelling te injecteren gasmengsel	Monsters & analyses: aanvullende monsters voor kalibratie
4	Bepaling watergehalte	Meting water in gasmengsel
5	Onregelmatige emissies door lekkage, venting of incidenten	Combinatie van technieken
	Putintegriteit	
6	Annulaire druk	Druk meter (met alarmeringsniveau)
7	Putintegriteit	Wireline Logging (selection of tool: CBL, PMIT, EMIT, USIT, WAF, optical)
8	Druk bovenin de putten	Druk meter
9	Temperatuur bovenin de put	Temperatuur meter
10	Plugintegriteit	Druk test en aanvullende inspecties
	Reservoirintegriteit	
11	Reservoir druk, onderin de put gemeten	Druk meter
12	Reservoir temperatuur, onderin de put gemeten	Temperatuur meter (of DTS)
13	Stabiele druk meting gedurende periode zonder injectie	Druk meter tijdens shut-in
14	Stabiele temperatuur meting gedurende periode zonder injectie	Temperatuur meter (DTS) tijdens shut-in
15	Vermoedelijke lekkage	Oppervlakte seismische survey
	Milieu monitoring	
16	Pockmarks van de zeebodem	Multi-beam echosounding
17	Aanwezigheid van ondiep gas voorkomens of een gas schoorsteen in de ondiepe ondergrond	Baseline seismische data
18	Migratie paden voor gas in de ondiepe ondergrond	Time-lapse seismische data acquisitie (2D or 3D)
19	CO ₂ in de bodem in pockmarks	Gas samples using vibrocore + lab analysis
20	Detectie van belletjes bij de bovenkant van de put	Akoestische belletjes detector

8 Leemte in kennis en informatie

In dit hoofdstuk zijnde mogelijke gevolgen van CO₂-opslag zijn zo goed mogelijk in beeld gebracht met de recente kennis en informatie. Opslag in deze vorm en omvang heeft nog niet eerder plaatsgevonden onder de Noordzee. Op onderdelen is daarom uitgegaan van expert judgement, in combinatie met een monitoringsprogramma, om vast te stellen of de aannames correct zijn.

Omgaan met onzekerheden

Bij benutting van de ondergrond, waaronder de opslag van CO₂ in leeggeproduceerde gasvelden, is het van belang duidelijk te hebben welke onzekerheden er zijn. De onzekerheden zijn inherent aan het gebruik van de diepe ondergrond. Deze treden in verschillende hoedanigheden op bij olie- en gaswinning, waar al decennia lang ervaring is opgebouwd hoe hiermee omgegaan kan worden. Maar het geldt in minder mate ook voor het ondiepere gebruik van watervoerende lagen voor drinkwaterwinning. Vanuit bekende informatie kan een voldoende beeld worden verkregen van de samenstelling van de ondergrond en de wijze waarop gebruik van de ondergrond tot veranderingen leidt. Het is van belang de onzekerheden zo klein mogelijk te maken, maar het feit dat er resterende onzekerheden zijn, hoeft geen belemmering te zijn voor het gebruik van de ondergrond. Wat hierbij van belang is dat de onzekerheden beheersbaar zijn, zodat indien de reactie in de ondergrond afwijkt van datgene wat wordt verwacht, nog steeds een veilige situatie blijft bestaan.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste onzekerheden en hoe hiermee is omgegaan, uitgedrukt in leemte in kennis en informatie.

8.1 Leemten in kennis

8.1.1 Druk- en volumescenario's

Bij transport en opslag van CO₂ is de druk, temperatuur en samenstelling van het te transporteren CO₂ van belang. Dit is mede bepalend voor de hoeveelheid CO₂ dat kan worden opgeslagen. Er zijn voorspellingen over hoe het verloop van druk, temperatuur en dichtheid zal zijn (dit geldt voor de transportleiding, de putten en het reservoir), maar op zo'n grote schaal is hier nog geen eigen ervaring mee opgedaan.

In het MER is uitgegaan van een gemiddelde situatie. Vervolgens zijn verschillende bijzondere omstandigheden in beeld gebracht, zodat ook afwijkend verloop van druk, temperatuur en dichtheid inzichtelijk is.

8.1.2 Detailmodellering

Inzichten met betrekking tot de injectie van CO₂ in de P18-reservoirs is mede gebaseerd op de uitkomsten van modelberekeningen. TNO heeft, in samenspraak met TAQA en EBN, bestaande modellen aangepast en de beschikbare modellen zijn aan elkaar gekoppeld om te komen tot een compleet overzicht. Modellen vormen een schematisatie van de werkelijkheid. De parameters zijn met de beste inzichten ingevoerd, gebaseerd op meetwaarden of aannames.

In de komende periode zullen voor de detail engineering op basis van de bestaande modellen, verdere detaillering plaatsvinden. Daarbij zal ook een geïntegreerd model worden uitgewerkt, zodat de koppeling tussen modellen niet meer nodig is. Belangrijke aanpassingen in de modellen hebben betrekking op:

- Temperatureffecten worden meegenomen in het geïntegreerde model;

- De injectiviteit wordt per put afzonderlijk in het model geplaatst. Deze is eerder gelijkmatig verondersteld, maar in de praktijk kan dit verschillen, zodat sturing van de CO₂-stroming per put in beeld gebracht moet worden;
- Volgens de voorschriften zal het CO₂-mengsel voor minimaal 95% bestaan uit CO₂, aangevuld met in beperkte mate andere stoffen. De andere stoffen kunnen invloed hebben op de faseovergangen van het gasmengsel, bij verandering van druk of temperatuur. In de TNO-modellen is gerekend met 100% zuiver CO₂.

De huidige modellen geven duidelijkheid met betrekking tot de lange termijn opslag van CO₂ en het voorkomen dat CO₂ kan weglekken. De verfijning in de modellen en de berekeningen is gericht op de operationele voorspelbaarheid van de CO₂-injectie.

8.1.3 Lange termijn effecten

Uitgangspunt is het op industriële schaal toepassen van een afvanginstallatie en het permanent opslaan van CO₂. Het CO₂ wordt dus niet opgeslagen met de bedoeling het in de toekomst eventueel weer uit het reservoir te halen. Dit betekent dat rekening moet worden gehouden met een oneindige opslagperiode. Op basis van nu bekende informatie en inzichten is steeds een inschatting gemaakt van de mogelijk lange termijn effecten. In de uitvoering wordt voorkomen dat hier nadelige effecten optreden. Een belangrijke maatregel hierbij is het niet geheel tot de oorspronkelijke druk opvullen van het reservoir. Indien zich op lange termijn serieuze problemen voor doen, blijft de mogelijkheid bestaan, eventueel via een extra put, CO₂ alsnog vrij te laten en zo grotendeels de oorspronkelijke situatie terug te brengen.

8.2 Leemten in informatie

8.2.1 Compleetheid productie en geologische geschiedenis.

Het eigendom van de P18 reservoirs meerdere keren is overgedragen. De aanwezige geologische en productiegegevens zijn nu in bezit van TAQA en opgeslagen in het centrale systeem van NLOG. Deze informatie is toegepast in de onderzoeken voor het Porthos project.

In het MER is gebruik gemaakt van alle aanwezige informatie bij TAQA en TNO, zodat het geschetste beeld gezien kan worden als optimaal onder de huidige omstandigheden. Bij de aanpassing van de putten ontstaat mogelijk nog aanvullende informatie. Daar waar aanvullende informatie wenselijk is, zal nieuw onderzoek worden uitgevoerd ter completering. Zo is er besloten dat voorafgaand aan de injectie van CO₂, de status van de put cementatie opnieuw onderzocht wordt door middel van een CBL (cement bond log).

8.2.2 Putten

Het belangrijkste uitgangspunt voor opslag van CO₂ in een leeggeproduceerd gasreservoir is dat het veilig plaatsvindt. Naast veiligheid, vormt de kosteneffectiviteit natuurlijk ook een belangrijk afwegingscriterium. Het boren van putten is een zeer dure aangelegenheid, dus hergebruik van bestaande winputten voor de injectie van CO₂ heeft sterk de voorkeur. Technisch gezien is het in de meeste gevallen ook goed mogelijk om voormalige winputten in te zetten voor CO₂-injectie.

Injectiviteit

Voor de 6 potentiële injectieputten putten in P18 is onderzocht of de gewenste injectiesnelheden kunnen worden behaald. Zowel de eigenschappen van het reservoirgesteente (bijvoorbeeld de permeabiliteit) als de eigenschappen van de put (bijvoorbeeld de diameter) kunnen van invloed zijn op de injectiviteit.

Voorafgaand aan grootschalige CO₂-opslag zal eerst een testperiode plaatsvinden. In deze testperiode wordt meer duidelijk in hoeverre de verwachte injectiviteit daadwerkelijk gerealiseerd kan worden.

Daarnaast vindt aanvullende modellering plaats, waarbij EBN, TAQA en TNO meer geïntegreerde en gedetailleerde modellen opstellen, waarmee onzekerheden met betrekking tot de CO₂-injectie verder beperkt kunnen worden.

Cementatie putten

Omdat de putten een directe verbinding vormen tussen het reservoir en maaiveld (in het geval van offshore gasveld is dit de zeebodem of het platform), is het belangrijk dat de putten in een goede staat verkeren. In het bijzonder geldt dit voor de kwaliteit van de materialen ter hoogte van de afdekkende gesteentelagen boven het reservoir. Wanneer de kwaliteit van deze materialen goed is, vormt de cementatie tussen de buitenkant van de put en het gesteente een ondoordringbare barrière voor CO₂, zodat CO₂ niet via de putwand omhoog kan migreren.

Micro-annuli

Het ontstaan van micro-annuli langs de putwand is theoretisch onderzocht. Omdat de bovenliggende lagen een hydrostatische druk hebben, zal er op de lange termijn via de micro-annuli geen CO₂ migratie plaats vinden. Tijdens de injectie operaties, zou de druk bij de put tijdelijk hoger kunnen zijn dan de hydrostatische druk. Aan de hand van berekeningen kan een inschatting gegeven worden hoeveel CO₂ in het ongunstigste geval langs de putwand naar bovenliggende lagen kan migreren.

Afsluiten put na beëindiging CO₂-injectie

Secties van de binnenkant van de put wordt na de injectie volgestort met cement, zodat CO₂ niet ook via de binnenkant van put omhoog kan migreren. Een dergelijke cementprop wordt een 'plug' genoemd en is een standaard maatregel binnen de olie- en gassector wanneer putten buiten gebruik worden genomen. In het geval van CO₂ opslag is het een mogelijkheid om een speciale plug, een zogenaamde pannenkoekplug, te installeren. Hiermee wordt het risico dat CO₂ via de buitenkant van de put weg kan migreren nog verder verkleind.

In de huidige omstandigheden is een verantwoorde afsluiting mogelijk, maar nog niet onder deze omstandigheden toegepast. Het gebruik van de fullbore formation plugs is al in meerdere putten toegepast, maar nog niet eerder bij een tot initiële druk gevuld reservoir met CO₂. Zodra dit eenmaal wordt toegepast na afronding van de opslagperiode, zal de afsluitende werking van de plug getoetst en bewezen worden.

8.2.3 Verbetering modellen op basis van monitoringsresultaten

In de olie- en gasindustrie zijn goede modellen en gekalibreerde beschikbaar, waarmee inzichtelijk kan worden gemaakt hoe olie of gas in het reservoir bewegen, tijdens de winning. Daarnaast kan de injectie van stoom, water of gas in een reservoir worden gemodelleerd. Deze modellen maken gebruik van gedetailleerde kennis van de reservoirs en de daarboven aanwezige lagen.

In de loop van de jaren zijn de modellen steeds verder verfijnd, doordat de berekende waarden kunnen worden vergeleken met de gemeten waarden. Met CO₂ is echter minder lange ervaring opgedaan in modellen.

Belangrijke doelstelling van de monitoring is dan ook de vooraf opgestelde modellen te toetsen aan de hand van meetwaarden. Door de nieuwe gegevens steeds te koppelen aan de modellen, kan geleidelijk aan gekomen worden tot nauwkeurige en betrouwbare modellen. De ervaringen met het opstellen en aanpassen van het model vormen belangrijke leerpunten voor nieuwe CCS-projecten.

8.2.4 Breukzones

Breukzone tussen P18-4 en P15-9

De breukzone tussen reservoir P18-4 en P15-9 is naar verwachting gesloten, zodat hier geen CO₂ door zal migreren. Bij het begin van het project zal de druk in beide reservoirs relatief laag zijn, circa 20 tot 30 bar. In de loop van het project komt er een veel hogere druk in reservoir P18-4 door de injectie van CO₂. In de praktijk is een dergelijk groot drukverschil tussen beide reservoirs nog niet eerder opgetreden. Dat geeft op voorhand onzekerheid of ook bij een drukverschil tot ruim 250 bar, geen CO₂ door deze breuk vanuit reservoir P18-4 naar reservoir P15-9 zal migreren.

In het MER is rekening gehouden met deze leemte in kennis. Door middel van monitoring wordt bepaald of er sprake is van migratie. Indien dit het geval is, kan of de injectie gestopt worden, zodat verder migratie beperkt wordt, dan wel kan voor het reservoir P15-9 eveneens een opslag vergunning voor CO₂ worden aangevraagd. Dit reservoir voldoet aan de benodigde randvoorwaarden voor CO₂-opslag.

9 woordenlijst en afkortingen

Begrip	Uitleg
12-mijlzone	Exclusief Economische Zone (en dus niet '12 mijl zone' of '12 mijlzone')
AMESCO	Algemene Milieu-Effectenstudie CO ₂ -opslag
Autonome ontwikkeling	Op zichzelf staande ontwikkeling die ook plaats vindt als de voorgenomen activiteit niet wordt uitgevoerd
Bar	Bar(g), bar(gauge), het aantal bar overdruk, 1 bar(g) is 2 bar(a)
BBT	Beste beschikbare techniek, BAT, techniek conform BREF
Bevoegd gezag	Overheidsinstantie die bevoegd is over de voorgenomen activiteit een besluit te nemen.
CATO2	CO ₂ -Afvang, -Transport en -Opslag onderzoeksproject 2
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Afvang en -Opslag)
EC	Europese Commissie
ECCP	European Climate Change Program
ETS	Emission trading scheme
EU	Europese Unie
GIIP	Gas initially in place (initiële hoeveelheid gas in het reservoir)
GPS	Global Positioning System
Hang-off riser	Een riser die aan het platform hangt
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
Klimaatverandering	Verwachte structurele veranderingen in het klimaat t.g.v. onder andere opwarming van de aarde.
Maatlat	Methode om het effect van maatregelen ten opzichte van de referentiesituatie (huidige situatie plus autonome ontwikkeling) te bepalen. De maatlat kan variëren van zeer negatief (-) tot zeer positief (+).
Mbw	Mijnbouwwet
MER	Milieueffectrapport (het rapport)
m.e.r.	Milieueffectrapportage (het proces van milieueffectbeoordeling)
Mton	Megaton (10 ⁶ ton)
NCP	Nederlands Continentaal Plat
NEa	Nederlandse Emissieautoriteit
NeR	Nederlandse emissie-Richtlijn
NOGEPa	Nederlandse Olie en Gas Exploratie en Productie Associatie
P18	Het mijnbouwconcessieblok P18 in de Noordzee
P18/a	Het deelblok P18a binnen P18
P18-A	Het P18-A platform van TAQA
P18-2, P18-4 en P18-6	De reservoirs waar het P18-A platform aan gekoppeld is
P18-02	Put P18-02
RCR	Rijkscordinatieregeling
Referentiesituatie	Situatie die als uitgangspunt wordt genomen om de alternatieven mee te vergelijken.
ROAD-project	Het project om afvang, transport en opslag van CO ₂ te realiseren
SodM	Staatstoezicht op de Mijnen
Thema's	Aspecten waaraan de verschillende alternatieven getoetst worden om een afweging tussen de alternatieven te maken.
TAQA	Taqqa, Taqqa Offshore BV, Abu Dhabi National Energy Company
Wm	Wet milieubeheer
X-mas tree	Onderdeel van de leiding waar veel koppelstukken op zitten

10 Literatuur

- AMESCO (2007): *Algemene Milieu Effecten Studie CO₂-Opslag (AMESCO)*. Royal Haskoning, CE Delft, Golder & Associates, TNO & Ecofys; Rapport 9S0742/R06/ETH/Gron, Royal Haskoning, Groningen
- De Bruijn, J., 2008: Geochemical consequences for CO₂ storage in the BRT(-Z) fields Summary. EP200810202805.
- CATO2 (2011): *Feasibility study P18 (final report)*. Vandeweyer et al. (CATO2-WP3.01-D06), 2011 (de relevante hoofdstukken van deze publicatie zijn opgenomen als technische achtergrond bijlage 1 bij dit MER Deelrapport Opslag)
- Commissie m.e.r., 2007: AMESCO Generic Environmental Impact Study on CO₂ Storage. Advies van de Commissie m.e.r. inzake, 7 september 2007 / rapportnummer 1964-46.
- Gasda et al., 2004: Gasda, S.E., S. Bachu, and M.A. Celia, "Spatial Characterization of the Location of Potentially Leaky Wells Penetrating Mature Sedimentary Basins", *Environmental Geology*, 46 (6-7), 707-720, 2004.
- IEA, 2009: IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG), 2009. Long Term Integrity of CO₂ Storage – Well Abandonment, 2009/08, July 2009.
- MER Barendrecht (2008): *MER ondergrondse opslag van CO₂ in Barendrecht*. Rapport EP200809225671, Shell CO₂ Storage Company BV, Den Haag
- Newstead et al., 2008; Newstead, J., H. Priebe, A. Sluijk, M. Lorenzo, M. Slaats, F. Seeberger, R. Bisschop, K. van Ojik, R. Trompert, J. de Bruijn, R. van Eijs, L. Finlayson, L. Haron, 2008. Chapter 6 Chemical Interaction Study of Technical Field Development Plan Barendrecht & Barendrecht-Ziedewij CO₂ Geostorage. Report No: EP200801218447.
- PANTERRA (2011): *Geschiedenis en beschrijving van de P18-reservoirs*, PanTerra, 2011 (opgenomen als technische achtergrond bijlage 2 bij MER CCS ROAD, Deelrapport Opslag)
- ROAD (2011): *Technical Transport & Storage basis for MER and Permitting reports*, 2010, ROAD, 5 mei 2011; RD-T+S-MCP-REP-P-0010
- TNO, 2007a: Orlic, B., P. Fokker, K. Geel, 2007, Caprock and Fault Integrity for CO₂ storage in the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO report; 2007-U-R1057/B.
- TNO, 2007b: Wildenborg, T., F. van Bergen, F. Mulders, T. Benedictus, B. Orlic, C. Hofstee & F. Neele, 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 report 2007-U-R1057/B.
- TNO, 2007c: Mulders, F.M.M., R. Gouwen, B. Orlic, & T. Benedictus, 2007, Well Integrity for CO₂ storage in the fields Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields, TNO report 2007-U-R1057/B.

TNO, 2008: Van Bergen, F, T. Tambach, C. Hofstee & P. David, 2008. Geochemical consequences of CO₂ injection in the Barendrecht and Barendrecht-Ziedewij gas fields. TNO report 2007-U-R1057/B – revised Date May 1, 2007 – revised September 2008.

Van Eijs, R., & F. Seeberger, 2008: Barendrecht (BRT) CO₂ sequestration: consequence from a irreversible stress path MAM report EP200803212403.