

# Eindrapportage CCUS

## Openbare Samenvatting

---

Projectnummer: TCCU117011

Projecttitel: *Een modulair, schaalbaar ontwerp voor het transporteren van CO<sub>2</sub> onder hoge druk over water*

Penvoerder: *Fizzy Transition Ventures B.V.*

---

Voor meer project-gerelateerde informatie kunt u kijken op de website [www.fizzytransition.com](http://www.fizzytransition.com) of kunt u direct contact opnemen met:

Ludo van Hijfte, Managing Director; [ludo@fizzytransition.com](mailto:ludo@fizzytransition.com)

Haije Stigter, Technical Director; [haije@fizzytransition.com](mailto:haije@fizzytransition.com)

---

Medeaanvragers: *Koninklijke Wagenborg B.V. & Koninklijke Niestern Sander B.V.*

Projectperiode: *1 februari 2018 tot en met 31 januari 2019*

---

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

## Samenvatting

De deelnemers hebben onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van een nieuw CO<sub>2</sub> transportsysteem over water met als doel een flexibel, betaalbaar alternatief te bieden voor pijpleidingen en andere voorgestelde scheepstransportconcepten. Het onderzoek heeft geleid tot een basisontwerp waarin uitsluitend gebruik wordt gemaakt van bestaande, beschikbare technieken en componenten, overwegend uit de olie- en gasindustrie. De technische haalbaarheid van het systeem is aangetoond en economisch kan het concurreren met bestaande of andere conceptuele transportsystemen. Het vervolg op deze studie is een gedetailleerd ontwerp waarna een demonstratieproject gerealiseerd kan worden.

Inhoud

Eindrapportage CCUS.....	1
Openbare Samenvatting.....	1
Samenvatting .....	1
Inleiding .....	3
Doelstelling .....	4
Resultaten .....	5
Projectresultaten.....	6
Discussie.....	11
Conclusie en aanbevelingen .....	11
Bijlage 1: Werkwijze volgens "van Gansewinkel" principe .....	13
Bijlage 2: Ontwerpprincipes CO2 transportschip .....	14
Bijlage 3: Argumentenkaart CO2 afvang en opslag .....	15
Bijlage 4: Wet en regelgeving.....	16
CO2 opslag (Nederland): .....	16
CO2 kwaliteit (Europa) .....	18
Bijlage 5: Nationale & internationale ontwikkelingen in CO2 transport over water.....	19
Nationale Ontwikkelingen.....	19
Internationale Ontwikkelingen.....	19
Benchmarking.....	20

## Inleiding

De opwarming van de aarde door een snelle toename van broeikasgassen in de atmosfeer is een wetenschappelijk erkend feit dat zorgt voor klimaatverandering. Om de gevolgen van klimaatverandering te beperken hebben 195 landen afspraken gemaakt om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen tot maximaal 2 °C met een ambitie voor maximaal 1.5 °C. De Nederlandse overheid heeft als doelstelling om de uitstoot van CO<sub>2</sub> (het belangrijkste broeikasgas) terug te brengen naar bijna nul in 2050, met een tussentijds doel van 49% reductie in 2030 ten opzichte van 1990. CO<sub>2</sub> afvang en opslag is een belangrijke techniek om deze doelstellingen te kunnen behalen en zal ook in Nederland op grote schaal moeten worden toegepast. De eerste poging om CO<sub>2</sub> in Nederland op te slaan was in een leeg gasveld bij Barendrecht. Dit project strandde op publieke weerstand en is stopgezet. Een tweede poging werd gedaan met het ROAD-project, dat uiteindelijk ook is stopgezet nadat twee deelnemers het consortium verlieten wegens onzekerheid over de toekomst van de CO<sub>2</sub> bronnen (kolencentrales). In dit rapport presenteren we de uitkomsten van het haalbaarheidsonderzoek naar het Fizzy CO<sub>2</sub> transport en opslag concept en laten we zien dat het mogelijk is om op korte termijn te beginnen met CO<sub>2</sub> opslag in offshore gas- en olievelden.

In de aanloop naar het Fizzy CO<sub>2</sub> transport/ "shipping" concept, als alternatief voor pijpleidingen, is uiteraard gekeken naar bestaande gas "shipping" opties waarbij gassen (bijvoorbeeld LNG of lpg) vloeibaar worden vervoerd door koeling en lichte compressie toe te passen. Alle bij ons bekende huidige CO<sub>2</sub>-scheepsontwerpen (meest recentelijk dat van het Nuon – Equinor, Shell, Total consortium) gaan uit van dit principe met enige variatie in druk-temperatuurcombinaties. De bekende ontwerpen maken gebruik van autonome tankers (voortstuwings, navigatie en accommodatie) met geïsoleerde, gekoelde ladingtanks op druk. Deze systemen vereisen in alle gevallen mechanische ondersteuning voor het "verplaatsen" van de lading met compressie of pompen, zowel bij laden als bij lossen.

Het Fizzy concept is geboren uit de ambitie om het transportsysteem zo simpel mogelijk te houden, door het scheiden van navigatie en voortstuwings van het ladingsysteem en door de lading onder dusdanige condities te vervoeren dat extra apparatuur (bijvoorbeeld verwarming en compressie) aan de ontvangende/ opslag zijde beperkt of geheel overbodig zijn. Het concept maakt gebruik van een duwboot met onafhankelijke duwbakken waarbij CO<sub>2</sub> onder hoge druk wordt vervoerd. Het systeem is modulair, schaalbaar, onafhankelijk van bron- of opslaglocatie en kan op kosten, flexibiliteit, CO<sub>2</sub> "footprint" en energie intensiteit concurreren met pijpleidingen.

In het afgelopen jaar is er door het consortium (Fizzy, Wagenborg en Niestern Sander) en externe technologiepartners (experts op het gebied van gas "process engineering" en offshore aanmeersystemen) hard gewerkt om dit concept verder te definiëren zodat de technische en economische haalbaarheid beter bepaald kunnen worden. Operationele en financiële gegevens

voor het economische model zijn gebaseerd op commerciële offertes en gedegen kostenramingen zodat de onzekerheidsmarges binnen acceptabele grenzen zijn komen te liggen. Daarom kunnen wij in dit stadium van het project nu al stellen dat het ontwerp verder uitgewerkt verdient te worden zodat vervolgens een demonstratieproject kan worden gerealiseerd.

## Doelstelling

Een probleem met transport van CO<sub>2</sub> vanaf een CO<sub>2</sub>-bron op land naar een offshore CO<sub>2</sub>-opslaglocatie is dat over het algemeen de beschikbaarheden en capaciteiten van CO<sub>2</sub>-bronnen en CO<sub>2</sub>-opslaglocaties variabel zijn. Wanneer voor dergelijk transport van CO<sub>2</sub> een techniek wordt toegepast gebaseerd op een pijpleidingtransportsysteem, waarbij een enkele CO<sub>2</sub>-bron (op land) met een enkele (offshore) CO<sub>2</sub>-opslaglocatie verbonden wordt door middel van een pijpleiding, maakt men een niet-variabele transportcapaciteit beschikbaar die over het algemeen te groot is in de vroege fases van de operationele levensduur van het pijpleidingtransportsysteem en die mogelijk te klein is voor latere fases van het pijpleidingtransportsysteem. Verder is het risico groot dat gedurende de geplande operationele levensduur van het pijpleidingtransportsysteem de CO<sub>2</sub>-bron (op land) of de (offshore) CO<sub>2</sub>-opslaglocatie niet meer beschikbaar is, waardoor een groot deel van het pijpleidingtransportsysteem vroegtijdig buiten gebruik raakt.

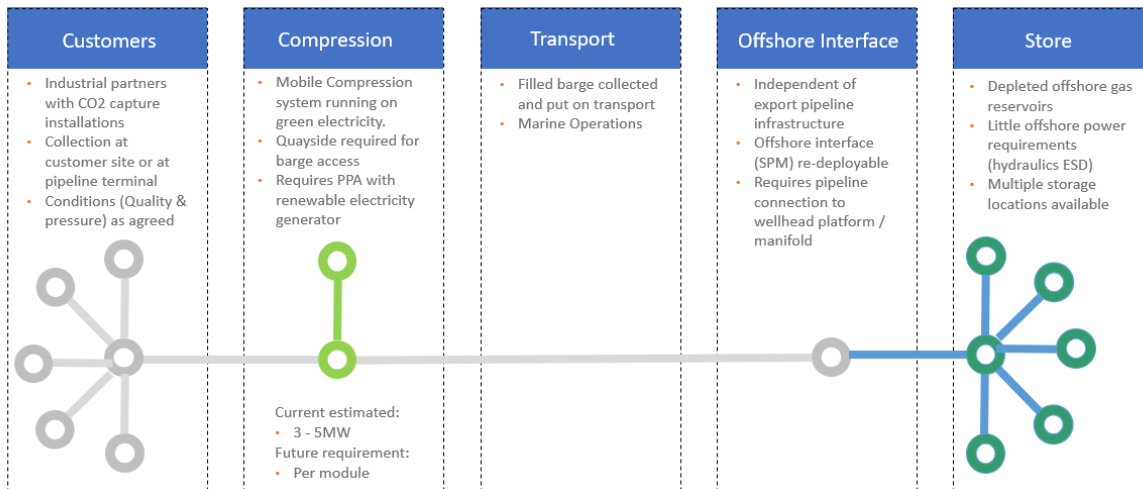
Wanneer een alternatieve techniek wordt toegepast waarbij CO<sub>2</sub>-bronnen en CO<sub>2</sub>-opslaglocaties worden verbonden door middel van een schip, of een vloot van schepen, ontstaan meer mogelijkheden om het transportsysteem aan te passen op de variabiliteit van beschikbaarheid en capaciteit van CO<sub>2</sub>-bronnen en CO<sub>2</sub>-opslaglocaties. Daarbij is echter bezwaarlijk dat de efficiëntie wordt beperkt door de lange laad- en lostijden waardoor transportschepen relatief veel stilliggen. Voorts is bezwaarlijk dat scheepsontwerpen voor CO<sub>2</sub>-transport over het algemeen gebruik maken van koeling om de dichtheid van de getransporteerde CO<sub>2</sub> te vergroten.

Hierdoor wordt de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het transportsysteem zelf verhoogd doordat tijdens het transport mogelijk (tijd en afstand afhankelijk) gekoeld moet worden, hetzij door gebruik van fossiele energie als krachtbron voor een koelinstallatie, hetzij door een deel van de CO<sub>2</sub>-lading naar de atmosfeer te laten ontsnappen waardoor een koelingseffect optreedt. Het doel van dit project is om een oplossing te verschaffen volgens welke CO<sub>2</sub> tegen lage kosten getransporteerd kan worden vanaf verschillende CO<sub>2</sub>-bronnen naar verschillende CO<sub>2</sub>-opslaglocaties, met schaalbare transportcapaciteiten en met minimale en uiteindelijk neutrale CO<sub>2</sub>-uitstoot door het transportsysteem zelf.

## Resultaten

De resultaten van het project samengevat hieronder in (A), zijn beschreven vanuit een technisch perspectief per project element, en globaal vanuit het niet-technische, wettelijke en economische perspectief voor het gehele project. De waardeketen met de project/ studie grenzen wordt weergegeven in de volgende illustratie:

### CO2 Collection, Transport & Storage Services From Source to Sink (S2S)



Illustratie 1: Waardeketen CO2 opslag

Het project beoogt aan te tonen dat het kan concurreren, vanuit een kostenperspectief, met een pijpleiding oplossing zoals het Porthos project van het havenbedrijf Rotterdam, Energiebeheer Nederland (ebn) en Gasunie. De studiegrenzen van het project zijn om die redenen vastgelegd van een bron (de vervuiler) tot aan de offshore opslaglocatie.

Bij de bron is een gangbare kade nodig waar een compressor op geplaatst wordt waarmee de transportschepen (duwbakken) worden geladen. Een geschikte opslaglocatie moet gereed gemaakt worden voor het ontvangen, afmeren, lossen en opslaan van de CO2. Hierbij zal gebruik worden gemaakt van een offshore gas reservoir met bestaande toegankelijke infrastructuur, d.w.z. een productieplatform met meerdere geschikte "operationele" productieputten. In de nabijheid van het platform wordt, op een veilige afstand (in de regel minimaal 3 scheepslengtes), een aanmeersysteem, of SPM (Single Point Mooring), geplaatst en wordt een verbinding gemaakt met de putten op het platform via een korte pijpleiding.

## Projectresultaten

De ontwerpen en analyses zijn gebaseerd op de aannames dat de bron zich in de haven van Rotterdam en de potentiële opslagslag locaties zich in het P-blok (als analoog voor Porthos met een verleende vergunning voor P-18) van het Nederlandse continentale plat bevinden. De bijbehorende afstanden, omgeving (metocean) condities, waterdieptes en geotechnische samenstelling ondergrond in namelijk belangrijk voor bepalen van transitietijden, SPM-ontwerp en systeem betrouwbaarheid, voornamelijk beïnvloed door golf, stroming en windcondities op locatie.

### 1. Technisch

Het project stoelt op 3 fundamentele elementen die individueel worden gepresenteerd:

1. Onshore Compressie
2. Transport: combinatie duwbakken (inclusief druk houdend systeem) met duwbotten ("pusher tugs")
3. Offshore lossen: SPM naar host locatie

Het is belangrijk te weten dat voor de alle projectcomponenten gebruik is gemaakt van gangbare en beschikbare technologieën en systemen.

**Onshore compressor** - Voor het laden van de tanks wordt, om de lading op druk te krijgen, gebruik gemaakt van compressie.

**Transport** – Het basisontwerp, zal worden voorzien van een druk houdend systeem voor opslag van CO<sub>2</sub> met inachtneming van de nodige veiligheidsmarges.

Vervolgens is onderzocht hoe praktisch en effectief het scheiden van enerzijds navigatie, voortstuwing en accommodatie functie met anderzijds de lading/ CO<sub>2</sub> opslag functie gerealiseerd kan worden. Hierbij zijn wij uitgekomen op de combinatie van duwboot en bakken (met een bescheiden vermogen boegschroef ten behoeve van veiligheid en manoeuvreerbaarheid) gebaseerd op de laatste generatie bestaande ontwerpen. Meerdere bakken kunnen worden bediend door 1 duwboot. Het Van Gansewinkel principe: een gevulde container ophalen en omwisselen voor een lege container.

In de originele projectplannen zou de duwboot na het aanmeren bij het offshore platform losgekoppeld worden en terugvaren met een lege, reeds geloste duwbak. Dit vraagt echter om maritieme operationele handelingen die in de praktijk nog nooit zijn uitgevoerd. Het loskoppelen en vervolgens weer aankoppelen van een duwbak is in een haven goed uit te voeren, maar vereist

verdere ontwikkelingen voordat het offshore mogelijk is. Wij hebben er daarom voor gekozen om de combinatie bij het offshore lossen gekoppeld te laten en alleen bij het laadpunt aan de kade te ontkoppelen.

**SPM** - De SPM offshore terminal keuze wordt voornamelijk bepaald door waterdiepte, bodemcondities en de "metocean" condities bij de opslaglocatie, de verwachte beschikbaarheid van het aanmeersysteem alsmede maritieme operationele aspecten. Op basis van twee "typische opslaglocaties" in de zuidelijke Noordzee zijn de mogelijke aanmeersystemen onderzocht. Het aanmeersysteem moet flexibel zijn, met een minimale "environmental footprint", en relatief eenvoudig op een alternatieve locatie geïnstalleerd kunnen worden.

## *II. Wettelijk en economisch*

Niet-technologische aspecten zijn onderzocht, deels via literatuuronderzoek en deels in een "non-technical risk" workshop met externe partijen. Uit dit onderzoek zijn geen opmerkelijke nieuwe zorgpunten naar boven gekomen, maar wel is duidelijk dat het project te maken heeft met een scala aan onderwerpen die het sociaal draagvlak voor CCS in het algemeen beïnvloeden. Deze worden goed samengevat in de "argumentenkaart CO<sub>2</sub>-afvang en opslag", gepubliceerd door De Gemeeynt in de CCS Routekaart 2018 (zie bijlage 3). Het project is daarom sterk afhankelijk van de ontwikkelingen op macroniveau. Enkele specifieke risico's en kansen die in de ontwerpfase van het project meegenomen dienen te worden zijn:

- Gebruik maken van de schoonste motoren voor het transport en duurzaam opgewerkte elektriciteit voor CO<sub>2</sub> compressie aan land teneinde de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van het transportsysteem zo snel mogelijk naar nul terug te brengen;
- Voor de persoonlijke veiligheid van personeel en omstanders dient het ontwerp van alle onderdelen in de keten uit te sluiten dat ruimtes bestaan waar mensen zich in zouden kunnen begeven en waarin CO<sub>2</sub> zich zou kunnen ophopen. CO<sub>2</sub> is een inert gas, maar kan dodelijk zijn wanneer het in hoge concentraties aanwezig is en zuurstof verdrift.

## *Onderzoek veilige opslag, overslag en vervoer CO<sub>2</sub>*

Op basis van toegepaste olie-, gas- en gasbehandelingservaring samen met uitgebreid literatuuronderzoek hebben we de belangrijkste risico's in kaart gebracht en mitigerende maatregelen onderzocht. We vatten de belangrijkste bevindingen samen:

In principe is gasopslag & transport onder hogedruk, in pijpleidingen, over land of over zee niet uniek en niet ongebruikelijk. De primaire risico's van gasbehandelings-, opslag- en transportoperaties hebben

te maken met lekkages (variërend van kleine continue lekkages die tot een groot gelekt volume kunnen leiden tot grote abrupte lekkages). Wij hebben in dit project te maken met CO<sub>2</sub>: een inert gas, d.w.z. niet ontvlambaar of explosief. CO<sub>2</sub> is zwaarder dan lucht en is een asfyxiant (verstikkend) gas en kan bij snelle expansie bevriezen en als zodanig letsel veroorzaken bij personen die ermee in aanraking komen dat vergelijkbaar is met brandwonden.

Het risico van lekkage uit het reservoir en de mogelijke lekpaden is "acceptabel en beheersbaar", mits het project ingericht wordt met gedegen reservoir management, de wettelijk verplichte ontwerpcriteria voor hogedruk systemen en voldoende lekkage-monitoring in de gehele keten. Een eventuele lekkage naar de atmosfeer moet hierdoor snel gedetecteerd kunnen worden zodat mitigerende maatregelen genomen kunnen worden om de hoeveelheid gelekte CO<sub>2</sub> te beperken waardoor wel emissies naar de atmosfeer kunnen plaatsvinden, maar risico's voor de volksgezondheid en voor personeel extreem laag blijven. Alle systeemcomponenten worden ontworpen voor de werkdruk met een ruime veiligheidsmarge en zullen gebruik maken van (overdruk) beveiligingen en druk-aflaatsystemen.

De benodigde beheers- en veiligheidsmaatregelen conform de af te geven vergunningen zullen worden bepaald aan de hand van gedetailleerde veiligheidsanalyses (QRA's, HAZOP's en HAZID's) bij het uiteindelijke gedetailleerde ontwerp.

## Wet en regelgeving

### CO<sub>2</sub> opslag (Nederland)

Relevante wet- en regelgeving over CO<sub>2</sub> opslag in Nederland is te vinden in de Mijnbouw- en Gas-wet en de "EC Directive for geological storage of CO<sub>2</sub>", samengevat in bijlage 6.

### CO<sub>2</sub> kwaliteit (Europees)

Richtlijnen over CO<sub>2</sub> kwaliteit worden gegeven in de "EC Directive for geological storage of CO<sub>2</sub>" (zie bijlage 2)

### CO<sub>2</sub> vervoer (internationaal)

Het vervoer van gassen in schepen wordt internationaal gereguleerd door de International Maritime Organization (IMO), via de "International Gas Code" (IGC). De IGC dekt ook CO<sub>2</sub> scheepstransport waarbij het op een aantal punten minder strikt is dan voor andere (brandbare) gassen. Deze regels zijn al sinds de jaren '60 van de afgelopen eeuw in werking. Scheepstransport van CO<sub>2</sub> wordt inmiddels al ruim 25 jaar zonder problemen uitgevoerd in relatief kleine, gekoelde tankers van haven naar haven.



Voor het lossen bij een platform op zee wordt gebruik gemaakt van bestaande technologie die ontworpen is voor het offshore laden van olietankers. Het lossen van CO2 op zee is wel een nieuw proces waarvoor bepaald moet worden welke regels van toepassing zijn.

## Benchmark met referentieproject

Er zijn twee bestaande manieren van CO2 transport: pijpleidingen (zowel op land als over de zeebodem) en gekoeld scheepstransport. Met deze methodes kan CO2 over of onder water vervoerd worden van een puntbron op land naar een haven of direct naar een offshore CO2 opslag (alleen met een pijpleiding).

Het Fizzy CO2 Transport en Storage systeem maakt gebruik van veel elementen die in de alternatieve oplossingen te vinden zijn, maar in een unieke combinatie waardoor het zich onderscheidt van gecomprimeerd gastransport via een pijpleiding of gekoelde vloeistof transport met schepen. De belangrijkste verschillen tussen de drie opties zijn weergegeven in onderstaande tabel:

	Fizzy Transport	Liquid Shipping Bestaand	Liquid Shipping Concepten	Subsea Pipeline
<i>Koeling nodig</i>	Nee	Ja		Nee
<i>Compressie nodig</i>	Lager	Nee		Hoger
<i>Compressie bij de opslag</i>	Nee	Ja		Soms
<i>Transportbak loskoppelen bij laden</i>	Ja	Nee		n.v.t.
<i>Transportcapaciteit schaalbaar</i>	Ja	Ja		Beperkt
<i>Minimum transportvolume benodigd</i>	Nee	Nee		Ja
<i>Transport van enkele bron naar haven</i>	Ja	Ja		Ja
<i>Transport van enkele bron naar opslag</i>	Ja	Nee	Ja	Ja
<i>Transport van verschillende bronnen naar verschillende opslagen</i>	Ja	Nee	Ja	Nee
<i>Energieverbruik</i>	Medium - Laag	Hoog		Hoog
<i>Complexiteit van het systeem</i>	Laag	Hoog		Laag

Tabel 1: Vergelijking shipping met pijpleidingconcepten

## Vergelijking met alternatieve CO2 transporttechnieken

Als onderdeel van de haalbaarheidsstudie is er (literatuur) onderzoek uitgevoerd naar de nationale en internationale ontwikkelingen betreffende CO2 transport. Specifiek gebruik makend van twee referenties: de ZEP (Zero Emission Platform) studie uit 2011 en de CATO (CO2 Afvang, Transport & Opslag), om de kostenvergelijkingen te maken met de gangbare alternatieven.

### Flexibiliteit

Het Fizzy systeem haalt de CO2 op bij de bron (kade nodig) en vervoert het vervolgens onder hoge druk direct naar een offshore opslaglocatie. Verschillende bronnen kunnen met verschillende opslaglocaties gekoppeld worden. Pijpleidingen kunnen hetzelfde, maar zijn beperkt tot een enkele bron verbinden met een enkele opslaglocatie. Wanneer bron of opslaglocatie veranderen moeten er significante investeringen gedaan worden om het pijpleidingsysteem aan te passen. Er zijn concepten voor vloeibaar scheepstransport die dezelfde flexibiliteit bieden als het Fizzy Transportsysteem, maar vooralsnog zijn er geen voorbeelden van zulke systemen in aanbouw of operationeel.

### Schaalbaarheid

Pijpleiding systemen worden ontworpen op toekomstige geprojecteerde capaciteit/ benodigd vermogen en behoeven een minimale doorstroomcapaciteit bij opstart. Minimum en maximum volumes liggen daarom vast. Scheepsoplossingen (zowel gekoeld als hoge druk) zijn modulair en schaalbaar en de transportcapaciteit is gebaseerd op de initiële behoefte en groeit mee met de werkelijke behoefte. Maximale capaciteit van een scheepstransportsysteem wordt bepaald door de beschikbare ruimte aan de kade en het aantal beschikbare offshore opslaglocaties, die beide (met extra investeringen) uitgebreid kunnen worden indien nodig.

### Complexiteit

De complexiteit van het Fizzy systeem is vergelijkbaar met een pijpleiding oplossing en maakt kostbare "liquefaction" met pompen en opslagfaciliteiten overbodig (die wel nodig zijn voor het laden en lossen bij gekoeld vloeibaar transport). Gezien het discontinue proces zijn er lagere compressorvermogens nodig dan voor een pijpleidingsysteem waardoor kleinere compressoren gebruikt kunnen worden. Het Fizzy systeem bevat wel extra handelingen voor het koppelen en ontkoppelen van duwboten en duwbakken.

### Samengevat

- 1) Fizzy's CO2 transport is uniek omdat het CO2 op hoge druk comprimeert, ongekoeld in duwbakken vervoert en direct bij de offshore opslag aanlevert waar het zonder extra compressor wordt geïnjecteerd. Het systeem vraagt, in vergelijking met de pijpleiding optie,

bescheiden compressievermogens en lost haar lading middels het drukverschil tussen schip en reservoir.

- 2) Er is geen directe vergelijking mogelijk met operationele systemen die dezelfde functionaliteit bieden, maar indirect kunnen we ons systeem vergelijken met CO<sub>2</sub> transport via pijpleidingen en met CO<sub>2</sub> transport in gekoelde schepen. In deze vergelijking is het Fizzy systeem in de basisuitvoering een aantrekkelijke optie voor de typische afstanden tussen grote bronnen aan de Nederlandse kust en de meeste gasvelden op het Nederlandse deel van de Noordzee.

## Discussie

Het voorgestelde basissysteem voor transport van CO<sub>2</sub> naar offshore opslaglocaties is een eerste stap op weg naar een toekomst waarin een vloot van schepen verschillende bronnen met verschillende offshore opslagen, ofwel afnemers van CO<sub>2</sub> die ze als grondstof gebruiken, zullen verbinden. De uiteindelijke samenstelling van deze vloot moet geoptimaliseerd worden om zoveel mogelijk CO<sub>2</sub> tegen zo laag mogelijke kosten naar de beschikbare opslaglocaties en toekomstige afnemers te brengen. De doelstelling van de Nederlandse overheid om 20 miljoen ton CO<sub>2</sub> per jaar offshore op te slaan zou met Fizzy's basisontwerp te realiseren zijn.

## Conclusie en aanbevelingen

De haalbaarheidsstudie heeft aangetoond dat het voorgestelde CO<sub>2</sub> transportconcept technisch en economisch haalbaar is.

## Mogelijkheden voor spin-off

Dit project heeft aangetoond dat een vervolgproject waarin het gedetailleerde ontwerp wordt uitgewerkt en de daaropvolgende realisatie waardevolle bijdragen kunnen leveren aan de Nederlandse klimaatdoelstellingen. Ook heeft het concept grote potentiële exportwaarde voor de BV Nederland bij toepassing in andere Noordzeelanden (het VK, Denemarken, Noorwegen) of elders in de wereld waar een concentratie aan vervuilers zich aan de kust of bevaarbaar binnenwater bevinden en waar een offshore infrastructuur van olie- en gasfaciliteiten aanwezig is (bijvoorbeeld in de Golf van Mexico regio: VS en Mexico, Zuidoost-Azië: Maleisië en Brunei). Ook kan het systeem worden ingezet bij offshore conversie van duurzaam opgewekte elektriciteit naar bijvoorbeeld waterstof.

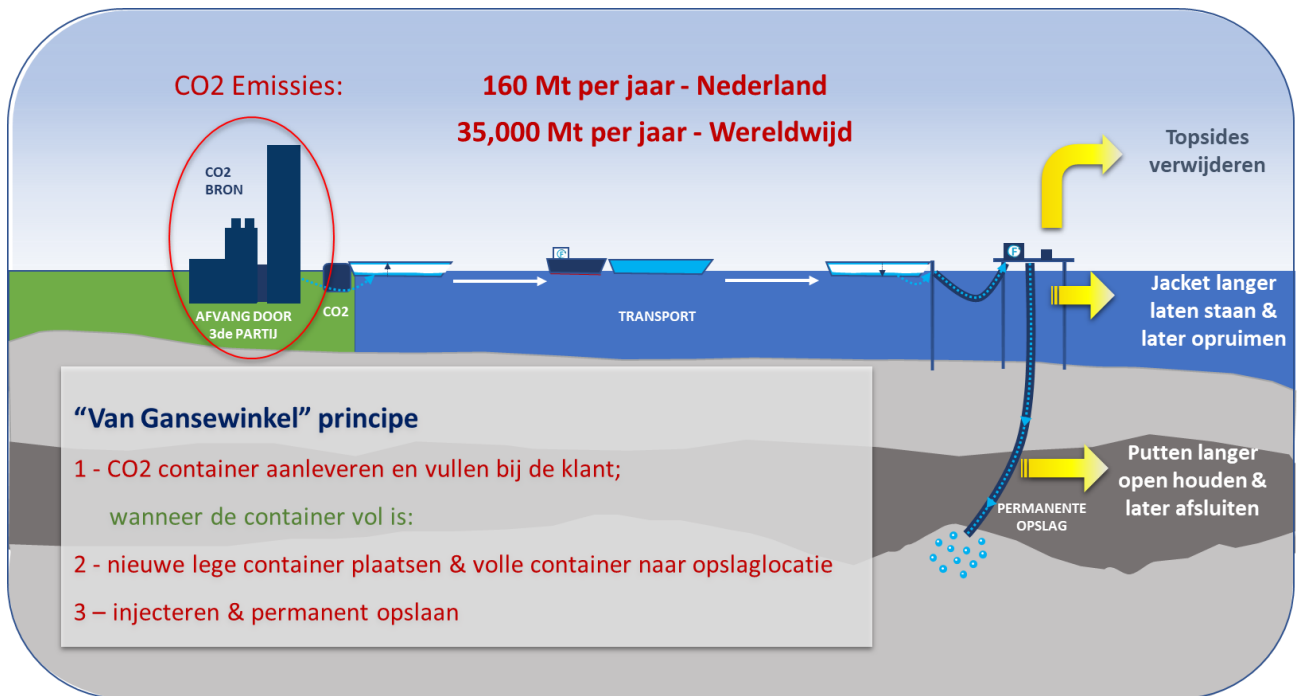
## Bijlagen

1	Werkwijze volgens “van Gansewinkel” principe .....	13
2	Ontwerpprincipes CO2 transportschip .....	14
3	Argumentenkaart CO2 afvang en opslag .....	15
4	Wet en regelgeving .....	16
5	Nationale & internationale ontwikkelingen in CO2 transport over water .....	19

## Bijlage 1: Werkwijze volgens “van Gansewinkel” principe

Het CO<sub>2</sub> ophaal, afvoer en opslag “Van Gansewinkel” principe werkwijze (operationele stappen):

1. Een modulair compressor systeem wordt bij de CO<sub>2</sub> bron geplaatst;
2. Een lege bak, wordt afgeleverd en aangesloten op de compressor;
3. De aangeleverde CO<sub>2</sub> wordt door compressie en koeling op juiste druk en temperatuur gebracht
4. De lege bak wordt geladen met CO<sub>2</sub> onder hoge druk;
5. De volle bak wordt met behulp van de duwboot omgewisseld voor een lege bak;
6. De gekoppelde combinatie duwboot en bak gaat op transport richting offshore locatie;
7. De combinatie wordt afgemeerd aan de SPM op locatie;
8. De volle bak wordt via een (flexibele) pijpleiding aangesloten op de SPM;
9. De kleppen/ afsluiters van de putten op het platform worden hydraulisch op afstand geopend
10. De bak wordt gelost door de druk gecontroleerd te laten afnemen totdat deze gelijk is met de druk op de injectieput waarna de kleppen worden gesloten;
11. De “lege” bak wordt ontkoppeld van de SPM en vaart terug naar de CO<sub>2</sub> bron.

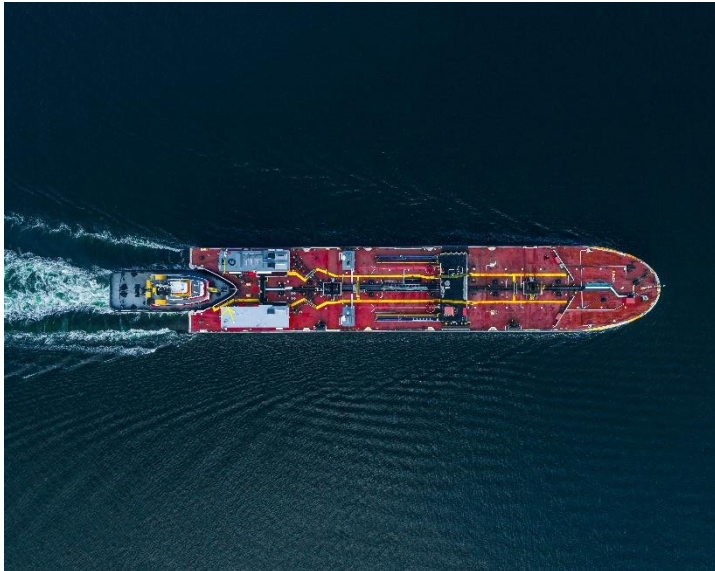


Illustratie 2: Schematisch overzicht van het “Van Gansewinkel” principe voor CO<sub>2</sub>

## Bijlage 2: Ontwerpprincipes CO2 transportschip

Het scheiden van het dure machinegedeelte van de laadruimte biedt verschillende voordelen in vergelijking met conventionele schepen, een van de belangrijkste is het vermogen om te werken volgens het "van Gansewinkel" -principe dat de doorlooptijd in de haven voor de duwboot (pusher tug) en zijn bemanning tot een minimum beperkt.

### **Praktijkvoorbeeld duwboot-duwbak:**



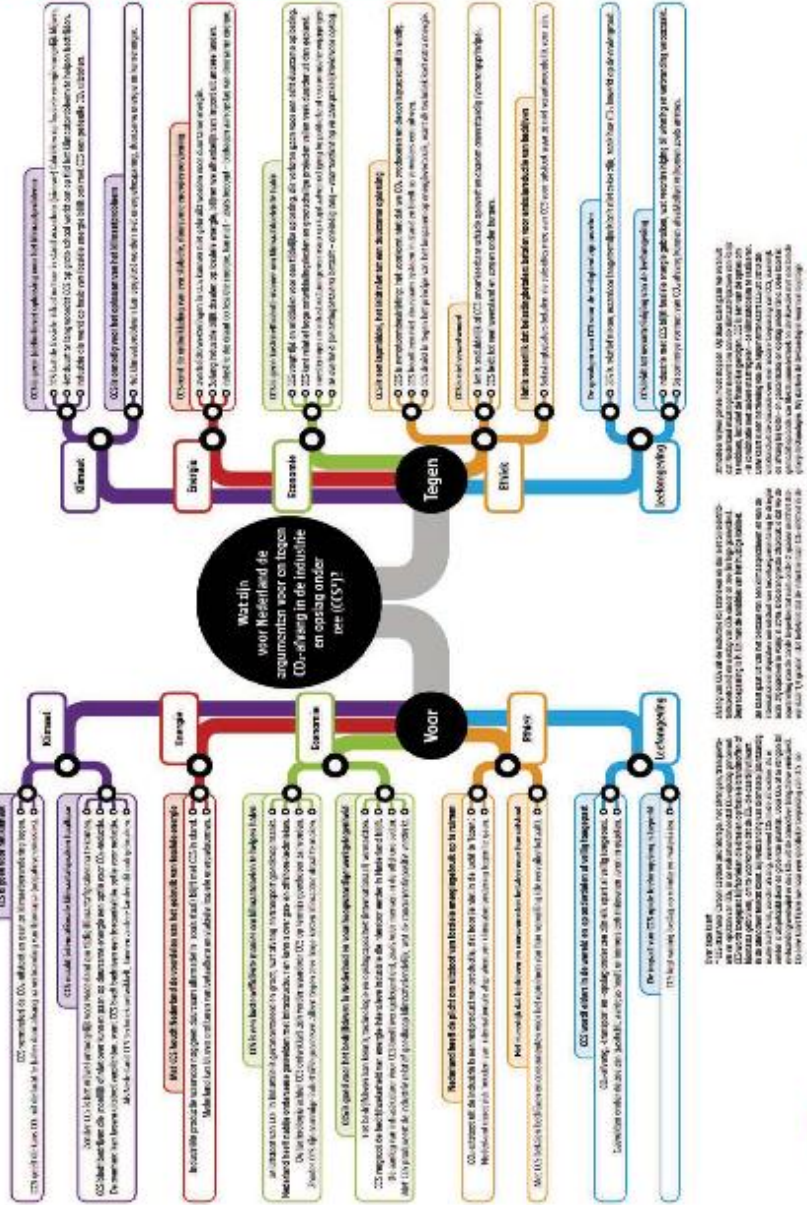
Wanneer een duwboot-combinatie aankomt in een haven, wordt het volledig geloste vaartuig verlaten om te laden, terwijl de duwboot een volle ophaalt en weer vertrekt. Naast het verminderen van niet-winstgevende wachttijden, biedt dit werkprincipe meer tijd voor het laden van de bak (of bakken). Een geïntegreerd duwboot-bak systeem heeft ook verschillende technische voordelen in vergelijking met sleepboten. De geringe lengte van traditionele sleepboten resulteert in een relatief hoge weerstand tegen golven en de bakken die in het kielzog van de sleepboten worden voortgetrokken, hebben schachten die de richtingsstabiliteit verbeteren maar de weerstand vergroten en daarbij de (brandstof) efficiëntie verlagen. Het positioneren van de sleepboot achter het schip in een strenge inkeping verbetert de hydrodynamische efficiëntie van de combinatie, resulterend in aanzienlijke reducties in de totale weerstand. Bovendien heeft de sleepboot, die in het kielzog van het schip vaart, betere controle over de combinatie en verbetert dus de zeewaardigheid en manoeuvreerbaarheid in vergelijking met de traditionele sleepinrichting.

# Bijlage 3: Argumentenkaart CO2 afvang en opslag



## Bijlage V: Argumentenkaart

### Argumentenkaart CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (CCS#)



## Bijlage 4: Wet en regelgeving

### CO2 opslag (Nederland):

Relevante wet en regelgeving is te vinden in de mijnbouwwet: <http://wetten.overheid.nl/BWBR0014168/2018-07-01>.

Voor het bouwen van een CO2 opslag is het proces als volgt samen te vatten:

- 1) Vraag een vergunning aan voor het opsporen van CO2-opslagcomplexen; wanneer succesvol aangetoond kan worden dat een CO2-opslagcomplex gevonden is dan kan een vergunning voor permanente opslag aangevraagd worden.

*Artikel 26a (1): Onverminderd artikel 26, zesde en zevende lid, wordt de houder van een vergunning voor het opsporen van CO2-opslagcomplexen die met gebruikmaking van die vergunning de geschiktheid van een voorkomen voor permanent opslaan van CO2 heeft aangetoond, op zijn aanvraag, ingediend gedurende de geldingsduur van die vergunning, een opslagvergunning voor het aangetoonde opslagvoorkomen verleend.*

- 2) Een vergunning voor permanente opslag wordt verleend indien de aanvraag voldoet aan een reeks eisen (artikel 31b):

*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.*
- 3) De Minister neemt een besluit binnen 10 maanden na ontvangst van de aanvraag
- 4) De vergunning wordt ingetrokken (d.w.z. het project wordt beëindigd) wanneer:
- a. *door de houder van een vergunning voor permanent opslaan van CO2 schriftelijk is aangetoond dat het opgeslagen CO2 volledig en permanent ingesloten blijft,*
  - b. *het opslagvoorkomen is afgesloten en de injectiefaciliteiten met de bijbehorende bovengrondse voorzieningen zijn verwijderd,*
  - c. *na het tijdstip waarop het opslagvoorkomen is afgesloten en de bijbehorende bovengrondse voorzieningen en injectiefaciliteiten zijn verwijderd een periode van tenminste 20 jaar is verstreken of zoveel korter of langer als naar het oordeel van Onze Minister, gelet op onderdeel a, verantwoord is, en*
  - d. *de houder, bedoeld in onderdeel a, hem een financiële bijdrage ter beschikking heeft gesteld waarmee de voorziene kosten, doch ten minste de geraamde monitoringskosten gedurende een periode van 30 jaar, ingaande op het tijdstip van intrekking worden gedekt.*

Onder de huidige wetgeving blijft de vergunninghouder daarom nog 50 jaar na afsluiting van de putten verantwoordelijk (20 + 30, artikel 31j en 31L-6 en 31L-7).

5) Een houder van een vergunning voor het permanent opslaan van CO<sub>2</sub> en een exploitant van een transportnetwerk zijn verplicht op voorwaarden die redelijk, transparant en niet-discriminerend zijn voor degene die daarom verzoekt CO<sub>2</sub> in zijn opslagvoorkomen op te slaan respectievelijk door zijn transportnetwerk te transporteren (artikel 32)

Voorlopige concluderen wij dat de bestaande wetgeving logisch en uitvoerbaar is, maar dat de 50-jarige aansprakelijkheid mogelijk een obstakel voor de uiteindelijke implementatie kan vormen.

## CO<sub>2</sub> kwaliteit (Europa)

Richtlijnen over **CO<sub>2</sub> kwaliteit** worden gegeven in de "EC Directive for geological storage of CO<sub>2</sub>" (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0031>):

*Een CO<sub>2</sub>-stroom moet voor het overgrote gedeelte bestaan uit kooldioxide. Om dat te waarborgen, mag geen afval of ander materiaal worden toegevoegd met het doel zich van dat afval of ander materiaal te ontdoen. Een CO<sub>2</sub>-stroom kan evenwel incidentele aanverwante stoffen van bepaalde uit de bron of het afvang- of injectieproces [vrijgekomen stoffen, red.] bevatten, alsmede spoorelementen die zijn toegevoegd als hulpmiddel bij de monitoring en het controleren van CO<sub>2</sub>-migratie. De concentratie van alle incidentele en toegevoegde stoffen mag geen niveaus overschrijden die:*

*a) de integriteit van de opslaglocatie of van de relevante transportinfrastructuur in het gedrang brengen;*

*b) een significant risico voor het milieu of de volksgezondheid vormen, of*

*c) in strijd zijn met de voorschriften van de toepasselijke Gemeenschapswetgeving.'*

## Bijlage 5: Nationale & internationale ontwikkelingen in CO2 transport over water

### Nationale Ontwikkelingen

Hoewel er in Nederland al jaren veel onderzoek gedaan wordt naar CCS (onder andere binnen het CATO-programma) zijn er nog weinig projecten gerealiseerd. Wel is er veel nuttige kennis ontwikkeld bij projecten die vroegtijdig zijn gestopt, zoals ROAD, Barendrecht en Noord-Nederland (Borg/RWE/Nuon).

Al sinds 2005 wordt op het Nederlands deel van het continentaal plat op gasproductieplatform K12-B de CO2 uit het geproduceerde aardgas verwijderd en in het gasveld geïnjecteerd. Technisch gezien is hiermee al langere tijd ervaring opgedaan met CO2-behandeling, -injectie en opslagmonitoring.

### Internationale Ontwikkelingen

De belangrijkste ontwikkelingen hebben de afgelopen jaren voornamelijk in het buitenland plaatsgevonden. Er zijn verschillende grootschalige projecten van start gegaan in Canada, Australië, China en de VS. Het Global CCS Institute (GCCSI) houdt een up-to-date overzicht bij op haar website van alle projecten wereldwijd.

Om de ontwikkelingsfase waarin CCS zich bevindt te duiden, is het belangrijk om CCS op te delen in de verschillende deeltechnieken: afvang, transport en opslag. Vervolgens kan ieder van deze technieken weer verder worden onderverdeeld. In het algemeen kan worden gesteld dat de hele CCS-keten (afvang, transport en opslag) gerealiseerd kan worden met bewezen technieken. Met een bredere toepassing van deze technieken kunnen er bovendien nog efficiëntieverbeteringen verwacht worden. Voor nieuwe toepassingen en voor grotere verbeteringen (en kostenreducties) zijn er ook meer innovatieve technieken die zich nu nog in vroegere stadia van ontwikkeling bevinden. Sommige van de nu voorgestelde demonstratieprojecten bevatten deeltechnieken die vallen in de zogenaamde 'valley of death' voor innovatieve projecten. Dat wil zeggen dat de schaalgrootte al wel zodanig is dat de investeringskosten significant zijn, maar dat de technologie niet uitontwikkeld is en de (technologische en financiële) risico's dus nog aan de hoge kant zijn. Veel innovaties blijven steken in deze fase van hun ontwikkeling omdat de risico's onvoldoende afgedekt kunnen worden. In het geval van CCS betreft dit niet alleen technische risico's maar ook bijvoorbeeld regelgevingsrisico's, zoals onzekerheid over de intensiteit en de lengte van de periode van vereiste monitoring na het sluiten van een opslaglocatie.

## Benchmarking

Voor een kwantitatieve vergelijking van de verschillende systemen is gebruik gemaakt van een selectie van beschikbare literatuur en projecten voor zowel scheeps- als pijpleiding-oplossingen. Er is specifiek gekeken naar kostenniveau (per ton CO<sub>2</sub> vervoerd en opgeslagen) met een overzicht van de belangrijkste aannames en verschillen. Wanneer we alle bij ons bekende studies in overweging nemen, variëren de geschatte kosten van scheepstransport en offshore opslag van CO<sub>2</sub> tussen €13 en €33 per ton (MOD 2015) met een beperkt beeld van aannames en project omvang.

De combinatie van schaalbare investeringen (waarmee de capaciteit wordt afgestemd op de vraag) en concurrerende totale kosten per ton CO<sub>2</sub> biedt voordelen voor "vroeg" CCS-projecten door middel van scheepstransport, waarbij het Fizzy concept ook op kleinere afstanden kan concurreren met pijpleidingen.