

CO₂-opslag in Nederland: het is noodzakelijk en het kan veilig

Whitepaper



Auteurs

Joris de Moor, Teamlead Technology CCUS

Maarten Slijkhuis, Reservoir Engineer CCUS

ebn

Energising the transition



Als Nederland in 2050
klimaatneutraal wil
zijn, moeten we nu de
unieke mogelijkheden
voor CO₂-opslag
benutten.

Samenvatting

Wereldwijd is er brede overeenstemming dat we de opwarming van de aarde moeten tegengaan. Daarvoor is een drastische vermindering van CO₂-uitstoot nodig. Nederland wil dat de emissie in 2030 zestig procent minder is dan in 1990 en in 2050 tot nul gereduceerd is. Om de doelen te bereiken, zijn tal van oplossingen nodig, zoals de transitie naar duurzame energiebronnen, energiebesparing, hergebruik van materialen en de afvang, transport en opslag van CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS).

Nederland is bij uitstek geschikt voor CCS, om een aantal redenen:

- De energie-intensieve industrie met grote CO₂-emissies is op enkele plekken geconcentreerd
- Die clusters liggen dicht bij de kust, dat is gunstig voor offshore opslag
- Nederland heeft onder de Noordzee een flinke opslagcapaciteit in de vorm van lege olie- en gasvelden
- De olie- en gasinfrastructuur is ideaal voor hergebruik voor transport en opslag van CO₂
- Nederland heeft uitstekende logistieke randvoorwaarden voor CO₂-transport.



Door deze omstandigheden kan CCS snel en kostenefficiënt CO₂-emissies reduceren. Uiteraard is het belangrijkste dat dit ook veilig gebeurt. Porthos, dat CO₂ in lege offshore gasvelden gaat opslaan voor een aantal bedrijven in de Rotterdamse haven, heeft in kaart gebracht welke risico's spelen bij CO₂-opslag. Concreet zijn er vijf belangrijke aandachtsgebieden:

- De samenstelling van de bronstroom
- De geologische veldkeuze (capaciteit, afsluitende laag, injectiviteit)
- De putintegriteit

- Het gebruik van CO₂-resistente materialen
- De juiste operationele procedures

Op elk van deze gebieden heeft Porthos veel onderzoek gedaan en adequate maatregelen genomen. Daarmee toont het project aan dat CO₂-opslag in offshore gasvelden op een veilige manier kan plaatsvinden. Dat, en het feit dat het snel en kostenefficiënt kan, maakt CO₂-opslag een onmisbaar instrument om de Nederlandse klimaatdoelstellingen tijdig te realiseren. Nu is het moment om onze unieke mogelijkheden te benutten. Het is noodzakelijk en het kan veilig.

Inhoudsopgave



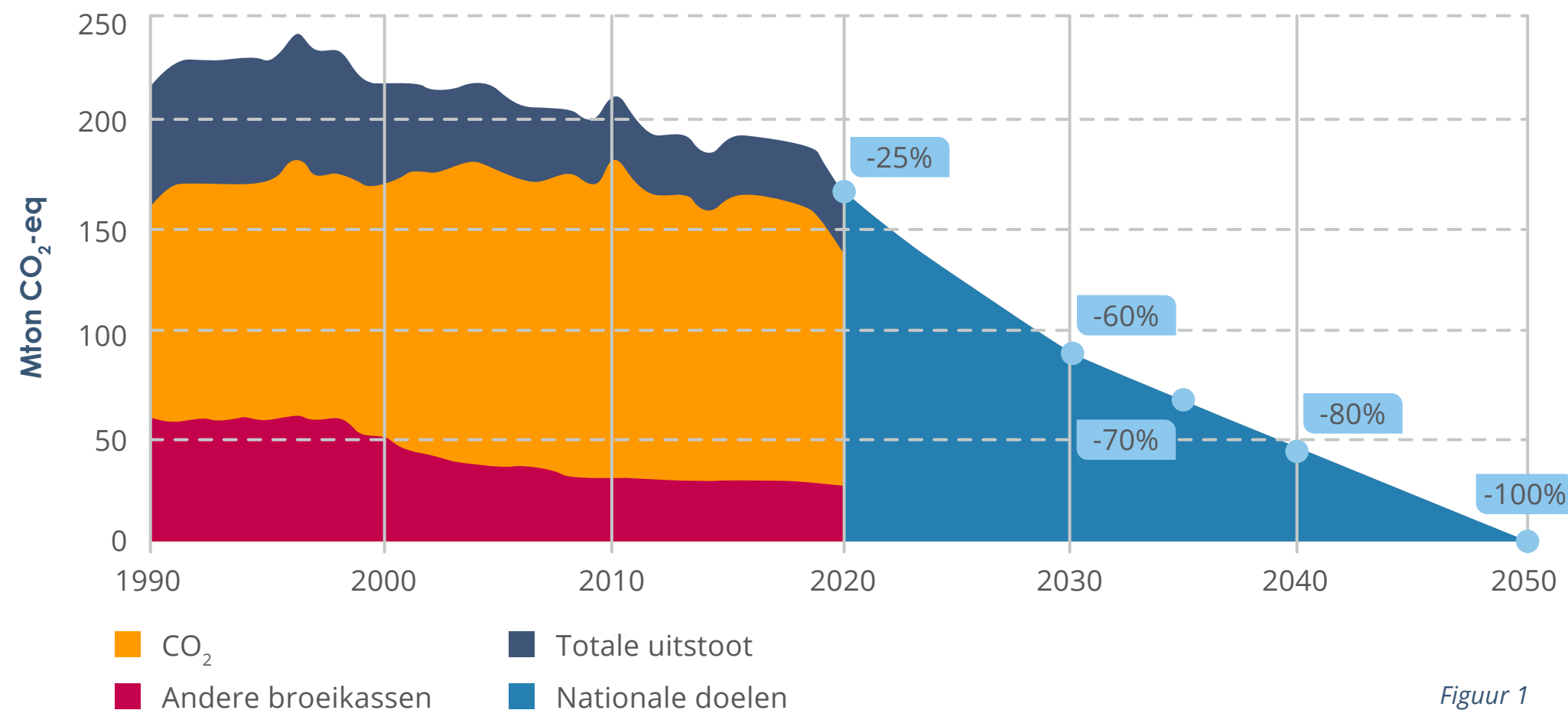
1. Geen tijd te verliezen; CCS in de energietransitie

Wereldwijd is er brede overeenstemming dat we de opwarming van de aarde moeten beperken tot 1,5 graad Celsius. Daarvoor moet de CO₂-emissie drastisch omlaag. Het ambitieuze doel van de Europese Unie is dat de uitstoot in 2030 55 procent minder is dan in 1990. Nederland gaat zelfs voor een afname met zestig procent. In 2050 wil Nederland klimaatneutraal zijn, dat betekent dat de CO₂-uitstoot nul is [1].

Om de doelen te bereiken, zijn tal van oplossingen nodig, zoals de transitie naar duurzame energiebronnen, energiebesparing en hergebruik van materialen. Ook afvang, transport en opslag van CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) wordt gezien als een belangrijke maatregel. Want verschillende studies laten zien dat CCS de snelste, meest haalbare en kosteneffectiefste methode is om op grote schaal CO₂-emissies te reduceren [2]. Het gaat hierbij voornamelijk om energie-intensieve bedrijven die voor 2030 niet (volledig) kunnen overschakelen op duurzame productiemethoden, onder meer omdat oplossingen niet op tijd beschikbaar zijn. Denk hierbij aan de productiebedrijven van staal, chemie, kunstmest en raffinaderijen.

CCS zorgt voor de noodzakelijke CO₂ -reductie en geeft bedrijven de tijd om toekomstbestendig te verduurzamen.

De beoogde reductie van broeikasgassen, vastgelegd in het Klimaatakkoord



Figuur 1

De technologie die is ontwikkeld voor afvang en transport van CO₂ kan bovendien dienen als facilitator van de waterstofeconomie [3], als opmaat naar het hergebruik van koolstof (Carbon Capture and Utilisation, CCU) en misschien zelfs voor het verwijderen van in de atmosfeer aanwezige CO₂ (Direct Air Capture).



2. Waarom **Nederland** uitermate geschikt is voor CCS

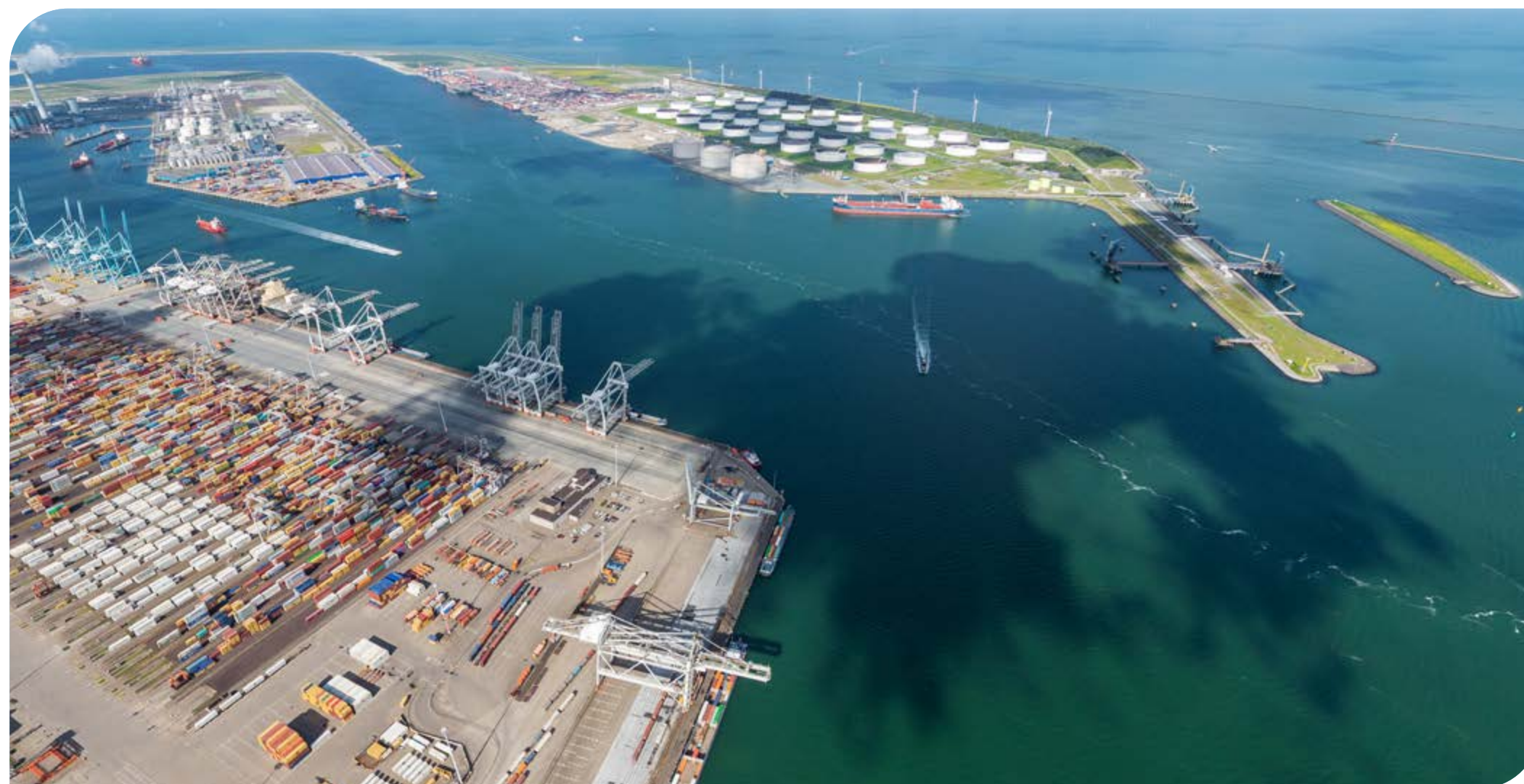
Nederland heeft een unieke positie binnen de Europese Unie voor de toepassing van CCS. Dat heeft een aantal redenen.

Ten eerste is de energie-intensieve industrie met grote CO₂-emissies geconcentreerd op enkele plekken. Daarnaast liggen deze industrieclusters relatief dicht bij de kust, wat gunstig is voor offshore opslaglocaties.

Nederland heeft onder de Noordzee namelijk een flinke opslagcapaciteit voor CO₂ in de vorm van lege olie- en gasvelden. Veel van de gas- en olievelden zijn aan het einde van hun economische levensduur en daardoor geschikt voor CO₂-opslag [4].

Ook de olie- en gasinfrastructuur is ideaal voor hergebruik voor transport en opslag van CO₂. Zo kunnen bestaande platformen worden gebruikt bij de injectie en monitoring van CO₂ in de ondergrondse velden.

En tenslotte kent Nederland uitstekende logistieke randvoorwaarden voor CO₂-transport. Denk aan de infrastructuur van pijpleidingstraten, waterwegen en havens voor vervoer van CO₂ via schepen.

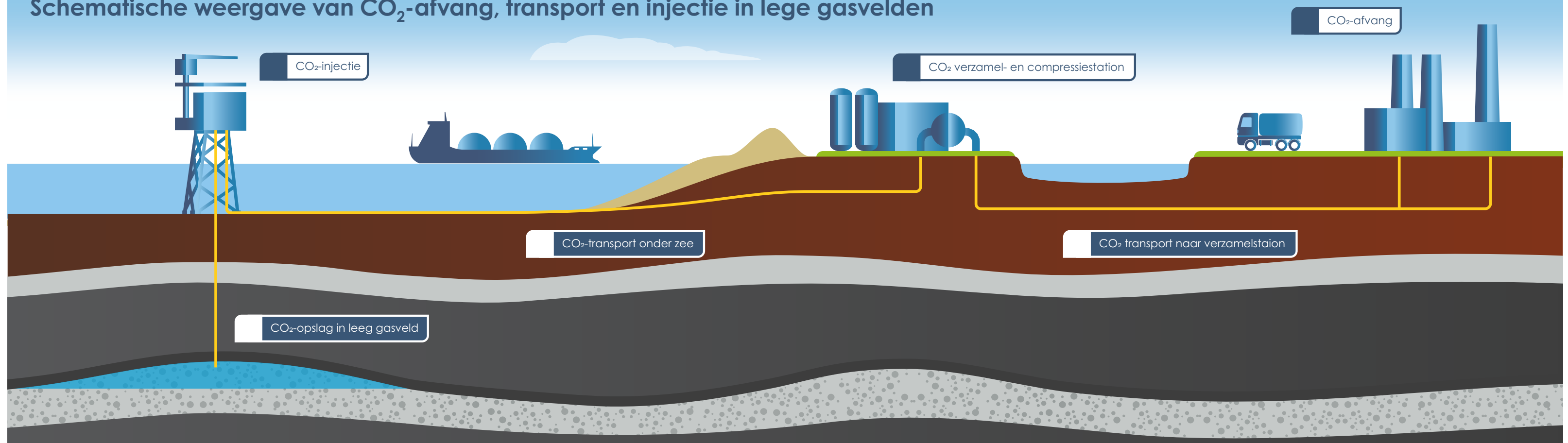


Dit alles maakt CCS kostenefficiënt (euro's per vermeden ton CO₂) ten opzichte van alternatieven voor het verminderen van CO₂-uitstoot [2].



3. **Waar staan we?** De eerste projecten voor CO₂-opslag onder de Noordzee

Schematische weergave van CO₂-afvang, transport en injectie in lege gasvelden



Nederland heeft veel geleerd over de opslag van CO₂. Zo hebben de CATO-programma's [5] veel informatie en inzichten opgeleverd, net zoals de test bij het K12-B veld in de Noordzee waar in 2004 de eerste CO₂ is opgeslagen. Een ander leerzaam traject was Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject (ROAD). De initiatiefnemers wilden CO₂ van een elektriciteitscentrale afvangen, transporteren en opslaan in lege gasvelden onder de Noordzee, maar in 2017 trokken zij zich terug [6]. De opgedane kennis leidde wel tot Port of Rotterdam CO₂ Transport Hub and

Offshore Storage, kortweg Porthos. Dit project wordt gezien als de springplank voor de ontwikkeling van een grootschalige CO₂-transport en -opslaginfrastructuur in Nederland. Een ander project in de Rotterdamse haven is Aramis.

Porthos

Porthos - een samenwerking van Havenbedrijf Rotterdam, Gasunie en EBN [7] - ontwikkelt een project met Air Liquide, Air Products, ExxonMobil en Shell in de Rotter-

damse haven. Bijzonder aan Porthos is dat het één van de eerste CCS-projecten is die zich richten op de CO₂-opslag van meerdere bedrijven en daarbij een open access benadering hanteert. Daardoor wordt een aanzienlijk kostenvoordeel behaald ten opzichte van op zichzelf staande projecten. Ook speciaal is de opslag van CO₂ in lege gasvelden, hetgeen wereldwijd nog niet op schaal is toegepast (afgezien van proefprojecten).

Hoe werkt het?

De bedrijven leveren hun afgevangen CO₂ via een verzamelleiding door het Rotterdamse havengebied aan een compressorstation. Daar wordt de CO₂ op druk gebracht zodat deze in het veld gepompt kan worden. Deze CO₂ gaat per onderzeese pijpleiding naar een platform in de Noordzee, circa twintig kilometer uit de kust. Vanaf het platform stroomt de CO₂ via putten in twee lege aardgasvelden die zich ruim drie kilometer onder de Noordzee bevinden. De lege gasvelden bestaan uit een laag poreus zandgesteente die wordt afgedekt door een dikke, ondoorringbare gesteentelaag.

Porthos gaat 2,5 megaton (Mt) CO₂ per jaar opslaan voor een periode van vijftien jaar. Ter vergelijking: de totale Nederlandse CO₂-emissies in 2020 bedroegen 165 Mt, waarvan 53 Mt vanuit de industrie kwamen. Het is de bedoeling dat de eerste CO₂ eind 2024/begin 2025 door Porthos wordt opgeslagen. Voordat een definitieve investeringsbeslissing genomen kan worden - naar verwachting in de tweede helft van 2022 - en de bouw van de installaties kan beginnen, moeten we wachten op de noodzakelijke vergunningen voor het project. Het technisch werk voor de voorbereidende fase van het project is afgerond.



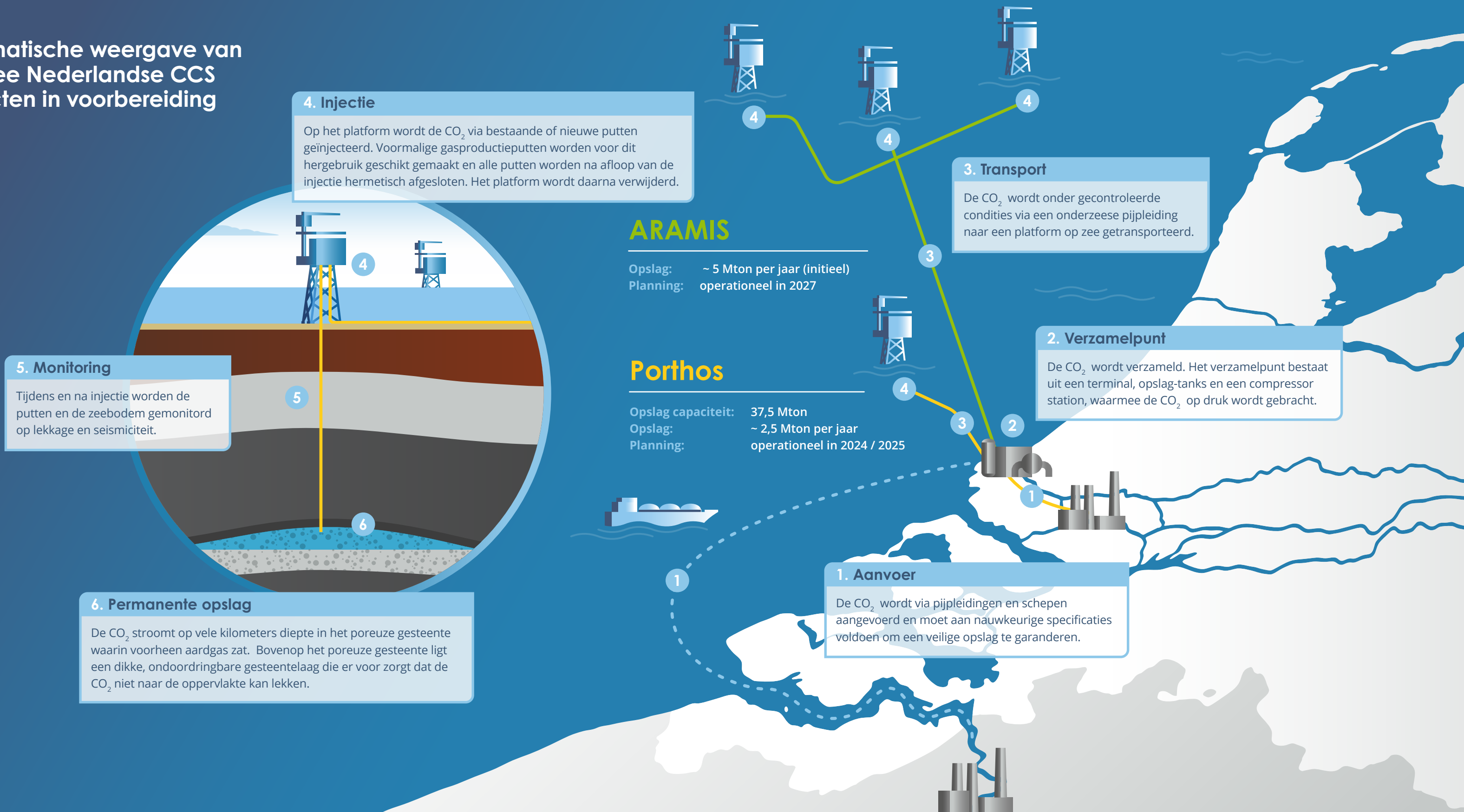
Aramis

Een tweede CCS-project in het Rotterdamse havengebied is Aramis. Deze publiek-private samenwerking van Gasunie, EBN, TotalEnergies en Shell wil een grootschalige CO₂-transportinfrastructuur ontwikkelen die opslag mogelijk maakt. Ook dit project is een open access systeem, waardoor het mogelijk is om stapsgewijs nieuwe industriële klanten en opslagvelden toe te voegen [8].

De CO₂ die de industrie afvangt kan via een transportleiding op land of per zeeschip naar een verzamelpunt

worden vervoerd. Het verzamelpunt omvat tijdelijke opslagtanks en een compressorstation van waaruit de CO₂ via een ondergrondse zeeleiding naar de opslagvelden gaat. Voor zowel het transport op land als een deel van de compressie wil Aramis gebruikmaken van het Porthos-systeem. Naar verwachting zal de Aramis CO₂-transportinfrastructuur initieel vijf megaton CO₂ per jaar naar de opslagvelden kunnen brengen. Het vergunningentraject is in 2021 gestart. Aramis streeft ernaar om in 2024 te beginnen met de bouw en in 2026-2027 de eerste CO₂ te transporteren.

Schematische weergave van de twee Nederlandse CCS projecten in voorbereiding





4. CO₂-opslag in lagedruk gasvelden: **hoe kan het veilig?**

Het technisch werk binnen Porthos laat zien dat CO₂-opslag in lege gasvelden op een veilige manier kan. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de onderzochte risico's en de maatregelen die we nemen om deze te mitigeren. De veiligheid van personeel en apparatuur zijn uiteraard ook belangrijk, maar laten we in deze whitepaper buiten beschouwing. Bij de CO₂-opslag kunnen we met dezelfde veiligheidsstandaarden werken die al decennialang succesvol gebruikt worden in de civiele industrie en in de olie- en gasindustrie.

4.1 De risico's en de maatregelen

In tabel 1 staan de operationele risico's die binnen Porthos geïdentificeerd zijn. Inclusief de belangrijkste maatregelen die we nemen om die risico's te reduceren.



Type	Risico	Mitigerende maatregelen
Geologische risico's	CO ₂ verlaat het opslagcomplex verticaal	<ul style="list-style-type: none"> • Selectie van gasvelden met een zeer robuuste afsluitende gesteentelaag • Druk in de gasvelden mag tijdens en na injectie niet hoger zijn dan hydrostatisch
	CO ₂ verlaat het opslagcomplex horizontaal	<ul style="list-style-type: none"> • Druk in de gasvelden mag tijdens en na injectie niet hoger zijn dan hydrostatisch
	Seismiciteit	<ul style="list-style-type: none"> • Druk in de gasvelden mag tijdens en na injectie niet hoger zijn dan hydrostatisch • Selectie van gasvelden waar tijdens gasproductie geen seismische activiteit is waargenomen
Integriteitsrisico's	CO ₂ verlaat het opslagcomplex langs de putten	<ul style="list-style-type: none"> • Het vooraf beoordelen van de integriteit van de putten • Het robuust afsluiten van de putten • De druk in de gasvelden mag tijdens en na injectie niet hoger zijn dan hydrostatisch
	Verlies van putintegriteit	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-specificaties van de bronstroom • Het vooraf beoordelen van de integriteit van de putten • Het gebruik van CO₂ resistente materialen in de putten
	Integriteitsverlies van (hergebruikte) infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-specificaties van de bronstroom • Gebruik van CO₂ resistente materialen • Het vooraf bevestigen van de integriteit van de hergebruikte infrastructuur
Injectiviteits risico's	Gereduceerde injectie debieten	<ul style="list-style-type: none"> • Keuze voor gasvelden met aangetoonde goede injectiviteit • CO₂-specificaties van de bronstroom • Robuuste operationele procedures teneinde hydraatvorming te voorkomen • Inbouwen buffer in injectieplan • Put-stimulaties of het boren van nieuwe putten
	Gereduceerde opslagcapaciteit	<ul style="list-style-type: none"> • Keuze voor gasvelden met aangetoonde goede injectiviteit • 'Base case' benut niet alle capaciteit van de gasvelden

Tabel 1

De maatregelen kunnen samengebracht worden tot vijf belangrijke aandachtsgebieden:

- De samenstelling van de bronstroom (zie 4.2)
- De geologische veldkeuze (capaciteit, afsluitende laag, injectiviteit, zie 4.3)
- De putintegriteit (zie 4.4)
- Het gebruik van CO₂-resistente materialen
- De operationele procedures (zie 4.5)

4.2 De samenstelling van de bronstroom

Het is belangrijk om zeer nauwkeurig vast te stellen wat de samenstelling van het gasmengsel is dat de emitter aanlevert. Componenten kunnen namelijk invloed hebben op het gedrag van het CO₂-mengsel, corrosie veroorzaken of toxisch zijn. In tabel 2 staan de specificaties die binnen Porthos gelden voor het gasmengsel, inclusief een toelichting.

De Porthos-specificaties zijn gebaseerd op ISO-27913, the International Standard for Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Pipeline transportation systems, first edition 2016-11-01 [9]. In deze standaard staan de minimale eisen. Wij hebben die aangescherpt aan onder meer de eisen in de opslagvergunning en aan de minimalisatie van condensatie en corrosie-risico en toxiciteits-

Component	Criterium (mole base)	Mitigerende maatregelen
CO ₂	≥ 95 %	
H ₂ O	≤ 70 ppm	Teneinde hydraatvorming en corrosie in het systeem te voorkomen
Som (H ₂ + N ₂ + Ar + CH ₄ + CO + O ₂)	≤ 4 %	Minimalisatie van twee-fase stroming. Lichtere componenten verhogen het bubbelpunt, het kritieke punt en/of het cricondenbar punt
H ₂	≤ 0,75 %	Ter voorkoming van H ₂ verbrossing van de pijpleidingen tijdens de gas fase
N ₂	≤ 2,4 %	
Ar	≤ 0,4 %	
CH ₄	≤ 1 %	
CO	≤ 750 ppm	
O ₂	≤ 40 ppm	O ₂ verhoogt corrosie risico d.m.v het voorkomen van de formatie van FeCO ₃
Totale hoeveelheid Zwavelhoudende componenten (COS, DMS, H ₂ S, SO _x , Mercaptan)	≤ 20 ppm Waarvan H ₂ S ≤ 5 ppm	H ₂ S: Giftig bij vrijkomen. Corrosief wanneer opgelost in water. SO _x : verlaagt de pH. Corrosief wanneer opgelost in water (SO ₂ + O ₂ -> SO ₃ ; SO ₃ +H ₂ O-> H ₂ SO ₄). Promoot de vorming van FeSO ₃ ·H ₂ O formatie, oplosbaar in water
Totaal aan NOx	≤ 5 ppm	Verlaagt pH. Corrosief wanneer opgelost in water
Totaal aan alifatische Koolwaterstoffen (C ₂ tot C ₁₀)	≤ 1200 ppm	Ter voorkoming/beperking vloeibare koolwaterstof fase
Totaal aan aromatische koolwaterstoffen (C ₆ tot C ₁₀ , incl. BTEX)	≤ 0,1 ppm	Ter voorkoming/beperking vloeibare koolwaterstof fase

Tabel 2

teit van het gas. Ook zijn de volgende voorwaarden meege-
wogen bij het ontwikkelen van de Porthos-specificatie:

- Het gas is geschikt voor injectie in het gasveld
- De integriteit van het transport en opslagsysteem is gegarandeerd
- Projectkosten zijn geoptimaliseerd voor zowel Porthos als de emitters
- De samenstelling van de bronstroom bij de emitters
- Compatibiliteit met het aanliggende OCAP-netwerk en met toekomstig hergebruik van CO₂
- Proces- en beroepsveiligheid en milieuaspecten

De componenten die een grote invloed hebben op bovenstaande criteria worden continu gemeten en gemonitord. Dit zijn CO₂, water, niet-condenserende gassen, zwavelcomponenten, NO_x, alifatische koolwaterstoffen, ethanol, methanol, aminen en glycols. Ook de dauwpunttemperatuur wordt gemeten en geborgd. Componenten met een lagere impact worden gemonitord via lab-metingen.

Component	Criterium (mole base)	Mitigerende maatregelen
Totaal aan volatiele organische componenten (excl. methaan, totaal alifatische koolwaterstoffen [C ₂ tot C ₁₀], methanol, ethanol, en aldehydes)	≤ 10 ppm	Polaire component, kan dauwpuntslijn beïnvloeden
Totaal aan aldehyde componenten	≤ 10 ppm	Polaire component, beïnvloedt de dauwpuntslijn
Ethanol	≤ 20 ppm	Polaire component, beïnvloedt de dauwpuntslijn
Methanol	≤ 620 ppm	Polaire component, beïnvloedt de dauwpuntslijn
Waterstof cyanide (HCN)	≤ 2 ppm	Ingeperkt vanwege gezondheidsredenen.
Totale amine componenten	≤ 1 ppm	Mogelijk corrosief en beïnvloedt de dauwpuntslijn
Totaal aan glycol componenten	Volgens dauwpunts specificatie	Polaire component, beïnvloedt de dauwpuntslijn
Ammonia (NH₃)	≤ 3 ppm	Polaire component, kan dauwpuntslijn beïnvloeden
Totaal aan Carboxylzuur en amide componenten	≤ 1 ppm	Polaire component, beïnvloedt de dauwpuntslijn
Totaal aan fosfor bevattende componenten	≤ 1 ppm	Mogelijk corrosief
Giftige componenten		Hoewel de CO ₂ en andere gassen zoals H ₂ en N ₂ op zich een risico op asfyxiatie met zich meebrengen wil Porthos ook de andere componenten in de stroom weten die een risico vormen voor persoonlijke veiligheid zodat dit meegenomen kan worden in de HSE policy
Dauwpunttemperatuur (voor alle vloeistoffen)	< -10 °C (bij 20 bara)	

Tabel 2

4.3 De geologische veldkeuze

Ook de veldkeuze is belangrijk om risico's te verkleinen. Als selectiecriteria kunnen gelden:

- Er is genoeg capaciteit om de CO₂ gedurende de hele projectperiode op te slaan.
- Het gesteente in het gasveld en de afdichtende laag is van afdoende kwaliteit.
- Afwezigheid van seismische activiteit tijdens de gaswinning.
- Integriteit van de bestaande putten en afwezigheid van putten met een hoog risico op lekkage.

Aspecten die niet samenhangen met veiligheid maar wel zeer belangrijk zijn bij de keuze van een opslagveld:

- Het veld is tijdig beschikbaar
- Afstand tot de kust dan wel de centrale infrastructuur, aangezien een grotere afstand betekent dat de kosten hoger zijn.

De opslagcapaciteit van het gasveld

Bij het bepalen van de capaciteit gebruiken we dynamische modellen, die de verspreiding van de CO₂ simuleren. Deze modellen worden gekalibreerd aan de hand van productiegeschiedenis van het aardgasveld. Omdat deze geschiedenis over meerdere decennia uitstrekt, zijn de modellen

erg betrouwbaar. Met de gekalibreerde modellen voorstellen we wat de totale hoeveelheid CO₂ is die gedurende de loop van een project veilig geïnjecteerd kan worden.

Hysteresis of compactie zou de opslagcapaciteit kunnen verminderen. In de Porthos-gasvelden verwachten we geen afname van capaciteit door hysteresis - het stijgen van het zoute water in het gesteente onder het veld. In bijna dertig jaar productietijd heeft het waterniveau de putten niet bereikt. Bovendien geven drukmetingen aan dat er geen sprake is van een actieve aquifer en dus geen instroom van water te verwachten is. We verwachten ook nauwelijks een reductie van capaciteit als gevolg van compactie - het samendrukken van het gesteente. Tijdens het leeghalen van het gasveld is gemeten dat de reductie van het poriënvolume van het gesteente ongeveer een procent is.

Met een zogenoemde materiaalbalans kunnen we het volume dat met de gekalibreerde dynamische modellen vastgesteld is, onafhankelijk controleren. Bij deze methode wordt het volume van het geproduceerde gas berekend en met een conversiefactor omgerekend naar het volume CO₂ dat in dezelfde ruimte kan worden opgeslagen. De conversiefactor is berekend op basis van druk en temperatuurgradiënten [10]. De gevonden waarden voor Porthos zijn in de tabel 3 weergegeven.

Gasveld	Materiaalbalans	Gekalibreerd dynamisch model
	Opslagcapaciteit [Mt]	Opslagcapaciteit [Mt]
P18-2	32,4	32,8
P18-4	8,8	8,6

Tabel 3

De verschillen in metingen tussen materiaalbalans en dynamische modellen zijn dus klein. Uiteindelijk zullen we nooit alle beschikbare capaciteit aan de markt aanbieden. Bij Porthos is ongeveer 37,5 Mt opslagcapaciteit gecontracteerd. Dit is een stuk minder dan de berekende capaciteit van 41,2 Mt (twee gasvelden, gemeten met materiaalbalans).

Bij Porthos is er niet voor gekozen om capaciteit te bepalen vanuit de zogenoemde statische volumes, gezien de grote representativiteit van het dynamisch vastgestelde volume. Het omrekenen van capaciteit vanuit statische volumes voegt meer onzekerheden toe dan dat het wegneemt.

De injectiviteit van de putten

De injectiviteit van de putten bepalen we op basis van welltest-data. Het resultaat wordt weergegeven in milli-Darcy-meter (mDm). In ruim veertig jaar is een schat aan data voor de productie van gas verzameld. Voor de injectie van CO₂ moeten we deze waarden omrekenen. Vanwege onzekerheden hierbij is naar ordegrootte gekeken. De waarden voor de Porthos-putten liggen in de orde van duizenden mDm's, veel hoger dan wat als ondergrens kan worden beschouwd (>100 mDm, [4]) en ook een orde groter dan veel andere offshore velden. De injectiviteit van de Porthos-putten is zodanig, dat onder normale omstandigheden drie van de vier beschikbare putten afdoende debiet kunnen leveren. De conclusie is dus dat de injectiviteit van de putten meer dan voldoende is voor een effectieve en veilige operatie.

Gesteentelaag in de Porthos velden	Put			
	P18-2A1	P18-2A3	P18-2A5	P18-4A2
Hardeggen	2,100	7,537	11,180	7,045
Upper Detfurth	750	8,687	9,600	295
Lower Detfurth	100	1,025	1,540	1,835
Volprie-hausen	200	177	555	
Totaal kh (mDm)	3,150	17,426	22,875	9,175

Tabel 4

De opsluiting van CO₂ in het gasveld

Dat de afsluitende laag van het gasveld ondoordringbaar is, is bewezen door de aanwezigheid van gas. Er zijn drie risico's die voor lekkages kunnen zorgen:

Lekkage door seismische activiteit

Hiernaar vindt voortdurend onderzoek plaats. Voorlopige resultaten bij Porthos geven aan dat slechts lokaal geringe verschuivingen te verwachten zijn. Het is onwaarschijnlijk dat dit leidt tot een lekpad. Er kan hooguit een effect

vergelijkbaar met dat van de micro-annuli langs de putten optreden (zie putintegriteit). Daarbij lekken slechts kleine hoeveelheden CO₂ weg. Deze CO₂ lost op in het zoute water dat in de bovenliggende gesteentelagen zit. Het zal de zeebodem niet bereiken.

Lekkage door (thermische) scheuring

Geomechanisch modelwerk voor Porthos laat zien dat er een maximale thermische scheuring optreedt van twintig meter in het afsluitende gesteente. Dit gesteente voor de velden P18-2 en P18-4 is vierhonderd tot zevenhonderd meter dik. Lekkage door scheuring is daardoor uitgesloten.

Lekkage langs de putten

Bij oude putten kunnen krimp-scheuren in het cement ontstaan, doordat het cement tijdens de CO₂-injectie afkoelt. Dat kan alleen een lekkage opleveren als de druk in het opslagveld hoger is dan de hydrostatische druk. Bij Porthos is bij de vergunningverlening bepaald dat de druk in het gasveld gedurende de injectieperiode nergens boven de hydrostatische druk mag uitkomen. Dit is ook niet nodig voor de volumes die Porthos op wil slaan. Los hiervan is het onwaarschijnlijk dat krimp-scheuren in het cement voor lekkages zorgen in een afsluitende laag

die vele honderden meters dik is (bij Porthos is de laag langs het boorgat dikker dan zeshonderd meter). Zelfs als er een lekpad van enkele millimeters zou ontstaan, is de hoeveelheid CO₂ die ontsnapt zeer klein. Voor Porthos is het lekvolume bepaald op 59 ton oftewel 0,0001 procent van het opslagvolume. Deze kleine volumes lossen op in het zoute water dat in de gesteentelagen boven de gasvelden zit. Al met al is het risico op lekkage dan ook nihil.

4.4 De putintegriteit

Uiteraard zullen alle nieuwe onderdelen van de putten gemaakt zijn van CO₂-resistent materiaal. Zo worden voor de nieuwe verbuizingen en Christmas-trees 25 Chrom en S13 Chrom legeringen gebruikt. Specifieke aandacht vraagt de Subsurface Safety Valve (SSSV), die ongecontroleerde uitstroom van CO₂ voorkomt. Bij een dergelijke uitstroom koelt de temperatuur flink af, tot -78 graden Celcius (het Joules-Thompson-effect). Daarom zijn SSSV's nodig die tegen lage temperaturen kunnen. Voor Porthos is zo'n klep ontwikkeld en succesvol getest. Bij het afhangen van de SSSV is een compromis gezocht tussen diepte (hoe dieper, hoe warmer, hoe gunstiger) en het af te blazen CO₂-volume boven de klep tijdens testprocedures

(ondieper is beter). Dit compromis is voor de Porthos-putten gevonden op duizend meter diepte.

De integriteit van bestaand cement in de putten wordt gewoonlijk geanalyseerd op basis van cement-bond-logs (CBL's). Dit is een directe meting. Bij Porthos is een alternatieve manier gebruikt aangezien er geen CBL's beschikbaar waren. Hier zijn de rapporten van de cementatie-operaties geraadpleegd. Daarbij is gekeken naar:

- Parameters tijdens de cementatie-operatie; die geven aan dat er geen problemen waren
- Het gebruik van casing centralisers
- Het gebruik van hole scratchers en toepassen van rotating/reciprocating handelingen tijdens het cementeren
- Succesvolle druktest op de verbuizingen
- Succesvolle formatiesterkte-test aan casing shoe of top van de liner
- Hard cement is aangetroffen aan casing shoe of top van de liner

Op basis van deze analyse is geconcludeerd dat de beoogde Porthos-putten veilig kunnen worden hergebruikt voor CO₂-injectie. Bovendien staan de putten onder voortdurende controle. De integriteit van de putten wordt tijdens en na de injectie continu gemonitord, de Christ-

mas-tree wordt regelmatig getest, de druk in de put wordt doorlopend gecontroleerd en daarnaast vindt vibratiemonitoring plaats middels distributed acoustic sensing (DAS). Elke vijf jaar vindt een diktemeting plaats van de binnenste verbuizing (tubing). Tenslotte worden stroommetingen gedaan die samen met temperatuur, druk en de samenstelling van het CO₂-mengsel gebruikt worden om een massabalans-analyse uit te voeren; afwijkingen kunnen duiden op een CO₂-lekkage.

Bij het afsluiten van de putten kijken we naar de NOGE-PA-standard 45 [11]. Deze schrijft voor dat voor het definitief afsluiten van putten een minimale cementlengte van honderd meter aanwezig moet zijn. Bij een mechanische barrière in de put is vijftig meter echter afdoende. Een casing of liner shoe aan de onderkant van de put is zo'n barrière. De Porthos-putten hebben die en worden daarom afgesloten met een full-bore formation plug (FFP) van vijftig meter lengte. Deze plug wordt gemaakt van CO₂-resistent cement, mogelijk in combinatie met traditioneel Portland-cement. Een FFP is een zeer solide maar ook dure methode, omdat de bestaande verbuizing weggeslepen moet worden voor het zetten van de cementplug. Deze operatie is lastig en kan makkelijk leiden tot het onbedoeld boren van een nieuw gat. We bevelen

daarom aan dat de industrie samen met de toezichthouder onderzoekt of een plug binnenin de put afdoende is als het cement aan de buitenkant van de put kwalitatief goed genoeg is bevonden.

4.5 De operationele procedures

Adequate operationele procedures zijn een voorwaarde voor veilige CO₂-opslag onder de Noordzee. De grootste problemen die kunnen ontstaan zijn:

Bevriezing van de vloeistof in de annuli

De ruimtes tussen de verbuizingen van de putten (annuli) kunnen bevroren door het afkoelende effect van CO₂. Dit wordt voorkomen door ervoor te zorgen dat de temperatuur aan de putmond niet onder nul graden Celsius kan komen. Primair gebeurt dit door de opwarming van het CO₂-mengsel in het compressorstation. In dit station ligt de temperatuur op tachtig graden. Tijdens het transport door de pijpleiding naar de putten koelt het mengsel af, maar als het bij de putten aankomt, is het nog altijd tientallen graden boven nul. Om warmteverlies te beperken, wordt de pijpleiding geïsoleerd.

Hydraatvorming in het systeem of in het gasveld

Bij Porthos zorgen we ervoor dat de temperatuur

onderaan de put nooit kouder is dan vijftien graden Celsius. Bij die temperatuur treedt geen hydraatvorming op. Uitgebreid flow assurance werk heeft aangetoond dat er binnen deze temperatuurrestricties afdoende werkbare operating envelopes zijn voor alle putten en flowcondities die we kunnen verwachten; voor iedere combinatie van druk in het veld en debiet is vastgesteld welke combinatie van putten gebruikt kan worden. Om hydraatvorming in pijpleidingen te voorkomen - bijvoorbeeld bij de verdeelkleppen op het platform – kunnen we in bepaalde situaties methanol injecteren. Dit is een veilige standaard procedure die ook vaak in de olie- en gasindustrie wordt toegepast.

De kans op hydraatvorming is het grootst als de druk in het gasveld het laagst is, dus aan het begin van injectie.

Bij Porthos wordt de CO₂ daarom initieel in warme, gasvormige toestand in het veld gepompt. De druk in de pijpleiding kan daardoor laag zijn (minder dan 65 bar), zodat de drukval naar het lagedrukgasveld minimaal en de temperatuurafname beperkt is. Pas als de druk in het veld is opgelopen tot 50 bar, is een hogere druk in de pijpleiding nodig. Er wordt dan overgegaan op vloeibare of dense injectie. Grote voordeel daarvan is dat dit met hogere snelheden gaat.

Tweefasegedrag van CO₂ in de pijpleidingen

CO₂ kan aanwezig zijn in gasvormige of vloeibare fase, afhankelijk van druk en temperatuur in de leiding. Dit tweefasegedrag moeten we voorkomen. Enerzijds vanwege het risico op krachten die ontstaan tijdens de

Injectieplan Porthos op basis van een TO en CO teneinde flow assurance risico's te minimaliseren

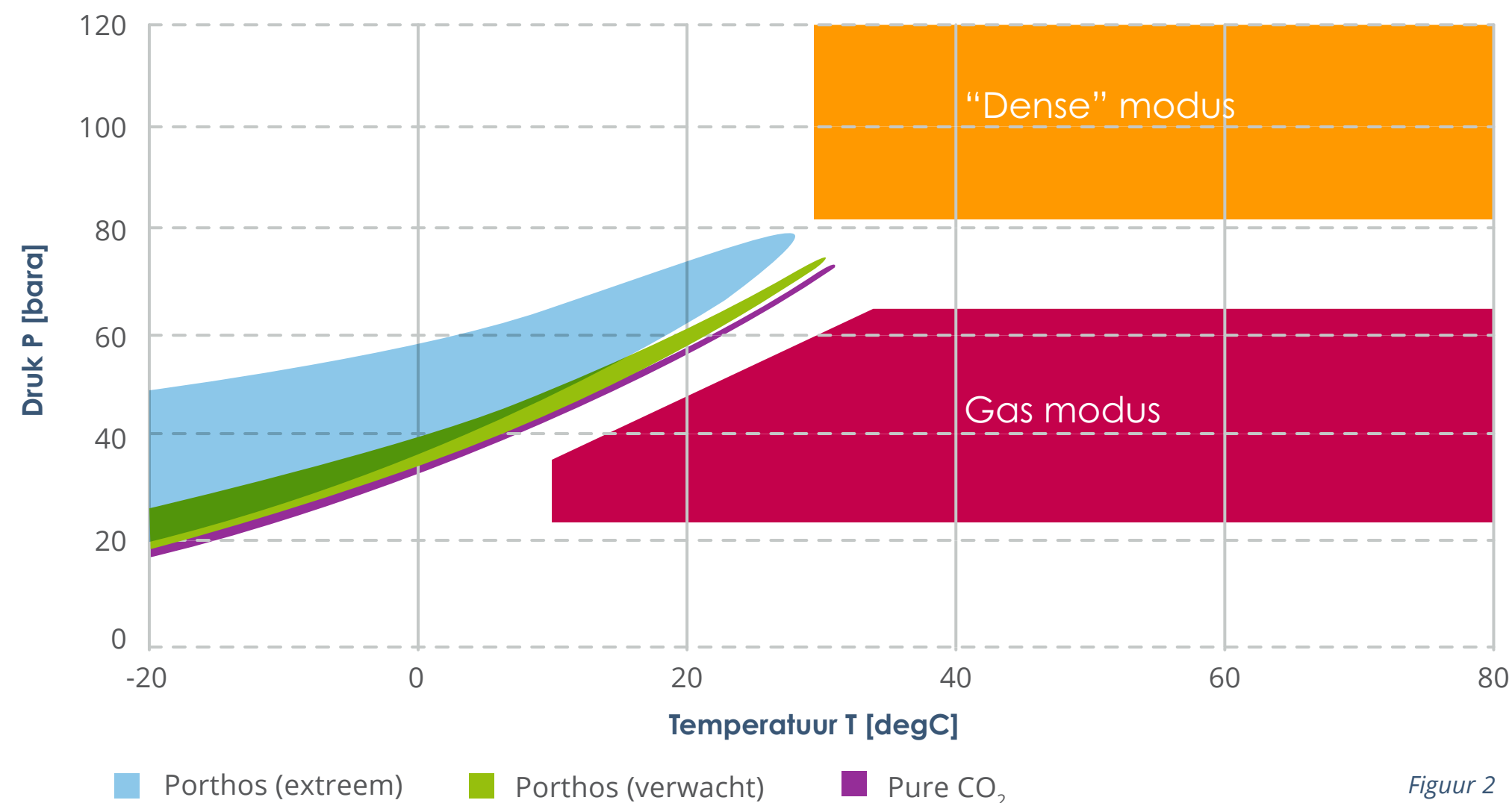
Fase	CO ₂ fase in HP pijplijn	Reservoir druk	Tijdsduur	Debiet
Technische Operatie	Gas	<50 bar	~1,75 jaar	0 – 220 t/u
Commerciële operatie	Vloeibaar	50 – 310 bar	~14 jaar	80 – 360 t/u

Tabel 5

fasewisseling, anderzijds vanwege de kans op neerslag van vloeibare onzuiverheden in de CO₂-stroom (bijvoorbeeld triethyleen glycol [TEG] en aminen). Tweefasegedrag komt in potentie alleen voor in de pijpleiding tussen het compressorstation en de putten, en in de putten zelf. Het transport naar het compressorstation gebeurt namelijk op lage druk (maximaal 35 bar). Dit is bestaande, niet gecompliceerde technologie [11], die een aantal specifieke veiligheidsmaatregelen bevat. Bij Porthos wordt gebruik gemaakt van cyclones om vloeistoffen en vaste deeltjes uit de CO₂-stroom te halen en van sifons om neergeslagen vloeistoffen op te vangen. Ook creëren we een buffer van vierhonderd tot achthonderd ton in de lagedrukpijpleiding. Hierdoor kunnen we een meer constante toestroom naar de putten garanderen.

We voorkomen tweefasegedrag door te opereren binnen nauwkeurig vastgestelde operationele gebieden. Tijdens de gasfase blijft de operationele druk vanaf het compressorstation onder 65 bar totdat de druk in de gasvelden opgelopen is tot vijftig bar. Daarna voeren we de pijplijndruk op tot minimaal 85 bar en maximaal 120 bar om de CO₂ met voldoende kracht in het veld te pompen (zie figuur 4).

Faseschema en operationele gebieden van de offshore pijpleiding van Porthos



Figuur 2

De lijngrafiek geven aan onder welke omstandigheden de overgang plaatsvindt van gasvormige CO₂ naar vloeibare CO₂. Dit gebied moet worden vermeden. Deze fasegrens (eigenlijk fasegebied) is afhankelijk van het CO₂-percentage

van het mengsel. Pure CO₂ is de paarse lijn, de groene lijn representeert 99 procent CO₂ in het mengsel (dit is de verwachte samenstelling bij Porthos) en de blauwe lijn geeft aan wat het overganggebied is voor een mengsel

van 95 procent CO₂. Dit is de limiet volgens de CO₂-specificaties; aangezien de emitters naar verwachting een marge zullen hanteren op de limietwaarde is het niet waarschijnlijk dat het uiteindelijke mengsel slechts 95 procent CO₂ zal bevatten. Deze lijn wordt daarom weliswaar als een extreem gezien, maar wordt toch vermeden om de risico's zo klein mogelijk te houden en de veiligheid te garanderen.

De eerste projecten zoals Porthos en Aramis gaan uit van nieuwe pijpleidingen, vooral omdat bestaande leidingen op de Noordzee nog volop gebruikt worden voor het vervoeren van aardgas. Op termijn, als alle gasproductie is gestopt, kan er voor hergebruik worden gekozen. Bij Porthos is de pijplijn relatief kort (twintig kilometer). De weinige pijplijnfrictie over deze korte afstand maakt gasvormige injectie mogelijk. Bij volgende projecten zoals Aramis kan deze afstand oplopen tot ongeveer tweehonderd kilometer. Hier is koude vloeibare injectie noodzakelijk. Hierbij ontstaan nieuwe technische uitdagingen, maar deze zijn op te lossen door de CO₂-stroom te verwarmen; dit is geen ingewikkelde technologie. Aangezien dit wel leidt tot hogere operationele kosten, wordt op dit moment door verschillende operators nadrukkelijk gekeken naar oplossingen die geen verwarming nodig hebben. Elke oplossing wordt altijd getoetst op veiligheid van het proces.

4.6 Monitoring

Tijdens en na injectie monitoren we de CO₂ in het systeem en in het gasveld om de veiligheid te garanderen. We monitoren op drie gebieden:

Monitoring op lekkage

Hierboven is al beschreven dat we de putten monitoren met het oog op lekkage. Daarnaast zijn ook aan de zeebodem metingen nodig. Voor Porthos gebruiken we geochemische metingen, een Van Veen Grijper (sediment, flora en fauna sampling) en side scan sonar.

Monitoring op de verspreiding van de CO₂ in het gasveld

We monitoren of de CO₂ in het gesteente overeenkomt met de voorspelling en beschrijven welke maatregelen we nemen als de afwijking te groot is. Als de operator kan aantonen dat het CO₂-mengsel zich gedraagt zoals voorspeld door de modellen, kunnen we aannemen dat de CO₂ opgesloten blijft binnen het complex. Bij Porthos meten we de:

- temperatuur langs het boorgat (distributed temperature sensing – DTS)
- druk onder in de put
- injectiestromen

- zogenoemde onverwachte downtime, dat wil zeggen de tijd dat de putten niet in bedrijf zijn. De mitigerende maatregelen liggen vooral in het aanpassen van de verdeling van de injectie over de putten, waarmee we ook de verdeling van de CO₂ over de gasvelden beïnvloeden.

Monitoring van seismiciteit

Wanneer er geen detecteerbare seismische activiteit is waargenomen tijdens de gasproductie, vallen de velden onder de categorie met verwaarloosbaar risico en is alleen monitoring via het regionale KNMI-netwerk vereist. Omdat het Porthos-veld dicht bij de kust ligt, kunnen we inderdaad gebruikmaken van het netwerk van de KNMI om seismische activiteit te meten. Bij velden verder uit de kust zal gebruik moeten worden gemaakt van een specifiek opgezet netwerk. Als alle CO₂ geïnjecteerd is en de putten afgesloten zijn, volgt een monitoringsfase van twintig jaar naar lekkage en seismiciteit. Daarna moet de vergunninghouder aan de staat voldoende financiële middelen beschikbaar stellen om nog eens dertig jaar te kunnen monitoren. Als dat is gebeurd, wordt de vergunning ingetrokken en gaat de aansprakelijkheid over naar de staat. Dit volgt uit artikel 31j van de Mijnbouwwet [12].



5. Conclusie

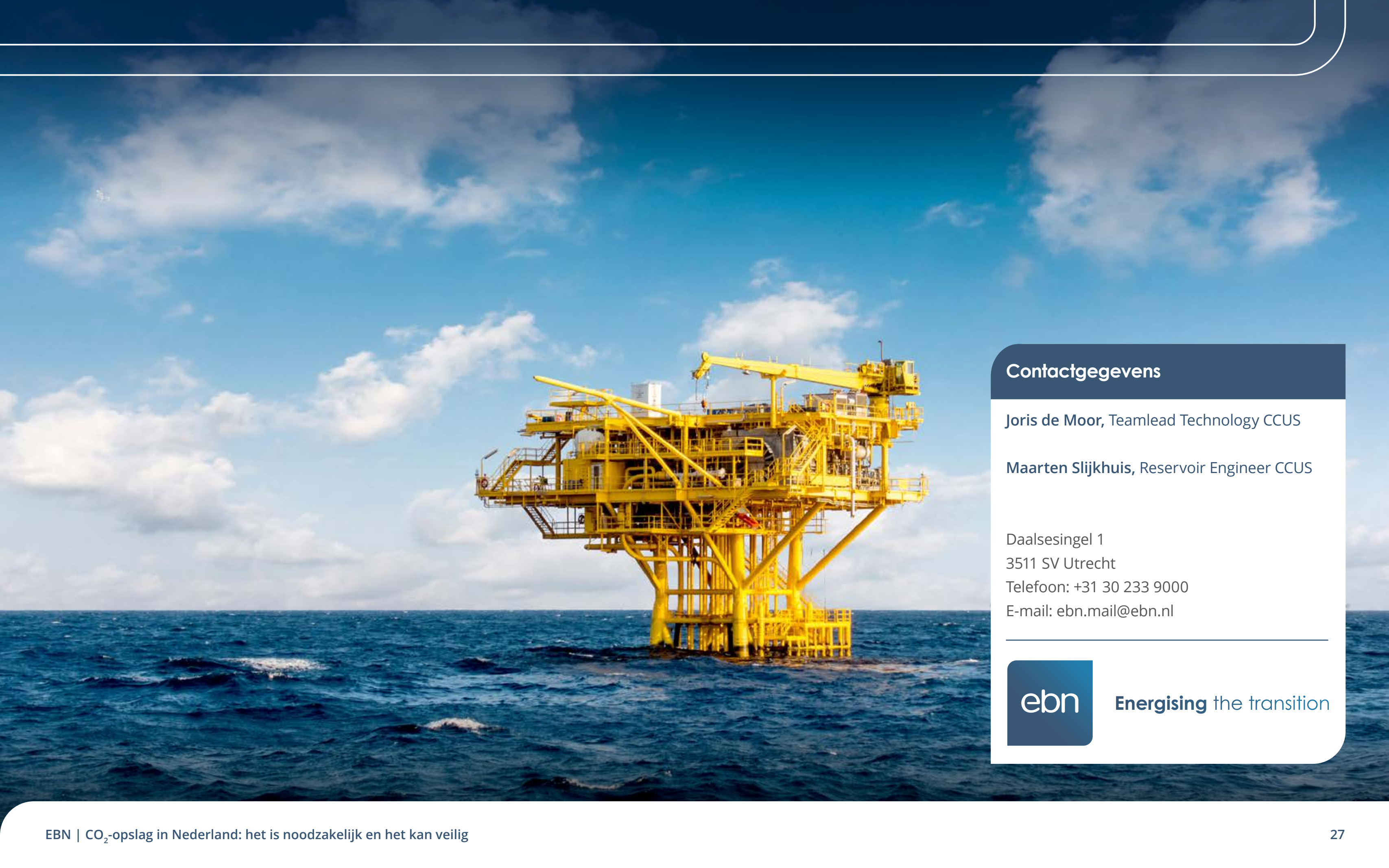
In deze whitepaper hebben we op hoofdlijnen aangegeven wat de technische risico's zijn van CO₂-opslag in lagedruk-gasvelden. Ook is beschreven hoe Porthos, als eerste project, deze risico's in kaart heeft gebracht en welke maatregelen genomen worden om de risico's te beperken dan wel te vermijden, zodat opslag veilig en efficiënt kan gebeuren.

Het is duidelijk dat CO₂-opslag een onmisbaar instrument is om de Nederlandse klimaatdoelstellingen tijdig te realiseren. Nederland beschikt over een unieke combinatie van geclusterde industriële emitters van CO₂ dicht bij de kust, een uitgebreide en herbruikbare infrastructuur die is gebouwd voor de productie van aardgas, alsmede de aanwezigheid van veel opslagcapaciteit in lege gasvelden. Nu is het moment om deze unieke mogelijkheden voor CO₂-opslag te benutten. Het is noodzakelijk en het kan veilig.



Referenties:

1. <https://www.rijksoverheid.nl/regering/coalitieakkoord-omzien-naar-elkaar-vooruitkijken-naar-de-toekomst/2.-duurzaam-land/klimaat-en-energie>
2. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/03/08/inventarisatie-kosteneffectiviteit-ccs-alternatieven>
3. <https://www.change.inc/energie/de-beloofte-van-blauwe-waterstof-en-het-afvangen-van-co2-wat-is-de-realiteit-37097>
4. Studie-Transport-en-opslag-van-CO₂-in-Nederland-EBN-en-Gasunie.pdf
5. <https://www.co2-cato.org/>
6. ROAD Close-out Report on CO₂ Storage (P18-4 en Q16-Maas)
[https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/09/ROAD-Close-Out-Report-on-CO₂-Storage-final.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/09/ROAD-Close-Out-Report-on-CO2-Storage-final.pdf)
7. CO₂-reductie door opslag onder de Noordzee - Porthos (porthosco2.nl)
8. <https://www.aramis-ccs.com/nl/>
9. ISO-27913, the International Standard for Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Pipeline transportation systems”, first edition 2016-11-01
10. Huijskes et al. A straightforward portfolio method to access the CO₂ storage potential of natural gas reservoirs
[https://www.researchgate.net/publication/349132032_A_Straightforward_Portfolio_Method_to_Assess_the_CO₂_Storage_Potential_of_Natural_Gas_Reservoirs](https://www.researchgate.net/publication/349132032_A_Straightforward_Portfolio_Method_to_Assess_the_CO2_Storage_Potential_of_Natural_Gas_Reservoirs)
11. <https://www.nogepa.nl/downloads/standards-guidelines>
12. wetten.nl - Regeling - Mijnbouwwet - BWBR0014168 (overheid.nl).



Contactgegevens

Joris de Moor, Teamlead Technology CCUS

Maarten Slijkhuis, Reservoir Engineer CCUS

Daalsesingel 1
3511 SV Utrecht
Telefoon: +31 30 233 9000
E-mail: ebn.mail@ebn.nl



Energising the transition