



Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



# Mariene klimaatmitigatie

## een wetenschappelijke synthese van de meest pertinente oplossingsrichtingen voor het Noordzeegebied

*Beleidsinformerende nota*

*Juli 2021*



***Vlaams Instituut voor de Zee VLIZ***

***Beleidsinformerende Nota***

## **Nota voorop**

Het Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ) kan op vraag van haar doelgroepen, alsook op eigen initiatief kostenvrij en gericht beleidsrelevante informatie verschaffen. Deze informatie wordt ter beschikking gesteld onder de vorm van beleidsinformerende nota's (BIN).

De inhoud van de beleidsinformerende nota's is gestoeld op de actuele wetenschappelijke inzichten en objectieve informatie, data en gegevens. Het VLIZ steunt hierbij zoveel als mogelijk op de expertise van kust- en zeewetenschappers in het netwerk van mariene onderzoeksgroepen in Vlaanderen/België, en het internationale netwerk.

De beleidsinformerende nota's zijn een reflectie van het neutrale en ongebonden karakter van het VLIZ, en streven naar een maximale vertaling van de basisprincipes van duurzaamheid en een ecosysteem-gerichte benadering zoals d

# Inhoud van de nota

**Betreft:** Het informeren van het beleid over vijf mariene klimaatmitigerende benaderingen die op onze Noordzee kunnen gerealiseerd worden.

**Datum:** Juli 2021

**DOI:** [10.48470/2](https://doi.org/10.48470/2)

**Auteurs:** Steven Dauwe, Thomas Verleye, Hans Pirlet, Chantal Martens, Matthias Sandra, Ine Moulaert, Fien De Raedemaeker, Lisa Devriese, Chilekwa Chisala en Jan Mees (VLIZ)

## **Te citeren als:**

Dauwe, S et al. (2021). Beleidsinformerende Nota: Mariene klimaatmitigatie – een wetenschappelijke synthese van de meest pertinente oplossingsrichtingen voor het Noordzeegebied. VLIZ Beleidsinformerende nota's. BIN 2021\_003. Oostende. 70 pp.

Met dank aan de VLIZ-bibliotheek.

Afbeeldingen covers: Shutterstock.com – betalend account

## Inhoudsopgave

I. Situering (PAG 3)

II. Inleiding (PAG 4)

*Dossier Offshore hernieuwbare energie*

*Dossier Koolstofcaptatie en -opvang*

*Dossier Marine geoengineering*

*Dossier Blue carbon*

*Dossier Mariene reservaten*

III. Synthese (PAG 62)

IV. Annex (PAG 66)

# I. Situering

De Noordzee speelt reeds decennia een fundamentele rol in het Europese energielandschap omwille van zijn historische rijkdom aan fossiele brandstoffen. Daarnaast beschikt het Noordzeegebied over heel wat troeven om nu en in de toekomst een pioniersrol op te nemen in het versnellen en bereiken van de energietransformatie richting een klimaatneutraal Europa in 2050 (EU Green Deal (COM (2019) 640), Parijsakkoord) en bij te dragen aan het vervullen van de Duurzaamheidsdoelstellingen van de Verenigde Naties. Zo biedt de regio veel opportuniteiten om met koolstofarme energietechnieken (bv. de productie van windenergie, golf- en getijdenenergie, drijvende zonnepanelen), slimme energienetwerken en andere klimaatmitigerende methoden (bv. koolstofcaptatie- en opslag (CCS), marine geoengineering, ecosysteemrestoratie en -bescherming, etc.), de Europese groene transformatie te ondersteunen. Om dit potentieel te benutten is een geïntegreerde samenwerking en coördinatie tussen verschillende sectoren en overheden van primordiaal belang, gezien de veelheid aan activiteiten. Hierbij dient bovenal blijvend te worden gewaakt over een duurzaam evenwicht tussen de menselijke ingrepen en het milieu.

Deze beleidsinformerende nota bundelt binnen de mariene context actuele wetenschappelijk onderbouwde inzichten ter ondersteuning van het debat over de transformatie naar een klimaatneutraal Europa. Vijf mariene klimaatmitigerende benaderingen die op onze Noordzee gerealiseerd kunnen worden, komen in deze nota aan bod: Offshore hernieuwbare energie, Koolstofscaptatie en -opslag (CCS), Marine geoengineering, Blue Carbon en Mariene reservaten. De besproken mitigatie mogelijkheden werden geselecteerd op basis van hun haalbaarheid, de beschikbare kennis en hun inzetbaarheid in gematigde en ondiepe zeebekkens, zoals het Noordzeegebied. Er werd geopteerd om deze mogelijkheden te bespreken in vijf op zichzelf staande dossiers, gevolgd door een overkoepelende synthese. Ook werd ervoor gekozen de inhoud van de nota te limiteren tot een analyse van de mogelijkheden binnen het fysisch systeem “oceaan”, strategieën rond het verduurzamen van de scheepvaart of veranderingen in het consumptiepatroon (visserij, aquacultuur) komen hier dus niet aan bod. De in deze nota besproken selectie vormt geenszins een waardeoordeel m.b.t. andere bestaande maatregelen of strategieën binnen of buiten de mariene context. Evenwel kan de inhoud van deze nota ondersteuning bieden bij het herzien van de nationale klimaatstrategieën en het toewerken naar de Duurzame Ontwikkelingsdoelstellingen van de Verenigde Naties evenals richtsnoeren geven aan het Vlaams Blauw Innovatielandschap.

## II. Inleiding

Momenteel ondergaat de aarde een antropogene en snel toenemende klimaatopwarming (IPCC, *State of the Global Climate 2020*). Deze opwarming wordt toegeschreven aan de sterke toename aan **broeikasgassen**<sup>1</sup> in de atmosfeer, die ervoor zorgen dat de uitgestraalde aardwarmte de atmosfeer niet kan verlaten. De schadelijke gevolgen hiervan voor ecosystemen en de wereldbevolking zijn intussen ruim gedocumenteerd (IPCC 2014, 2019). Sinds het Klimaatakkoord uit 1992 (UNFCCC), dat erop gericht was de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer te stabiliseren op een niveau dat gevaarlijke antropogene verstoring van het klimaatsysteem voorkomt, heeft er zich vanuit de politiek een mondiale strijd tegen de klimaatopwarming ontvouwd (zie Verleye et al. 2020 voor een chronologie van de scharniermomenten richting een klimaatbestendig beleid). De huidige internationale politieke klimaatactie is georganiseerd binnen het **Akkoord van Parijs (COP21, 2015)**. De Europese Unie organiseert zijn activiteiten rond de Green Deal strategie (COM(2019) 640). Het overkoepelende doel van beide instrumenten is om de klimaatopwarming te limiteren tot maximaal +1,5 °C t.o.v. de pre-industriële waarde (Climate Action Tracker) en zodoende **de zwaarste klimaatschade te vermijden** (IPCC 2019).

Ondanks de toenemende politieke aandacht en een aantrekkelijke klimaatinspanning, is er steeds meer wetenschappelijk bewijs dat aantoont dat de huidige en geplande klimaatmaatregelen tekort schieten om de emissiereductiedoelstellingen, zoals bestipeld binnen het Parijsakkoord, te realiseren en te voldoen aan de Duurzaamheidsdoelstellingen van de Verenigde Naties (SDG13) (Smith et al. 2015, Fuss et al. 2016, Rogelj et al. 2016, Lawrence et al. 2018, De Coninck & Revi 2019, IPCC 2019, IEA 2021, Climate Action Tracker). Om de doelstellingen alsnog te realiseren moet **de wereldwijde klimaatactie verder aangescherpt en versneld worden**. Hierdoor stijgt de vraag naar effectieve en haalbare toepassingen die de atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie<sup>2</sup> permanent naar omlaag halen (Peters & Geden 2017, IRENA 2018, De Coninck & Revi 2019, IRENA 2020, IEA 2021). Dit proces valt onder de noemer '(klimaat)mitigatie'. Concreet zijn er vier soorten klimaatmitigerende maatregelen die men kan treffen (Gattuso et al. 2018, GESAMP 2019, Cooley et al. 2019, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a) (tabel 1): (1) een efficiënter energieverbruik; (2) het vervangen van fossiele brandstoffen door hernieuwbare energie; (3) koolstofopvang en -opslagtechnieken ter hoogte van de uitstootbron; (4) de bescherming en optimalisatie van natuurlijke koolstofreservoirs (Griscom et al. 2017, Rockström et al. 2017, Seddon et al. 2019).

Tot op heden concentreerden beleidsmakers zich grotendeels op de landzijde voor klimaatmitigerende maatregelen (Field & Mach 2017), terwijl er relatief weinig aandacht werd geschonken aan het mitigatiepotentieel van de oceaan (Nelleman et al. 2009, Rau et al. 2012, Billé et al. 2013, Gallo et al. 2017, Gattuso et al. 2018, Cooley et al. 2019, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a, 2019b, *Nationally Determined Contributions (NDCs)*). De oceaan neemt echter van nature enorme hoeveelheden koolstof op (jaarlijks een kwart van de totale antropogene CO<sub>2</sub>-uitstoot), dat vervolgens via de oceanische koolstofcyclus op grote schaal getransporteerd wordt naar de oceanbodembodem. Hier mineraliseert de koolstof en wordt deze

---

<sup>1</sup> Het atmosferisch meest abundante en meest aan de opwarming contribuerende broeikasgas is CO<sub>2</sub>, een restproduct van de verbranding van fossiele brandstoffen (kolen, olie, aardgas). Andere voorbeelden van broeikasgassen zijn methaan (vee), ozon (transport) en CFK's (chlorofluorocarbonaten) (synthetische industrie).

<sup>2</sup> De atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie wordt binnen Europa via een gestandaardiseerd protocol continu gemonitord door het ICOS (*Integrated Carbon Observation System*)-infrastructuurnetwerk. Dit netwerk maakt deel uit van het *European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI)* en bestaat uit 140 meetstations verspreid over twaalf landen. Naast een sterk uitgebouwde landcomponent monitort men binnen het ICOS Ocean-netwerk ook oceanische koolstoffluxen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van 21 oceanstations verspreid over zeven landen (ICOS Ocean).

quasi permanent gestockeerd (koolstofsequestratie). Dit maakt dat we kunnen spreken van de oceaan als zijnde **een koolstofsink** en in deze dus **een klimaatmitigerend medium** (Sabine et al. 2004, Tanhua et al. 2007, Khatiwala et al. 2009, Nelleman et al. 2009, Khatiwala et al. 2013, IPCC 2013, 2019, Le Quééré et al. 2018, Roobaert et al. 2019, The Carbon Project, Hernandez-Léon et al. 2020, Luo et al. 2020).

Naast een koolstofcyclus die netto CO<sub>2</sub> opneemt, heeft het oceaansysteem nog andere troeven in handen, zoals een enorme beschikbaarheid aan open ruimte, golven, getij, zeestromen, etc. die kunnen ingezet worden voor klimaatmitigerende maatregelen. Deze troeven en de natuurlijke koolstofsink functie kunnen vandaag dankzij wetenschappelijke inzichten en technologische mogelijkheden benut en vergroot worden. Er zijn hierbij vier grote werkingsvormen die men kan bekleden (tabel 1): (1) het reduceren van atmosferische broeikasgasconcentraties; (2) het beïnvloeden van de proportie weerkaatste zonnestraling (albedo); (3) de bescherming van levende organismen en ecosystemen; (4) het manipuleren van de biologische en ecologische adaptatie. Tot deze vier werkingsvormen behoren **zowel industriële als natuurlijke mitigatietoepassingen** die zich onderscheiden in de mate van de beschikbare wetenschappelijke kennis en technologische knowhow (tabel 1). Al deze toepassingen hebben een zekere effectiviteit en kost, maar komen evenzeer met een reeks **socio-economische en ecologische voor- en nadelen** die zowel binnen een lokaal als een globaal kader moeten worden afgewogen (Zhang et al. 2015, Fuss et al. 2018, Gattuso et al. 2018, De Coninck & Revi 2019, GESAMP 2019, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a, 2019b). Het “basisprincipe” is evenwel gelijk, het gebruiken van de mogelijkheden van de oceaan als systeem om de klimaatopwarming en hiermee, zij het soms indirect, de schadelijke gevolgen ervan (bv. verzuring, zeespiegelstijging of de opwarming van het zeewater) af te remmen.

Er werd becijferd dat indien heel het gamma aan beschikbare mariene klimaatmitigerende mogelijkheden naar zijn potentieel ontwikkeld en geïmplementeerd wordt, deze de uitstoot aan broeikasgassen tegen 2030 kunnen verminderen met 4 miljard ton per jaar (tegenover > 2,5 miljard vandaag, Gruber et al. 2019, NOAA), wat kan oplopen tot meer dan 11 miljard ton in 2050 (Hoegh-Guldberg et al. 2019a)<sup>3</sup>. Dit overtreft de wereldwijde uitstoot van koolcentrales en neutraliseert de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van China van 2014. Of anders gesteld zou een duurzaam beheerde, klimaatmitigerende oceaan kunnen goed zijn voor **een vijfde van de broeikasgasreductie die nodig is om klimaatopwarming te limiteren tot +1,5 °C** (Hoegh-Guldberg et al. 2019a, Stuchtey et al. 2020). Daarenboven bieden alle oceaangerelateerde mitigatiemaatregelen een reeks aan **positieve externaliteiten** (ecosysteemdiensten zoals voedselvoorziening, kustbescherming) die kunnen bijdragen aan het verwezenlijken van de **VN Duurzaamheidsdoelstellingen** (IPCC 2019a, 2019b, Coopman et al. 2019, Hoegh-Guldberg et al. 2019a, 2019b, Stuchtey et al. 2020). De voordelen en het potentieel verbonden aan het inzetten van de oceaan in de strijd tegen klimaatopwarming zorgen geleidelijk voor een kentering in het land-gefocusste klimaatbeleid (voor een overzicht van de voornaamste stappen sinds het Parijsakkoord, zie **Ocean and Climate Platform 2019** en Verleye et al. 2020)<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup>Hoegh-Guldbergh et al. 2019a analyseert het mitigatiepotentieel van vijf grote domeinen binnen de marien/maritieme sfeer: de productie van offshore hernieuwbare energie; maritiem transport en scheepvaart; de bescherming en herstel van kust- en mariene ecosystemen; visserij, aquacultuur en verschuivingen in voedingspatronen; en koolstofopslag in de zeebodem.

<sup>4</sup>De Europese *Green Deal* (COM(2019) 640) vermeldt het klimaatmitigerend potentieel van de oceaan en stelt het belang van gezonde en veerkrachtige ecosystemen voorop voor een duurzame klimaatmitigatie. Om invulling te geven aan de *Green Deal* doelstellingen zijn vijf “missies” opgesteld gefinancierd vanuit **Horizon Europe**. Dit financieringsinstrument voorziet liefst 35% van zijn middelen voor onderzoek en innovatie in de strijd tegen klimaatopwarming en focust daarnaast ook binnen een specifieke *mission area* “Gezonde oceanen, zeeën, kust- en binnenwateren” op de oceaan.

**In deze nota wordt ingegaan op vijf mariene klimaatmitigerende benaderingen** die op onze Noordzee gerealiseerd kunnen worden: Offshore hernieuwbare energie, Koolstofscaptatie en -opslag (CCS), Marine geoengineering, Blue Carbon en Mariene reservaten (zie tabel 1 voor een overzicht en indeling binnen het klimaatmitigatiekader). De besproken methoden variëren van industriële tot natuurlijke mitigatietechnieken, maar allen steunen ze voor hun mitigatie-effect op een bepaalde eigenschap of mogelijkheid **verbonden aan het oceaanstelsel**. Waar de meer industriële technieken beroep doen op fysische eigenschappen, zoals een hoger windklimaat, golven of geologische opslagruimte, gaan de andere benaderingen zich eerder richten op mogelijkheden gelinkt aan biologische processen. Oceanische mitigatiemogelijkheden die buiten het “fysische” oceaanstelsel vallen, zoals het verduurzamen van de scheepvaart of veranderingen in het consumptiepatroon (visserij, aquacultuur) komen hier niet aan bod, maar worden binnen de klimaatmitigatie context geëvalueerd in [Hoegh-Guldbergh et al. 2019a](#). De breedte van de **Belgische wetenschappelijke expertise** inzake oceanische klimaatmitigatie (en -adaptatie) komt aan bod in [Verleye et al. \(2020\)](#).

**Tabel 1. Overzicht van de in deze nota aan bod komende mariene klimaatmitigerende strategieën.**

| Strategie                     | Methode             | Type maatregel   | Werkingsvorm  | Aard                                      |
|-------------------------------|---------------------|--|---|---|
| Offshore hernieuwbare energie | Windenergie         | Vervanging fossiele brandstoffen                                   | Reductie atmosferische broeikasgasconcentratie  | Industrieel                               |
|                               | Oceaanenergie       |  |   |   |
| Koolstofcaptatie- en opvang   | CC(U)S              | Koolstofopvang en -opslagtechnieken ter hoogte van de uitstootbron | Reductie atmosferische broeikasgasconcentratie  | Industrieel<br>*op uitzondering van BECCS |
|                               | BECCS               |  |   |   |
| Marine geoengineering         | Oceaanfertilisatie  | Bescherming en optimalisatie van natuurlijke koolstofreservoirs    | Reductie atmosferische broeikasgasconcentratie  | Antropogene manipulatie van ecosysteem    |
|                               | Oceaanalkalinisatie | Bescherming en optimalisatie van natuurlijke koolstofreservoirs    | Reductie atmosferische broeikasgasconcentratie  |   |
|                               | Albedo modificatie  | Wijzigen energiebalans aarde                                       | Beïnvloeding proportie weerkaatste zonnestraling  |   |
| Blue Carbon ecosystemen       | Schorren            | Bescherming en optimalisatie van natuurlijke koolstofreservoirs    | Reductie atmosferische broeikasgasconcentratie; Bescherming van levende organismen en ecosystemen | Natuurlijk                                |
|                               | Zeegras             |  |   |   |
|                               | Zewier**            |  |   |   |
| Mariene reservaten            |                     | Bescherming en optimalisatie van natuurlijke koolstofreservoirs    | Bescherming van levende organismen en ecosystemen   | Natuurlijk                                |

\* De productie van bio-energie via met koolstofopvang uitgeruste gascentrales (zie dossier Koolstofcaptatie en -opvang).

\*\* Naar definitie geen blue carbon ecosysteem (zie dossier Blue carbon).

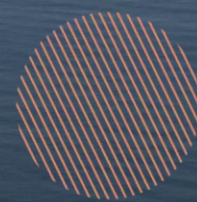
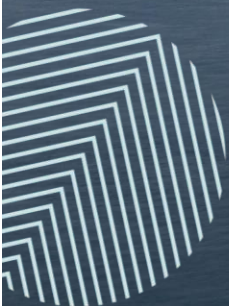




Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



# Dossier Offshore hernieuwbare energie



# Inhoudsopgave

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| 1. Introductie                 | (PAG. 2) |
| 2. Offshore windenergie        |          |
| 2.1 Situatieschets             | (PAG. 2) |
| 2.2 Socio- economische positie | (PAG. 3) |
| 2.3 Een discontinue productie  | (PAG. 3) |
| 2.4 Impact en duurzaam gebruik | (PAG. 5) |
| 3. Oceaanenergie               | (PAG. 6) |

# 1. Introductie

De productie van offshore hernieuwbare energie onderscheidt zich enigszins van de andere mitigatietechnieken die in deze nota besproken worden, daar de reductie in de atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie eerder indirect bereikt wordt. De verschillende technieken onder deze noemer maken echter gebruik van een set mogelijkheden eigen aan de mariene omgeving, zoals een hoger windklimaat, open ruimte, golven, getij, temperatuurgradiënten, etc. om hernieuwbare energie te produceren. Als we vandaag naar de praktijk kijken, dan zien we dat mariene mitigatiestrategieën die voorzien in de productie van hernieuwbare energie het grootste broeikasgasreductie potentieel inhouden. Er wordt dan ook sterk geïnnoveerd binnen de sector. Enkele bekende voorbeelden zijn de energiewinning op offshore windparken, golf- en getijden energie en in de toekomst waarschijnlijk ook drijvende zonnepanelen (Blauwe Groei Strategie EC (COM(2012) 494), WindEurope, Ocean Energy Europe, SETIS Ocean energy, MPVAqua, IEA 2021). Offshore geproduceerde windenergie is momenteel de meest mature technologie, terwijl energie uit golven en getij (oceaanenergie) het hoogste theoretische potentieel heeft. In wat volgt zal dus vooral ingezoomd worden op het gebruik van deze technieken in het Noordzeegebied.

## 2. Offshore windenergie

### 2.1 Situatieschets

In 2020 was er op wereldschaal een totaal geïnstalleerd vermogen van 32.510 MW aan offshore windenergie (WFO - Global Offshore Wind Report 2020) (ter illustratie, 1.000 MW aan energie levert stroom aan circa 1 miljoen gezinnen). Europa is met een aandeel van 77% in het wereldvermogen de afgetekende leider inzake offshore windproductie (WindEurope 2020). Binnen de context van de Europese Green Deal (COM(2019) 640) voorziet Europa met zijn *Offshore Renewable Energy Strategy* (COM(2020) 741) in een verdere opschaling van de offshore windproductie. Zo is het de intentie om tegen 2050 300 GW (1 GW = 1.000 MW) aan offshore windenergie te produceren. Deze doelstelling dient bereikt te worden door enerzijds een expansie in windparken en anderzijds door technologische innovatie. Zo behalen de nieuwste turbines een capaciteit van 14 MW (Haliade X - General Electric) en biedt de mogelijkheid om drijvende turbines (*floating offshore wind*) verder op zee te plaatsen, waar er minder concurrentie is met andere gebruikersfuncties en een hoger, stabielere windklimaat, perspectieven (WindEurope 2018, HyWind project, WindEurope).

Het merendeel van de Europese offshore windparken bevindt zich in het Noordzeegebied, met het Verenigd Koninkrijk, Duitsland, Nederland, België en Denemarken als de belangrijkste spelers. In België waren eind 2020 acht windparken operationeel (C-Power, Belwind, Nobelwind, Northwind, Rentel, Norther, Seamade en Northwester 2), bestaande uit 399 windturbines met een totaal geïnstalleerd vermogen van 2.262 MW. Dit bracht ons in 2020 op de vierde plaats binnen Europa (na het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Nederland) en op een vijfde plaats wereldwijd, na China. Deze capaciteit komt overeen met 10% van het totale Belgische stroomverbruik (BMM, BOP, Beleidsverklaring Noordzee 2020, Rumes & Brabant 2020). Met het Marien Ruimtelijk Plan 2020-2026 (KB 19 mei 2019) werd in 2020 een nieuwe zone voor offshore energieopwekking van 284 km<sup>2</sup> afgebakend. Deze zone, de Prinses Elisabethzone (samengesteld uit: Fairybank, Noordhinder Noord, Noordhinder Zuid), zou de offshore windcapaciteit op het Belgisch deel van de Noordzee moeten optrekken tot 4,4 GW (BOP, Kustportaal,

Marien ruimtelijk plan 2020-2026, Rumes & Brabant 2020). Om op nationaal niveau tegen 2050 klimaatneutraal te zijn, wordt geschat dat een totale productie van 6 GW aan offshore windenergie op de Belgische Noordzee noodzakelijk is, gekoppeld aan de toelevering van 2-6 GW geproduceerd door andere windparken in het Noordzeegebied (Departement Omgeving 2021).

## 2.2 Socio-economische positie

Offshore windenergie kan reeds aan competitieve marktarieven geproduceerd worden. In 2020 bedraagt de globaal gemiddelde *Levelized Cost of Energy*<sup>1</sup> (LCOE) 0,115 USD<sup>2</sup> per kWh, wat vergelijkbaar is met deze van fossiele alternatieven. Bovendien wordt een verdere significante daling van deze kost verwacht tegen 2030 en 2050 (IRENA 2020, 2020b, Wiser et al. 2021). Deze competitievere marktpositie tegenover de traditionele energiedragers, gekoppeld aan een steeds bredere knowhow, verlaagt de drempel voor investeringen met een katalyserend effect op de verdere ontplooiing van deze offshore sector tot gevolg. Zo wordt door het *International Energy Agency* (IEA) en het *International Renewable Energy Agency* (IRENA) de komende decennia een sterke groei voor de offshore windsector voorspeld (IRENA 2020, IEA 2021, WindEurope 2021). Deze groei wordt mede mogelijk gemaakt door **commercieel interessante koppelingen met de traditionele energie-industrie en andere duurzamere sectoren van de toekomst**, zoals het gebruik van windenergie voor de productie van groene waterstof, energieopslag, vermaasde (internationale) elektriciteitsnetten, en koolstofcaptatie en -opslag (CCS - zie dossier Koolstofcaptatie en -opvang, COM(2012) 494, IRENA 2019a<sup>3</sup>, IEA 2021).

De Europese offshore wind sector stelt momenteel ongeveer 210.000 personen tewerk (Europees Parlement 2020). Naast werkgelegenheid, zijn er ook merkbaar positieve effecten op de economisch toegevoegde waarde en de handelsbalans. Zo becijferde een studie voor de Belgische situatie de economische meerwaarde tegen 2030 op meer dan 1 miljard euro aan BBP/jaar met een verbeterde handelsbalans tot meer dan 1,4 miljard euro (CLIMACT 2017 i.o.v. BOP). Het ligt in de lijn der verwachting dat deze trend zich ook in de toekomst zal verderzetten wanneer onderhouds-, ontmantelings- of *repowering* activiteiten toenemen, gewerkt wordt aan de versterking van het transmissienet en nieuwe internationale samenwerkingen of projecten worden opgezet.

## 2.3 Een discontinue productie

Een belangrijke eigenschap van offshore windenergie is dat er grote schommelingen kunnen optreden in de geproduceerde energie naargelang de weersomstandigheden. Gezien het toenemende aandeel van offshore wind in het energiesysteem is het van groot maatschappelijk belang om een betrouwbare aanvoer van de gewenste hoeveelheid stroom te garanderen. Om dit te bewerkstelligen is er reeds op Europees en nationaal niveau actie ondernomen om een geïntegreerd (offshore) energienetwerk uit te bouwen.

Specifiek voor de Noordzeeregio richtte Europa in het kader van de oprichting van dergelijk Europees geïntegreerd energienetwerk (COM(2010) 677) het *North Sea Offshore Grid Initiative* op. Het initiatief

---

<sup>1</sup> LCOE: De prijs die kan worden beschouwd als de minimale prijs waartegen elektriciteit moet worden verkocht om gedurende de looptijd van het project kostendekkend te zijn.

<sup>2</sup> 0,099 euro per kWh volgens gemiddelde waarde dollar in 2020.

<sup>3</sup> IRENA 2019a presenteert een doorgedreven analyse van valorisatieopportunities van variabele hernieuwbare energiebronnen vanuit het perspectief van zowel de producent – verdeler – als consument en behandelt hierbij zowel het technologisch, zakelijk, markt en gebruiksperspectief.

initieerde de samenwerking tussen de tien Noordzeelanden rond betaalbare, Europese offshore energie<sup>4</sup>. Het initiatief kent momenteel een nieuwe impuls onder de “[North Seas Energy Cooperation](#)”, waarvan de resultaten meegenomen werden in de Europese *Offshore Renewable Energy Strategy* (COM(2020) 741). Daarnaast onderzoekt het *North Sea Energy* onderzoeksprogramma, in het kader van een offshore energietransitie, het potentieel van de Noordzee op het vlak van een geïntegreerd duurzaam energiesysteem. De geschiktheid van een aantal concepten wordt getoetst aan hun technologische, economische, ecologische, maatschappelijke en bestuurlijke haalbaarheid ([North Sea Energy 2020](#)).

Het beleid van de Belgische overheid richt zich eveneens op de **verdere uitbouw en versterking van internationale connecties tussen diverse energiebronnen** ([Beleidsbrief Energie 2020](#), [Beleidsverklaring Noordzee 2020](#), [Federaal Ontwikkelingsplan van het transmissienet 2015-2025](#), [Nationaal Energie en Klimaatplan 2021-2030](#)). Een aantal elementen hiervan zijn vandaag reeds zichtbaar of operationeel op de Belgische Noordzee ([Kustportaal](#), [Marien ruimtelijk plan 2020-2026](#)). Zo verzorgt een modulair offshore grid (MOG) de gecoördineerde aansluiting van de windparken Rentel, Northwester 2 en Seamade. Dit MOG kan gezien worden als een vermaasd elektriciteitsnet op zee, of ‘stopcontact op zee’, waarbij in de eerste plaats de voornoemde windparken, maar in de toekomst ook andere hernieuwbare energiebronnen kunnen worden aangesloten op hoogspanningsonderstations die vervolgens connecteren met het landtransmissienet (Elia, [Federaal Ontwikkelingsplan van het transmissienet 2015-2025](#), [North Seas Energy Cooperation](#), [offshoreWIND](#)). Het MOG staat aan landzijde in verbinding met het grootste hoogspanningsstation van België, het Stevin-station in Zeebrugge. Hier wordt de elektriciteit van de windturbines getransformeerd naar 380 kV om het vervolgens verder landinwaarts te transporteren ([Mathys et al. 2013](#), [Tant 2014](#), [Elia](#)). Naast het MOG is er de [Nemo Link](#) (dewelke eveneens aansluit op het Stevin station). Deze onderzeese kabel is de eerste HVDC-verbinding (een hoogspanningsverbinding op gelijkstroom van ongeveer 1.000 MW) tussen België (Zeebrugge) en het Verenigd Koninkrijk (Richborough) ([Milieueffectenrapport - NEMO LINK 2012](#), [Federaal Ontwikkelingsplan van het transmissienet 2015-2025](#), [Mathys et al. 2013](#), [Elia 2019](#), [Nemo Link](#)). Op vlak van internationale samenwerkingen, werd door Elia recentelijk ook een studie opgestart die de haalbaarheid onderzoekt van een hoogspanningsverbinding tussen Denemarken en België ([Elia](#)).

Om de opgewekte stroom van de nog te bouwen windparken binnen de Prinses Elisabethzone aan te sluiten op het Belgische elektriciteitsnet is een bijkomende hoogspanningsverbinding van de kust naar het binnenland opgenomen in het [Federaal Ontwikkelingsplan 2020-2030](#), het zogenaamde Ventilus project. De betrachting is om tegen 2027 de verbinding in gebruik te nemen ([Elia](#)). Daarnaast werd recent door Elia het MOG-II-project (Modulair Offshore Grid II) opgestart, een uitbreiding van het MOG om zodoende meer offshore netcapaciteit te creëren ([Elia](#), [DMS projects](#)). Elia was tot nog toe van plan om hiervoor drie platformen in zee te bouwen, maar bekijkt ook de technische en economische haalbaarheid van de aanleg van een energie-eiland. Het eiland zou daarnaast ook plaats kunnen bieden aan energieopslaginstallaties en andere (energie gerelateerde) functies ([Sertyn 2021](#)).

Naast het opbouwen van een vermaasd elektriciteitsnetwerk om de discontinuïteit in stroomproductie op te vangen, zijn er ook opportuniteiten om het teveel aan stroom bij overproductie te benutten of op te slaan. Een van de meer verkende opties is om het surplus aan opgewekte energie aan te wenden voor de productie van hernieuwbare (groene) waterstof, het zogenaamde ‘**Power-to-Gas**’ principe ([North Sea Energy 2020](#)). Waterstof (H<sub>2</sub>) wordt beschouwd als een veelzijdig milieuvriendelijk brandstofalternatief en wordt wereldwijd door verschillende economische sectoren overwogen als vervanging voor fossiele brandstoffen. Ook in Europa vormt waterstof een belangrijke component in beleidsstrategieën gericht

---

<sup>4</sup> Het Noordzeegebied kent reeds een lange traditie van internationale samenwerking m.b.t. het energievraagstuk (zie [NorthSEE-Energy](#)).

op het decarboniseren van de transport- en energiesector (*Renewable Energy Directive (2018/2001/EU)*, *EU Green Deal (COM(2019) 640)*, *Offshore Renewable Energy Strategy (COM(2020) 741)*, *EU-Waterstofstrategie (COM(2020) 301)*). Een overzicht van de interconnecties op de Belgische Noordzee en de Belgische activiteiten rond waterstof zullen deel uitmaken van de nieuwe thematekst *Energie* van het Compendium voor Kust en Zee – publicatie te verwachten begin 2022.

## 2.4 Impact en duurzaam gebruik

De inplanting van windparken in zee brengt verschillende **positieve en negatieve effecten op het ecosysteem en de gebruikers van de zee** met zich mee. Een holistisch overzicht van de milieueffecten van windenergie is te raadplegen via de [Thetys onderzoeksdatbank](#). Voor een algemeen overzicht van de potentiële milieu impact van onderzeese stroomkabels, zie [Taormina et al. 2018](#). Een overzicht van de impact van offshore windparken en kabels op het milieu binnen de Belgische context is terug te vinden in [Heylen et al. \(2018\)](#).

De *Offshore Renewable Energy Strategy* van de Europese Commissie (COM (2020)741) vermeldt dat de ontwikkeling van offshore energie in overeenstemming moet zijn met de geldende Europese milieuwetgeving en het geïntegreerd maritiem beleid. Offshore energieontwikkeling moet duurzaam zijn en verenigbaar met de bescherming van de biodiversiteit, hierbij rekening houdend met de socio-economische gevolgen voor sectoren die steunen op een gezond marien ecosysteem. Om dit te realiseren zijn reeds verschillende instrumenten uitgevaardigd<sup>5</sup>. De KRMS vormt de hoofdpijler van het Europese mariene milieubeleid, **de richtlijn biedt dan ook een kader om de impact van de windparken op zee te reduceren of te vermijden**. Zo wordt de toevoer van energie, waaronder onderwatergeluid, geïdentificeerd als één van de descriptoren voor een goede milieutoestand ([descriptor 11](#)). Andere descriptoren in de KRMS die van toepassing zijn voor de inplanting van windturbines op zee zijn: de integriteit van de zeebodem ([descriptor 6](#)), door menselijke activiteiten geïntroduceerde niet-inheemse soorten ([descriptor 2](#)) en de permanente wijziging van de hydrografische eigenschappen ([descriptor 7](#)).

De impact van windturbines en onderzeese kabels op het milieu van het BNZ wordt opgevolgd door een monitoringsprogramma gecoördineerd door de dienst [BMM](#) van het Koninklijk Instituut voor Natuurwetenschappen (KBIN). Het programma kent een tweeledige doelstelling:

- De activiteiten aanpassen, verminderen of zelfs stopzetten als er extreme schade optreedt of dreigt op te treden aan het mariene milieu;
- Het verkrijgen van een goed inzicht in de impact op de omgeving van windturbines op zee om het beleid, beheer en ontwerp van toekomstige windturbines te kunnen ondersteunen.

Het monitoringsprogramma bestudeert zowel de fysische, biologische als socio-economische aspecten van de mariene omgeving (zie jaarlijkse monitoringsrapporten [BMM](#)) ten opzichte van een referentietoestand ([Van den Eynde 2005](#), [De Maerschalck et al. 2006](#), [Henriet et al. 2006](#)). Ook liepen recent twee onderzoeksprojecten dewelke de impact van offshore wind op het functioneren van het ecosysteem onderzochten waarvan de resultaten potentiële relevantie hebben inzake de

---

<sup>5</sup> Het Verdrag van Aarhus ([2005/370/EG](#)), de Habitatrichtlijn ([92/43/EEG](#)) en de Vogelrichtlijn ([2009/147/EG](#)), de Milieuaansprakelijkheidsrichtlijn ([2004/35/CE](#)), de Kaderrichtlijn Mariene Strategie (KRMS) ([2008/56/EG](#)), de richtlijn Maritieme Ruimtelijke Ordening ([2014/89/EU](#)), het Gemeenschappelijk Visserijbeleid (Verordening [EU nr. 1380/2013](#)), het Actieplan voor de circulaire economie ([COM\(2015\) 614](#)), de Biodiversiteitsstrategie voor 2030 ([COM\(2020\) 380](#)).

klimaatproblematiek ([PERSUADE project](#), [FaCE-It project](#)). Tot slot werken de Noordzeelanden aan een gemeenschappelijk milieubeoordelingskader (CEAF) voor de beoordeling van de cumulatieve ecologische effecten van de ontwikkeling van offshore hernieuwbare energie.

### 3. Oceaanenergie

Oceaanenergie (energie uit golven, getij, saliniteits- en temperatuurgradiënten biedt grote opportuniteiten voor hernieuwbare energieopwekking en heeft bijgevolg een aanzienlijk klimaatmitigatiepotentieel. Echter, op kleinschalige uitzonderingen na wordt er vooralsnog weinig oceaanenergie geproduceerd in de Europese wateren. Dit is te verklaren door het feit dat de technologie, in tegenstelling tot windenergie, zich nog in de ontwikkelingsfase bevindt ([IEA, World energy resources marine energy 2016](#), [OES 2019](#)). Om de techniek gangbaarder te maken moet nog vooruitgang geboekt worden op het vlak van efficiëntie, betrouwbaarheid, kosten en dienen de nodige regelgevende kaders te worden uitgewerkt. Eind 2020 was **11,2 MW aan golf- en getijdenenergie operationeel** in Europese wateren, waarvan 10,1 MW aan getijdenenergie ([OEE 2020 - Key trends and statistics](#)). De meeste activiteiten richten zich voorlopig op onderzoek en ontwikkeling ([DG Onderzoek en Innovatie, OEE](#)), al schat de Europese sectororganisatie [Ocean Energy Europe](#) (OEE) dat, mits het juiste onderzoeks- en ontwikkelingsklimaat, oceaanenergie tegen 2050 10% van Europa's stroomvoorziening kan leveren, goed voor 400.000 jobs ([DG Onderzoek en Innovatie, SETIS Ocean Energy](#)). Volgens een hoog-groei scenario en op voorwaarde van een adequaat beleidskader lijkt het realistisch om binnen Europa op middellange termijn (2030) 2,6 GW aan oceaanenergie uit golven en getijstroom op te wekken ([OEE 2020](#)). De Europese *Offshore Renewable Energy Strategy* ([COM\(2020\) 741](#)) mikt echter op een productie van **40 GW aan oceaanenergie tegen 2050**. De stand van zaken op het vlak van onderzoek, productie, projecten en beleid op nationaal niveau wordt opgevolgd in het *Annual Report Ocean Energy Systems* ([OES 2019](#)).

Op Belgisch niveau is de blauwe speerpuntcluster, de Blauwe Cluster, betrokken in het Europese [ELBE-project](#) en het [BluERA-project](#). Binnen het ELBE-project trachten de betrokken partners een **pan-Europese blue energy cluster** uit te bouwen die onder meer de ontwikkeling van golf- en getijdenenergie moet stimuleren. Het BluERA-project beoogt het opbouwen van een digitale 'oceaanenergie-atlas' alsook een evaluatie-instrument voor de energieopbrengst. Om de golf- en getijdenenergie in Vlaanderen te introduceren werd in het verleden door partners uit de academische wereld, de industrie en de overheid het [Gen4Wave](#) actieplan uitgewerkt. Gen4Wave resulteerde, onder impuls van het Waterbouwkundig Laboratorium (WatLab, MOW), KULeuven en UGent in de bouw van een kust- en oceaanbasin (COB) als onderdeel van het [Flanders Maritime Laboratory](#) gelegen in het [Ostend Science Park](#) (Oostende). Dit basin biedt testmogelijkheden voor ontwikkelaars van onder andere wind-, golf- en getijdenenergie en land-zee interacties ([Troch et al. 2017](#)). Deze COB-testinfrastructuur is complementair met de mogelijkheden van de *Blue Accelerator*, een breed inzetbaar testplatform op zee voor de haven van Oostende ([MER Blue Accelerator 2017](#)). Het *Blue Accelerator* platform werd binnen het [NEMOS-project](#) reeds ingezet voor de begeleiding en sturing van een golfenergieconvectoren. Verder wordt de ontwikkeling van golfenergie eveneens ondersteund door [Fabriek voor de Toekomst Blue Energy](#) van de POM West-Vlaanderen ([Dangreau 2014, Vanden Berghe 2014](#)).

In de zones in het BNZ voorbehouden voor energieproductie is eveneens de bouw en exploitatie van installaties voor de productie van elektriciteit uit water en stromen toegelaten (KB van 22 mei 2019). Zo werden in de Seamade zone de mogelijkheden bekeken voor het voeren van een pilootproject met golfenergieconvertoren, goed voor een vermogen van 20 MW voor commercieel gebruik ([Aanvraag Mermaid 2014](#)). Echter, omwille van de vooralsnog beperkte commerciële haalbaarheid van

golfenergieconvectoren gaat men niet uit van een inzetbaarheid van dergelijke installaties in deze zone(s) in de nabije toekomst ([Rumes & Brabant 2020](#)). Uit onderzoek bleek ook dat het **BNZ vooral geschikt is als testlocatie** gezien zijn laag golfklimaat (geschat potentieel binnen de Seamade zone 4,5 – 5,8 kW/m) ([Mathys et al. 2012](#)).

Wat de milieu-impact van deze techniek betreft, lijkt deze relatief beperkt en lokaal te blijven. Al kan de impact van grote energieparken, vooral op het vlak van een gewijzigde hydrodynamiek, substantiëler zijn. Het wegnemen van de natuurlijke golf- en getijdenenergie kan immers resulteren in een verminderde menging en gewijzigde stratificatie van de waterkolom met een effect op de biogeochemische cycli tot gevolg. Het voornaamste risico op biologisch vlak schuilt zich in het voordoen van onderwaterbotsingen met de toestellen. Een overzicht van de potentiële milieu-impact van verschillende oceaانenergietechnieken wordt gebundeld in een ICES-rapport ([Vanaverbeke & Coolen 2019](#)) en het [OES Environmental State of the Science Report \(2020\)](#).





Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



# Dossier Koolstofcaptatie en -opvang



## Inhoudsopgave

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 1. Introductie                       | (PAG. 2)  |
| 2. Principe                          | (PAG. 3)  |
| 3. Beleidscontext                    | (PAG. 4)  |
| 4. CCS in Europa                     | (PAG. 5)  |
| 5. Ecologische impact                | (PAG. 8)  |
| 6. Negatieve emissies – BECSS en DAC | (PAG. 9)  |
| 7. Barrières                         | (PAG. 10) |

# 1. Introductie

De koolstofcaptatie en -opslagtechniek (*Carbon Capture and Storage*, CCS) is een beproefde mitigatietechniek. Het is een verzamelnaam voor verschillende technieken die industriële **gasvormige CO<sub>2</sub> geologisch opslaan in gasdichte gesteentelagen** zonder dat er contact met de atmosfeer plaatsvindt (IPCC 2005). CCS-technologie is gebruiksklaar en het marktpotentieel groeiende (IOGP 2019, GCCSI 2020a, IEA 2021). De meest courante captatieprocedure vermindert de CO<sub>2</sub>-uitstoot met 80-90% (Singh et al. 2011b, Markewitz et al. 2012, GCCSI 2019).

Voor industriële activiteiten waarbij de productie van CO<sub>2</sub> inherent is (o.a. de staal-, cement- en raffinage-industrie en bepaalde vormen van energieproductie), vormt CCS-technologie een van de weinige opties die op een relatief kostenefficiënte manier een significante reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot kan realiseren (IEA 2011, IOGP 2019, GCCSI 2020b, IEA 2021). De mogelijkheid om de techniek in te zetten in dergelijke industrieën betekent daarenboven een substantieel jobbehoud en een vooruitzicht op economische ontwikkelingen in deze sectoren, terwijl terzelfdertijd de afspraken uit het Parijsakkoord kunnen worden nageleefd. Een brede Europese CCS-uitrol zou een bijkomende werkgelegenheid (direct + indirect) kunnen bieden aan circa 150.000 personen (Størset et al. 2018). **Naast een koppeling met traditionele industrieën, kunnen ook CCS-toepassingen gevonden worden in sectoren van de toekomst.** Zo resulteert de productie van waterstof (H<sub>2</sub>) via CCS-gecaptureerd aardgas (blauwe waterstof) in een CO<sub>2</sub>-uitstoot die vier tot acht keer lager uitvalt dan bij de productie via klassieke elektrolyse (ZEP 2017, Wyns et al. 2018, GCCSI 2019, IRENA 2018, IRENA 2019b, SINTEF 2019, GCCSI 2020a, North Sea Energy 2020). Naast een ecologisch voordeel, blijkt blauwe waterstof in bepaalde gevallen tevens een kosten-efficiënte manier om H<sub>2</sub> te produceren. Zo schommelt de prijs rond 1,7-2,5 USD<sup>1</sup>/kg H<sub>2</sub> (± 1,5 -2,3 euro) tegen 4,8-7,7 USD/kg H<sub>2</sub> (± 4,4 – 7,0 euro, november 2019) bij traditionele elektrolyse (Bruce et al. 2018, GCCSI 2019, 2020a).

CCS-technologie als potentieel middel in de strijd tegen klimaatverandering komt voor het eerst onder de internationale aandacht in het derde *IPCC Assessment Report* (IPCC 2001). In 2005 volgde vervolgens een *IPCC Special Report* gewijd aan de praktijk (IPCC 2005). Sindsdien wordt de techniek aanzien als een **belangrijke schakel om snel industrieën die teren op fossiele brandstoffen te vergroenen** tot wanneer hernieuwbare alternatieven marktbaar zijn (Anwar et al. 2018, Bui et al. 2018, GCCSI 2020b). Zo wordt ook gekeken naar de technologie als middel om de klimaatimpact van de 500 GW aan nog in aanbouw zijnde of geplande koolcentrales (tegen 2030) te mitigeren (IEA). De eenvoudige installatie van CCS-technologie op bestaande infrastructuur en de bewezen doeltreffendheid maakt dat het IPCC de techniek als cruciaal beschouwt in het behalen van de klimaatdoelen (IPCC 2019), te meer omdat emissiereductiescenario's die de techniek incorporeren door de band goedkoper uitvallen dan scenario's zonder CCS<sup>2</sup>. Niet enkel binnen het IPCC, maar ook binnen de Duurzame Ontwikkelingscenario's van de Verenigde Naties (IEA 2021) wordt gewezen op het nut van CCS om drastische CO<sub>2</sub>-reducties te verwezenlijken in de industriële sector<sup>3</sup>. Naast emissiereducties biedt CCS-technologie ook de **mogelijkheid om negatieve emissies te realiseren** via processen als *Bio-Energy CCS* (BECCS) en *Direct Air Capture* (DAC) (zie 6. Negatieve emissies – BECCS en DAC).

---

<sup>1</sup> Kost H<sub>2</sub>-productie d.m.v. aardgas en kool in met CCS-uitgeruste installaties.

<sup>2</sup> Volgens berekeningen van het IPCC zou de kostprijs voor het behalen van de klimaatdoelstellingen dubbel zo duur uitvallen indien CCS-technologie niet meegenomen wordt in de energietransformatie, gelijk de hoogste kostentoeename van elke beschouwde mitigatietechnologie (IPCC 2014).

<sup>3</sup> Het *Clean Technology Scenario* van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) ziet CCS als het tweede belangrijkste medium om wereldwijd sterke industriële emissiereducties te realiseren na efficiëntiewinst op vlak van energie- en materiaalgebruik. (IEA 2019).

Naast het opvangen van CO<sub>2</sub> is het mogelijk om het gecapteerde koolstof (meestal deels) in te zetten als **grondstof voor het produceren van vermarktbaar producten**. Dit concept is gekend als CCU (*Carbon Capture and Utilisation*). CCU is complementair aan geologische CO<sub>2</sub>-opslag, daar er indirect CO<sub>2</sub>-uitstoot verminderd of vermeden wordt. Het principe draagt dus bij aan het opzetten van een circulaire economie en aan klimaatmitigatie (EC-SAM 2018, Wyns et al. 2018, Hepburn et al. 2019, IOGP 2019, GCCSI 2020b). De praktijk staat echter zowel qua kennis als toepasbaarheid minder ver dan CCS (IOGP 2019). Twee grote belemmerende factoren zijn dat CCU geen aanspraak kan maken op het Europese ETS-erkenningsschema<sup>4</sup> en de onzekerheden verbonden aan een sterke koppeling met de CCS-waardeketen (EC-SAM 2018, IOGP 2019). Ideeën over hoe CCU te stimuleren valt op de Europese markt worden gegeven in EC-SAM 2018 en IOGP 2019<sup>5</sup>. Meer onderzoek naar de innovatieopportunities en het economisch valorisatiepotentieel van CCU wordt blijvend relevant geacht (EC-SAM 2018).

CAPTURE (VLAIO, EFRO) - het *Centre for Advanced Process Technology for Urban Resource recovery* is een initiatief tussen Universiteit Gent, VITO, Universiteit Antwerpen en Vrije Universiteit Brussel dat vanuit de wetenschap en via een multi-actor samenwerkingsmodel radicale technologische vooruitgang rond het duurzaam hergebruik van materialen wil realiseren om zo de stap naar een Vlaamse circulaire economie te katalyseren.

## 2. Principe

De CCS-techniek kan opgedeeld worden in drie componenten: captatie, transport en opslag. Wat de captatiecomponent betreft, zijn er drie gangbare principes die kunnen gevolgd worden: ofwel vindt de captatie plaats voor of na de verbranding, of de verbranding gebeurt met zuivere zuurstof (*oxyfuel combustion*) (Singh et al. 2011a, Markewitz et al. 2012). Elke methode kent echter een *trade off* tussen de kost, de inzetbaarheid, het mitigatiepotentieel en de milieubelasting, maar zonder uitzondering vergen ze energie, gespecialiseerde infrastructuur en chemicaliën. Het **netto mitigatiepotentieel** van de captatietechniek valt dus **niet puur af te rekenen op de hoeveelheid weggevangen of opgeslagen CO<sub>2</sub>**, laat staan de totale milieu-impact (Singh et al. 2011a, 2011b). Een methode die het netto mitigatiepotentieel op een haalbare manier kan bepalen is ontwikkeld door het Zero Emissions Platform (ZEP 2020). Na captatie wordt de dichtheid van het gas via compressie verhoogd tot er een gas ontstaat met bijna vloeibare eigenschappen. Deze substantie wordt vervolgens via pijpleidingen getransporteerd naar een geologisch opslagreservoir op minimaal 800 m diepte. Dit opslagreservoir kan zich zowel op het land als offshore bevinden. In de praktijk gaat het meestal om (bijna) uitgeputte olie-, gas- of koolreservoirs. Het grootste opslagpotentieel schuilt evenwel in de vaker voorkomende onderzeese zoutwaterhoudende poreuze gesteenten (*saline aquifers*) (IEA 2008, McKinsey & Company 2008, GCCSI 2019, GCCSI 2020a). Nadat een injectie in het reservoir heeft plaatsgevonden zal op

<sup>4</sup> *Emissions Trading System* – Een Europees *cap-and-trade* systeem dat energie-intensieve bedrijven (raffinage-industrie, elektriciteitssector, metaalsector, etc.) moet stimuleren om maatregelen te treffen die hun CO<sub>2</sub>-uitstoot doet dalen. Het principe werkt als volgt: het ETS-systeem bepaalt dat installaties onder het systeem voor elke ton CO<sub>2</sub>-uitstoot één “emissierecht” moeten indienen. Het totaal aantal beschikbare emissierechten is beperkt (*‘cap’*) en neemt jaarlijks af. Bedrijven/installaties mogen deze rechten vrij uitwisselen onder elkaar (*‘trade’*), maar volgens de logica van het systeem zou dit ertoe leiden dat bedrijven stapsgewijs en op een kostenefficiënte manier klimaatvriendelijk worden.

<sup>5</sup> 10 beloftevolle valorisatie *pathways* voor CO<sub>2</sub> worden geëvalueerd naar kosten en potentieel in Hepburn et al. 2019.

middellange termijn (honderden-duizenden jaren) een substantiële hoeveelheid oplossen in het water van de omliggende gesteenten. Op lange termijn (miljoenen jaren) mineraliseert nagenoeg alle CO<sub>2</sub> (IPCC 2005, Zevenhoven & Fagerlund 2010, ZEP 2019). Een overzicht en evaluatie van de beschikbare opslagreservoirs is te raadplegen in de Global Storage Resource Assessment (GCCSI 2020a) en de CO<sub>2</sub> storage resource catalogue.

### 3. Beleidscontext

Vanaf een volume van 10<sup>5</sup> ton worden CCS-processen gereguleerd door CCS Richtlijn 2009/31/EC en Richtlijn 2014/52/EU. De eerstgenoemde richtlijn vormt het wettelijk kader voor het veilig geologisch opslaan van CO<sub>2</sub>. Dit wetgevend instrument moet erover waken dat er geen significant risico bestaat op lekkage van CO<sub>2</sub> of hinder voor de volksgezondheid en het milieu, en dat er geen effecten optreden die de veiligheid van het transportnetwerk of de opslaglocaties in het gedrang brengen. **De richtlijn heeft betrekking op alle CO<sub>2</sub>-opslag in geologische formaties binnen de EU en op de gehele levensduur van de opslaglocaties.** De EIA-Richtlijn 2014/52/EU bevat eerder bepalingen gericht op de captatie en transport component van CCS.

In het kader van de EU Green Deal (COM(2019) 640) kondigde de Europese Commissie recent een nieuwe industriële strategie aan (COM(2020) 102). Deze strategie stelt een traject voor richting een groen, digitaal en concurrentieel Europees industrieel landschap tegen 2050. Deze nieuwe industriële strategie steunt op zeven fundamentele pijlers<sup>6</sup>. Het belang van CCS wordt aangehaald in de pijlers rond circulaire economie, industriële innovatie en koolstofneutraliteit. Concreet rekt Europa binnen de Green Deal op **een bijdrage van CCS tussen de 52 en 606 Mton**. Hiertoe plant Europa een aantal maatregelen door te voeren, waaronder een aanpassing van de ETS- en Effort Sharing regeling (EU Climate Strategies & Targets). Wat CCU betreft, kan uit COM(2020) 98 A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe geconcludeerd worden dat de technologie in eerste instantie zal uitgerold worden bij de productie van bouwmaterialen.

Om CC(U)S-projecten te realiseren voorziet de EU in gerichte financiële ondersteuning op maat van elke fase van het project, gaande van onderzoek door Horizon 2020 en Horizon Europe, de ontwikkeling van broeikasgasreducerende projecten binnen het Innovation Fund of de uitbouw van transnationale CO<sub>2</sub>-infrastructuur onder het Connecting Europe Facility Fund (CEF). De grootste rol is in deze weggelegd voor het Innovation Fund. Via dit fonds wil de EU de komende tien jaar (2020-2030) circa 10 miljard euro (op basis van een koolstofprijs van 22 euro/ton) en 450 miljoen euro aan ETS-kredieten investeren, het fonds is hiermee op wereldschaal de grootste facilitator van de ontwikkeling van koolstofarme technologieën (niet exclusief CC(U)S). Daarnaast is er ook de mogelijkheid om middelen vrij te maken of te bundelen door het aanvragen van het status van “belangrijke projecten van gemeenschappelijk Europees belang” (IPCEI’s)<sup>7</sup>

**België staat positief tegenover CC(U)S in zijn energie- en klimaatbeleid** (Navigant 2019, Belgisch geïntegreerd Nationaal Energie- en Klimaatplan 2021-2030). Een recente studie naar de mogelijkheden om België klimaatneutraal te maken tegen 2050 beschouwt de techniek, inclusief BECCS en DAC (zie 6. Negatieve emissies – BECCS en DAC) als cruciaal om dit realiseren (Departement Omgeving 2021). Ons land onderzoekt in het pad naar klimaatneutraliteit hoe een zogeheten “CO<sub>2</sub>-backbone” vorm kan

---

<sup>6</sup> Rechtstreeks gebaseerd op de pijlers zoals eerder gecommuniceerd COM (2018) 773 “A clean Planet for all – A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy”.

<sup>7</sup> De voorwaarden voor dergelijke toekenning zijn gecommuniceerd in COM(2014)/C 188/02.

krijgen. Dergelijk concept moet de ontwikkeling van een circulaire koolstofeconomie bevorderen, waarbij enerzijds afgevangen CO<sub>2</sub> hergebruikt kan worden in industriële processen en/of anderzijds de CO<sub>2</sub> tijdelijk opgeslagen kan worden met het oog op permanente ondergrondse opslag in het buitenland. Verder is er de intentie om in te spelen op de aanwezigheid van de Haven van Antwerpen als grootste geïntegreerde brandstof- en chemiecluster van Europa en om via een doorgedreven samenwerking met verschillende belangengroepen innovatieve systemen te ontwikkelen die toelaten om miljoenen tonnen aan CO<sub>2</sub> op te vangen en op te slaan of opnieuw om te zetten in marktklare producten (zie Antwerp@C-project, 4. CCS in Europa). Concrete nationale CC(U)S doelstellingen of implementatiescenario's zijn voorlopig niet voorhanden.

Vlaanderen engageert zich expliciet voor de ontwikkeling en ondersteuning van CCS- netwerken en CCU-installaties. De eerste prioriteit ligt hier in het **ondersteunen van onderzoek naar (de noodzaak van) het oprichten van geschikte infrastructuur** ten behoeve van zowel ETS- als niet-ETS-bedrijven<sup>8</sup>. Deze ontwikkeling zal voor een stuk beroep kunnen doen op financiering vanuit het 'moonshot'-innovatieprogramma met als doel de Vlaamse industrie tegen 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal te maken (Verleye et al. 2020). Daarnaast leeft de ambitie om in samenwerking met de Haven van Antwerpen opportuniteiten met waterstofproductie te verkennen, uitgaande van de reeds aanwezige pijpleidinginfrastructuur (bv. *power to methanol*) (Vlaams Energie- en Klimaatplan 2021-2030).

## 4. CCS in Europa

Momenteel (april 2021) zijn er **twee Europese commerciële<sup>9</sup> CCS-faciliteiten** (Sleipner 1996 en Snöhvit 2007) met een gezamenlijke jaarlijkse opslagcapaciteit van 1,55 tot 1,7 Mton CO<sub>2</sub>. Beide faciliteiten bevinden zich in Noorwegen en richten zich op het offshore stockeren van de gecapteerde CO<sub>2</sub>. Sedert hun opstart hebben deze installaties meer dan 20 Mton CO<sub>2</sub> onder het Noorse continentaal plat gestockeerd (Equinor 2018, Global CCS Institute database). Verder zijn verspreid in Europa **49 projecten in ontwikkeling** (IOGP 2021). Tegen 2030 zou dankzij deze projecten jaarlijks circa 50 Mton CO<sub>2</sub> opgeslagen worden.

Naar schatting ligt het Europese opslagpotentieel rond 300 Gton CO<sub>2</sub><sup>10</sup> (Gt = Gigaton = 1.10<sup>9</sup> ton = 1 miljard ton) (GCCSI 2019). **De grootste proportie hiervan bevindt zich offshore in de Noordzee**, met een optimistisch geschatte capaciteit van 200 Gton CO<sub>2</sub> (GCCSI 2019). Het reële potentieel van de Noordzee zou evenwel dichter bij **134 Gton CO<sub>2</sub>** (ongeveer 1.500 keer de jaarlijkse uitstoot van België) liggen (Navigant 2019), waarvan meer dan 100 Gton in zoute grondwaterreservoirs (North Sea Energy 2020, GCCSI 2020, CO<sub>2</sub> Storage Resource Catalogue). Deze capaciteit is in theorie voldoende om gedurende meer dan 400 jaar jaarlijks 300 Mton CO<sub>2</sub> op te slaan (het streefdoel indien we de opwarming willen limiteren tot +1,5°C in het 1,5TECH scenario – COM (2018) 773 – *A clean planet for all*). Europa bevat dus voldoende opslagcapaciteit, maar deze is niet overall eenvoudig te exploiteren. Momenteel wordt vooral gekeken naar het hergebruiken van oude olie- en gasreservoirs, met name omdat voor deze locaties al veel wetenschappelijke kennis is vergaard en omdat de nodige infrastructuur aanwezig is. De Noordzee

<sup>8</sup> ETS-sectoren: grote industriële installaties (thermische input van > 20 MW) en elektriciteitsproductie, niet ETS-sectoren: transport (behalve luchtvaart en internationaal transport over zee), gebouwen, landbouw en afval (klimaat.be).

<sup>9</sup> Projecten met de captatie, transport en opslag van minstens 800.000 ton CO<sub>2</sub> op jaarbasis in het geval van een koolenergiecentrale of minstens 400.000 ton in het geval van een aardgasenergiecentrale en energie-intensieve industriële installaties.

<sup>10</sup> De globale geologische opslagcapaciteit bedraagt naar schatting 10.000 Gton (De Coninck & Revi 2019), meer dan 300 keer de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van de energiesector in 2019 (IEA 2020).

biedt op dit vlak omwille van historische en huidige olie- en gaswinning grote troeven. Daarnaast wordt de regio gekenmerkt door **een hoge industriële activiteit die vooral in clusters georganiseerd is**. Zo bevindt het merendeel van de Europese energie-intensieve bedrijven (89% van de Europese industriële CO<sub>2</sub>-uitstoot is toe te schrijven aan 32% van de bedrijven) zich geclusterd rond de noordelijke Noordzee in een gebied met een extensief netwerk aan pijpleidingen. De hoge concentratie aan bedrijven vergemakkelijkt het opschaalpotentieel en biedt ook mogelijkheden voor CCU. Deze twee elementen zorgen voor een afname van het financieel risico langsheen de hele waardeketen, wat de commerciële attractiviteit van CC(U)S in de regio ten goede komt (zie tabel 1 voor een niet-exhaustief overzicht van enkele van de voornaamste<sup>11</sup> projectvoorbeelden die CC(U)S integreren in industriële clusters rond de Noordzee). Bovendien zijn dankzij deze clusters snelle en drastische emissiereducties mogelijk. Een analyse van de opportuniteiten en *bottlenecks* voor de ontwikkeling van CCS in de Noordzeeregio werd reeds gevoerd ([North Sea CCS Infrastructure 2007](#), [One North Sea 2010](#)).

Wat de Belgische geologische situatie betreft, is het zo dat totnogtoe de Belgische geologische opslagcapaciteit slechts in beperkte mate is onderzocht. Omwille van een ongeschikte geologische gesteldheid offshore, bevindt het **beschikbare volume zich evenwel volledig onshore** en wordt conservatief ingeschat op 1 Gton. Het gaat hier in hoofdzaak over diepe zoute grondwaterlagen en steenkoolsequenties (vnl. in Wallonië en de Kempen) ([Welkenhuysen et al. 2011](#), [CGS Europe 2013](#), [GESTCO-project](#)). Niettegenstaande het ontbreken van offshore opslagcapaciteit bevat het Belgisch Continentaal Plat niet minder dan 163 km aan gasleidingen ([BMM](#), [Heylen et al. 2018](#), [Navigant 2019](#)), wat opportuniteiten biedt voor het internationaal transport van CO<sub>2</sub>. Daarnaast heeft België dankzij het Horizon 2020 [Leilac-project](#) (*Low Emissions Intensity Lime & Cement*) (2016-2020) één operationele CCS-installatie. De proeven worden uitgevoerd bij Heidelberg Cement in Lixhe (Luik).

**Tabel 1. Niet-exhaustief overzicht van projectvoorbeelden die CC(U)S integreren in industriële clusters rond de Noordzee.**

|  |  |
|--|--|
| <p><a href="#">Net Zero Teesside project</a> (VK)</p>  | <p>Een Project van groot Gemeenschappelijk Belang (<i>Project of Common Interest</i>, PCI<sup>12</sup>) met als doel het opzetten van een Europese CCS-hub met de capaciteit om jaarlijks 10 Mton CO<sub>2</sub> te capteren. Eens operationeel (voorzien tegen ten laatste 2030) zal het project de volledige decarbonisatie van een site die verantwoordelijk is voor bijna 6% van de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-uitstoot van het VK realiseren. Bovendien zullen significante hoeveelheden CO<sub>2</sub> afkomstig van het vasteland (België, Nederland, Duitsland) per schip aangevoerd worden. Alle weggevangen en aangeleverde koolstof zal offshore worden opgeslagen in de Noordzee in zoutwaterreservoirs (<a href="#">GCCSI 2019</a>).</p> |
| <p><a href="#">Zero Carbon Humber project</a> (VK)</p> | <p>Grootschalig CC(U)S-project dat samen met het Teesside project de volledige decarbonisatie van de industriezone van de Humber beoogt, goed voor ongeveer 15% (12,4 Mton) van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van het VK. Daarnaast voorziet het project in de bouw van 's werelds grootste koolstofneutrale H<sub>2</sub>-fabriek (<a href="#">Saltend project</a>) en wordt er een connectie gemaakt met de Drax bionergiecentrale (zie 6. Negatieve emissies - BECCS en DAC). De ontwikkeling van de transport- en opslaginfrastructuur is in handen van het <a href="#">Northern Endurance Partnership</a>.</p>  |

<sup>11</sup> Voor een overzicht van de bestaande en geplande CCS-faciliteiten in Europa, zie ([GCCII-database](#)).

<sup>12</sup> Projecten van Gemeenschappelijk Belang (PCI) omvatten projecten van hoge prioriteit die gericht zijn op het verbinden van het Europese energiesysteem. Deze projecten kunnen profiteren van versnelde toelatingsprocedures en overheidsfinanciering alsook op steun vanuit het [Connecting Europe Facility Fund](#).

|                      |  |
|----------------------|--|
| Porthos (NL)         | PCI-project Porthos wil CO <sub>2</sub> afkomstig van de Rotterdamse havenactiviteiten opslaan in een gebruikt gasveld zo'n 25 km voor de Nederlandse kust. Men beoogt eind 2023 operationeel te zijn met als doelstelling een jaarlijkse CO <sub>2</sub> -opslag van 2 tot 2,5 Mton te realiseren. In de projectontwikkelingsfase zijn ook toekomstige opportuniteiten voor CCU meegenomen. Een klein deel van de weggevangen CO <sub>2</sub> wordt reeds gebruikt voor de energievoorziening van nabijgelegen serreteelt. Via het PCI-project CO <sub>2</sub> TransPorts <sup>13</sup> wordt de mogelijkheid onderzocht om andere nabijgelegen havens zoals North Sea Port en de Haven van Antwerpen (via het reeds bestaande Antwerp@C-project, zie verder) te connecteren.   |
| Athos (NL)           | CCS-project in de haven van Amsterdam dat industriële CO <sub>2</sub> gaat opslaan in zoute grondwaterreservoirs en uitgeputte gas- en olievelden op een diepte tussen 3 en 5 km. Het project voorziet eveneens in de mogelijkheid tot CCU-toepassingen, in eerste plaats in de glastuinbouw, maar ook toekomstige koppelingen met de chemie-, bouw- en energiesector worden onderzocht. Momenteel wordt gewerkt aan een concreet projectplan voor de CCU(S)-infrastructuur waarna een business case kan worden bepaald. De verwachting is om in 2027 operationeel te zijn en jaarlijks 7,5 Mton CO <sub>2</sub> te stockeren.   |
| Northern Lights (NO) | Dit PCI-project maakt deel uit van het " <i>Norwegian full scale CCS-project</i> ", samen met het Porthos-project vormt dit een van 's werelds eerste industriële CCS-projecten met vrije toegangsinfrastructuur en de capaciteit om aanzienlijke hoeveelheden CO <sub>2</sub> van het continent te transporteren en offshore op te slaan in zoutwaterreservoirs. Dit pan-Europees netwerk waar België, Frankrijk, Ierland, Duitsland, Nederland, Zweden en het Verenigd Koninkrijk deel van uitmaken gaat vanaf 2024 in bedrijf en hoopt tegen dan jaarlijks 1,5 Mton CO <sub>2</sub> te kunnen stockeren ( <i>Equinor</i> ).   |
| Antwerp@C (BE)       | Sedert eind 2019 onderzoekt een consortium bestaande uit energie- en chemiebedrijven (Total, INEOS, Air Liquide, BASF, Exxon Mobil, Borealis) uit de Haven van Antwerpen samen met gasnetwerkbeheerder Fluxys en het havenbedrijf de mogelijkheid tot het uitbouwen van technisch en economisch haalbare CO <sub>2</sub> -captatieinfrastructuur met het oog op CC(U)S-activiteiten in het Antwerpse havengebied. Gegeven dat de Haven van Antwerpen de grootse geïntegreerde energie- en chemiecluster van Europa vertegenwoordigt, achten de partners een snelle en kostenefficiënte halvering van de CO <sub>2</sub> -emissies tegen 2030 (t.o.v. 18,7 Mton aan broeikasgasemissies in 2017) realistisch. Dit project wil via schepen en pijpleidingen gecapteerd gas opslaan onder de Noordzee. Voor de realisatie wil Antwerp@C steunen op twee initiatieven voor grensoverschrijdende CO <sub>2</sub> -transportinfrastructuur die recent door de Europese Commissie werden erkend als PCI-project: het CO <sub>2</sub> TransPorts project voor infrastructuur richting Rotterdam (pijpleidingen) en het Northern Lights project voor infrastructuur richting Noorwegen (via schepen). |

<sup>13</sup> PCI-project gericht op het opstarten van een "open access" CO<sub>2</sub>-transportverbinding tussen de Haven van Rotterdam, Haven van Antwerpen en North Sea Port. Deze connectie moet tegen 2026 werkelijkheid worden. Mits de economische situatie en het regelgevend kader het toelaten, kan post 2030 bekeken worden of het opportuun is de dienstverlening uit te breiden naar partijen buiten de drie havens.



|                         |   |
|-------------------------|---|
|                         | Momenteel ondersteunt het Vlaams Agentschap voor Innoveren en Ondernemen (VLAIO) een haalbaarheidsstudie naar het opzetten van een pijpleiding langsheen de industrie op de linker- en rechter Scheldeoever, de constructie van gemeenschappelijke behandelingsunits, een gemeenschappelijke installatie voor het vloeibaar maken van CO <sub>2</sub> , en de tussentijdse opslag van CO <sub>2</sub> en het grensoverschrijdend transport ervan via zowel schepen als pijpleidingen. Zodra deze positief wordt beoordeeld zal overgegaan worden tot het opstellen van projectvoorstellen (Fluxys). Een Europees subsidiedossier werd ingediend bij het Europese <a href="#">Innovation Fund</a> in het kader van de EU Green Deal (zie 3. Beleidscontext). |
| North-CCU-hub (BE & NL) | Een consortium van publieke en industriële partners in het havengebied North Sea Port dat inzet op de ontwikkeling van CCU-opportunities binnen het havengebied. De North-CCU-hub ambieert via een grensoverschrijdende samenwerking uit te groeien tot de wereldwijde referentie voor captatie en hergebruik van CO <sub>2</sub> . Een overzicht van geplande en lopende projecten is te vinden op de <a href="#">website</a> van het consortium.  |

## 5. Ecologische impact

Het **netto-effect van CCS op het klimaat en het milieu is niet eenvoudig te bepalen**. Zo wordt er ongeacht de toegepaste captatiemethode energie verbruikt en kunnen er tijdens de captatiefase (captatieproces + behandeling restproducten) vervuilende stoffen vrijkomen die schadelijk zijn voor het milieu en de menselijke gezondheid, zoals aldehyden, ammoniak, etc., en vormen er zich ook vaste afvalproducten. Deze **impact kan met name voor waterecosystemen significant zijn**, waar deze eutrofiëring en verzuring kunnen veroorzaken ([Singh et al. 2011a](#), [Corsten et al. 2013](#)). Naast het captatie- en transportproces zijn er ook ecologische risico's verbonden aan de opslagfase ([Damen et al. 2006](#), [Barros et al. 2012](#)). Over de risico's verbonden aan deze fase bestaan momenteel de grootste onzekerheden. De kennislacune is groter voor de zoute grondwaterlagen dan voor de koolwaterstofreservoirs (olie- en gasputten), al zijn de bestaande risicoanalyses vooral gebaseerd op expertopinion en minder op wetenschappelijke dosis-responsmodellen voor ecosystemen of doelsoorten (die tevens amper voorhanden zijn) ([Koornneef et al. 2011](#), [Blackford et al. 2014](#)). Een gedegen kennis is hier echter aangewezen, gezien de opslag-stap als de meest kritische wordt beschouwd in heel het proces. Het grootste milieugevaar schuilt zich in het voordoen van lekkages tijdens of onmiddellijk nadat een injectie heeft plaatsgevonden ([Barros et al. 2012](#)). Indien een dergelijk event plaatsvindt in het mariene milieu, kan dit mogelijk **de gezondheid en het functioneren van het mariene ecosysteem beïnvloeden** ([Blackford et al. 2014](#), [Queiros et al. 2014](#), [Rastelli et al. 2016](#)). Deze lekken zullen in eerste instantie zorgen voor een lokale toename in aciditeit van het oceaanoewater en zodoende rifvormende koralen, invertebraten, vissen, zeewier, etc. onder druk zetten ([Kroeker et al. 2013](#), [Blackford et al. 2014](#), [IPCC 2014, 2019](#), [Gattuso et al. 2015](#)). Naast een bedreiging voor schelpen en kalkskeletten wordt ook melding gemaakt van een mogelijke impact op de reproductie, de gasuitwisseling en het zenuwstelsel van mariene organismen ([Kroeker et al. 2013](#)). Bovendien kunnen substantiële lekkages een adverse invloed hebben op het klimaat wanneer de gelekte CO<sub>2</sub> terug in contact komt met de atmosfeer.

Hoe sterk en langdurig het schadelijk effect van een CO<sub>2</sub>-lek in het marien milieu zou kunnen zijn is echter onduidelijk, maar hoogstwaarschijnlijk is dit afhankelijk van de concentratie en/of hoeveelheid gelekt gas ([Adams & Caldeira 2008](#), [Blackford et al. 2014](#), [Rastelli et al. 2016](#)). De meeste onderzoeken naar het effect van CO<sub>2</sub> in de waterkolom vinden tevens plaats in labocondities of situeren zich rond

hydrothermale bronnen die specifieke fysicochemische omgevingen creëren die niet representatief zijn voor deze nabij CCS-opslagplaatsen (Caramanna et al. 2011, Widdicombe et al. 2013). De ecologische impact van een gecontroleerde test in natuurlijke omstandigheden bij een kleinschalige injectie (2,4 ton over 37 dagen) werd onderzocht door Blackford et al. 2014. Uit de resultaten bleek dat 15% van het geïnjecteerde gas lekte uit het reservoir. De biologische schade bij een lek van deze orde beperkte zich tot enkele meters rond het lek en herstelde zich na het stopzetten van het experiment binnen een termijn van dagen (bentische macrofauna) tot weken (microbiële gemeenschap). Deze effectradius kan zich evenwel in het geval van grootschalige lekken uitbreiden tot enkele kilometers (Blackford et al. 2008). Desalniettemin gaat men omwille van de hydrodynamische menging van het oceaanwater en de oplosbaarheid van CO<sub>2</sub> in het oceaanwater uit van **kortdurende ecologische effecten** (Blackford et al. 2014). Het risico op lekkages kan men evenwel drastisch reduceren indien de opslagplaatsen voor hun ingebruikname aan een grondige screening onderworpen worden en goed beheerd worden (Jewell & Senior 2012, van der Zwaan & Gerlagh 2016, Alcalde et al. 2018, ZEP). Best-practice richtlijnen worden beschikbaar gesteld op de website van het IEAGH.

Tot op heden is er echter **geen weet van lekken naar het mariene milieu bij de bestaande CCS-projecten** (GCCSI 2017, IOGP 2019). Bovendien neemt het risico op lekkages snel af over de tijd, omdat de CO<sub>2</sub> zich bindt met de omliggende vloeistoffen en mineralen (vnl. calciëtvorming) (Alcalde et al. 2018, IOGP 2019, ZEP 2019). Volgens cijfers van het IPCC is het “heel waarschijnlijk” dat 99% van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> gedurende honderden jaren opgeslagen blijft en is het “meer dan 99% zeker” dat dit CO<sub>2</sub> voor duizenden jaren vastzit (IPCC 2005, Alcalde et al. 2018, ZEP 2019). Uit een risicoanalyse studie toegespitst op de Noordzee, blijkt **het risico op lekken die doordringen tot de zeebodem bij goed gescreende en beheerde opslagreservoirs verwaarloosbaar** (Jewell & Senior 2012). Dit omwille van de hoge kwaliteit van de aanwezige geologische structuren.

Toch heerst vooral bij de burger enige bezorgdheid of het ondergronds stockeren van CO<sub>2</sub> betrouwbaar en veilig is (Dooley 2010, Ashworth et al. 2013, Mabon et al. 2014, IOGP 2019, GCCSI 2020b) en is de consensus dat **de wetenschappelijke kennis over de materie verder moet worden uitgediept**, wil men een veilige praktijk garanderen. Te meer omdat eventuele catastrofes kunnen leiden tot onomkeerbare veranderingen in de oceaan (IPCC 2013, 2019). Ook bij potentiële investeerders die aansprakelijk kunnen gesteld worden in het geval van het voordoen van een lek zorgt de onzekerheid rond lekkages, hoe klein het risico ook moge zijn, voor terughoudendheid (Jewell & Senior 2012, GCCSI 2020b). Binnen deze context werkt Europa via het H2020-project *Strategies for Environmental Monitoring of Marine Carbon Capture and Storage (STEMM-CCS)* aan het beantwoorden van de huidige kennisleemten op het gebied van de nodige aanpak en technieken die vereist zijn voor een doeltreffende detectie en kwantificatie van CO<sub>2</sub> lekken uit offshore opslaglocaties (IEA).

Om een zo correct mogelijk beeld te kunnen schetsen van de ecologische impact van CCS is het dus aangewezen **de impact langsheen heel de waardeketen te onderzoeken en verder te kijken dan puur het klimatologisch mitigatiepotentieel** (Marx et al. 2011, Singh et al. 2011a, Barros et al. 2012, Zapp et al. 2012, Corsten et al. 2013, Roefs et al. 2019). Maar dergelijke onderzoeken zijn duur en tijdsintensief, waardoor levenscyclus analyses zo goed als niet voorhanden zijn (ZEP 2020). Een verkorte procedure is wel ontwikkeld door het Zero Emissions Platform (ZEP 2020).

## 6. Negatieve emissies – BECCS & DAC

Wanneer CCS gekoppeld wordt aan de productie van bio-energie (BECCS) (biobrandstoffen of elektriciteit), wordt er niet enkel CO<sub>2</sub>-uitstoot vermeden, maar ook CO<sub>2</sub> onttrokken aan de atmosfeer

gezien de gewassen deze via fotosynthese omzetten in biomassa (IEA 2011, SINTEF 2019, GCCSI 2020b). Omwille van de relatief eenvoudige integratie, zijn de te verwezenlijken emissiereducties via de techniek aanzienlijk (GCCSI 2019, Rogelj et al. 2019). BECCS wordt in Europa voorlopig enkel toegepast in het Verenigd Koninkrijk in de [Drax energiecentrale](#), tevens het grootste decarbonisatie project van Europa en de grootste bron van hernieuwbare energie in het VK (zie 4. CCS in Europa). De effectiviteit van BECCS op schaal dient evenwel nog bewezen te worden (Fuss et al. 2014, Smith et al. 2015, GESAMP 2019).

Hoewel BECCS doeltreffend kan zijn in het mitigeren van de klimaatopwarming, zijn er **milieuzorgen verbonden aan de techniek** met mogelijks dramatische effecten voor ecosystemen (Williamson 2016, Heck et al. 2018, GCCSI 2019, Rogelj et al. 2019). De voornaamste bekommernissen situeren zich op het vlak van ruimtegebruik en de concurrentie met gewassen bestemd voor voedselproductie en de gevolgen voor het milieu van de intensieve teelt van de beoogde gewassen (EASAC 2018, Heck et al. 2018, GCCSI 2019, FAO 2020). Een opportuniteit die een antwoord biedt op deze nadelen, is het **aandrijven van BECCS-centrales met offshore geproduceerd zeewier** (Moreira & Pires 2016). Zeewieraquacultuur in een offshore context is een wijdverspreide techniek met weinig ecologische risico's (Bossier et al. 2018, SOFIA 2020, zie ook dossier Blue Carbon).

Naast BECCS kan CO<sub>2</sub> ook direct uit de atmosfeer worden verwijderd, via *Direct Air Capture* technologieën (DAC) (Williamson 2016, EASAC 2018, GCCSI 2019, GESAMP 2019, Rogelj et al. 2019). Echter, gezien de concentratie aan CO<sub>2</sub> in de atmosfeer ( $\pm 420$  PPM (deeltjes per miljoen)) vele malen kleiner is dan deze van verbrandingsprocessen, is de energievraag zeer hoog om een werkbare densiteit te bekomen. Maar er bestaan mogelijkheden die reeds in de praktijk worden toegepast ([Carbon Engineering](#)). Evenwel zal de techniek, gezien de alsnog beperkte ontwikkeling en het feit dat de mariene link minder relevant is, hier niet verder besproken worden.

## 7. Barrières

Het koolstofneutraal maken van industriële clusters vraagt om een gecoördineerde **samenwerking tussen de lidstaten en industrie**, in het bijzonder wat betreft het gemeenschappelijk gebruik van grensoverschrijdende transportinfrastructuur om de uitstootbronnen te linken met de opslagreservoirs. Momenteel ontbreekt het echter aan een internationaal of regionaal afgestemde CCS-roadmap en ontstaan er vooral geïsoleerde commerciële ontwikkelingsprojecten (zie 4. CCS in Europa). Gezien Europa inzake CCS zich vooral concentreert op en rond de Noordzee kunnen een aantal specifieke barrières geïdentificeerd worden die mede verklaren waarom CCS tot op heden niet algemener is in het Europese industriële landschap.

Zo is het offshore opslaan van CO<sub>2</sub> niet geheel risicoloos en kunnen er zich in het geval van lekken mogelijks negatieve effecten op de lokale fauna en flora voordoen (zie 5. Ecologische impact), waardoor de techniek in eerste instantie verboden werd door internationale akkoorden ter bescherming van het mariene milieu ([OSPAR Verdrag](#), [Verdrag van Londen](#)). Na een aanzienlijke hoeveelheid aan juridisch en technisch onderzoek werden bij beide verdragen echter amendementen toegevoegd, als respons op toenemende internationale druk om de techniek i.f.v. klimaatmitigatie in te zetten. Deze bepalingen laten het toepassen van bepaalde CO<sub>2</sub>-opslag technieken in het mariene milieu wel toe. De wijzigingen omvatten diverse omschrijvingen, voorwaarden en beperkingen om alleen milieuvriendelijke CO<sub>2</sub>-opslag toe te staan. Deze bepalingen en hun gevolgen voor de CCS-regelgeving worden beschreven in [Dixon et al. \(2009\)](#). Een belangrijke kanttekening hierbij is dat ondanks het amenderen van Artikel 6 van het Verdrag van Londen in 2009, dat een moratorium stelt voor contracterende partijen om onderling afval

(waaronder CO<sub>2</sub>) te transporteren met de intentie tot het offshore storten of verbranden ervan, een minderheid van de 50 betrokken staten overgingen tot ratificatie. Dit resulteerde in een impasse die tijdens COP25 (Chili, 2019) op initiatief van Noorwegen en Nederland doorbroken werd. De Resolutie stelt dat “**Landen die CO<sub>2</sub> wensen uit te voeren of te ontvangen voor opslag dit kunnen doen**, op voorwaarde dat zij een verklaring van voorlopige toepassing en kennisgeving van eventuele overeenkomsten of regelingen aan de Internationale Maritieme Organisatie verstrekken”.

Naast bezorgdheden om het marien milieu is er ook nog het **kostenplaatje dat vaak nog als te duur wordt ervaren** om echt commercieel interessant te zijn (GCCSI 2020b). Een diepgaande analyse van het kostenplaatje voor offshore opgeslagen CO<sub>2</sub> onder het Nederlands Continentaal Plat werd uitgevoerd in 2017. Deze studie becijferde de kost voor compressie op 9 euro/ton, voor transport op 1-2 euro voor afstanden < 180 km tussen bron en opslaglocatie en 2-10 euro voor de opslagkost (EBN-Gasunie 2017). Een recente studie van het Zero Emissions Platform becijferde de totale technische kost tussen 12-30 euro/ton voor offshore opgeslagen CO<sub>2</sub> gecapteerd met mature CCS-installaties (ZEP 2019). De kost lijkt het zwaarst onderhevig aan de transportafstand en de zuiverheid van het weggevangen CO<sub>2</sub> (ZEP 2011, IOGP 2019).

Andere, niet specifiek mariene barrières betreffen de complexiteit van het ontwerpen van rendabele *business cases* (er staat alsnog geen prijs op gecapteerd CO<sub>2</sub>), het ontbreken van sluitende wetgevende en regulerende kaders, onduidelijke aansprakelijkheidsrichtlijnen langsheen de CC(U)S-waardeketen (wat het investeringsrisico hoog maakt) en een gebrek aan adequate transportinfrastructuur (Peters & Geden 2017, Wyns et al. 2018, GCCSI 2019, Zapantis et al. 2019, North Sea Energy 2020, ZEP 2020). Daarnaast zijn er ook lidstaten die de ondergrondse opslag van koolstof op hun grondgebied verbieden (Wyns et al. 2018). In België is de praktijk evenwel toegelaten (CGS Europe 2013).



Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



# Dossier Marine geoengineering



# Inhoudsopgave

|  |           |
|--|-----------|
| 1. Introductie   | (PAG. 2)  |
| 2. Beleidscontext – Het Verdrag en Protocol van Londen | (PAG. 2)  |
| 3. Carbon Dioxide Removal                              | (PAG. 4)  |
| 3.1 Oceaanfertilisatie                                 | (PAG. 4)  |
| 3.1.1 IJzer (Fe) – Stikstof (N) – Fosfor (P)           | (PAG. 4)  |
| 3.1.2 Ecologische risico's                             | (PAG. 5)  |
| 3.1.3 Fertilisatie in de Noordzee                      | (PAG. 6)  |
| 3.1.4 Klimaatmitigerend potentieel                     | (PAG. 6)  |
| 3.2 Oceaanalkalinisatie                                | (PAG. 7)  |
| 3.2.1 Olivijn  | (PAG. 9)  |
| 3.2.2 Kalk   | (PAG. 10) |
| 3.2.3 Een antwoord op het energievraagstuk             | (PAG. 10) |
| 3.2.4 Ecologische impact                               | (PAG. 11) |
| 3.2.5 Klimaatmitigerend potentieel                     | (PAG. 12) |
| 4. Oceaanalbedo modificatie                            | (PAG. 13) |
| 4.1 Bubbelgordijnen                                    | (PAG. 14) |
| 4.2 Stabiele schuimen                                  | (PAG. 14) |
| 4.3 Ecologische risico's                               | (PAG. 15) |

# 1. Introductie

‘Marine geoengineering’<sup>1</sup> is de verzamelnaam van technieken die voorzien in “een doelbewuste ingreep in het mariene milieu om natuurlijke processen te manipuleren, onder meer om de antropogene klimaatverandering en/of de gevolgen daarvan tegen te gaan, en die het potentieel heeft om te resulteren in schadelijke effecten, vooral wanneer deze effecten wijdverspreid, langdurig of ernstig kunnen zijn” omvatten (London Protocol 2013, LP.4(8)). Vandaag de dag zijn 27 verschillende marine geoengineering technieken bekend (zie Annex), die variëren van beginnende concepten tot wetenschappelijk gevalideerde technieken getest in *real-life* condities (GESAMP 2019)<sup>2</sup>. De technieken kunnen ingedeeld worden in twee categorieën: **Carbon Dioxide Removal** (CDR) technieken, die de concentratie aan atmosferische CO<sub>2</sub> verlagen en zodoende het **broeikas effect verminderen** en **Solar Radiation Management** (SRM) technieken, ook wel bekend als **Albedo Modification** (AM), die de hoeveelheid ontvangen of teruggestraalde zonnestraling beïnvloeden en zorgen voor een **direct afkoelingseffect** (Royal Society 2009, Cao et al. 2015, NRC 2015b, Brent et al. 2019). Voorlopig valt het merendeel van de onderzochte en geconcipeerde technieken binnen de eerste categorie, waarbij er in se getracht wordt om **de natuurlijke oceanische koolstofsink te vergroten** (IPCC 2014b, Rau 2014, NRC 2015a, Griscom et al. 2017, GESAMP 2019). Technieken die de verwijdering van andere broeikasgassen zoals methaan en stikstofdioxide hebben verkend binnen een mariene context zijn zeldzaam (Salter 2011, Stolaroff et al. 2012, NRC 2015a) en worden niet verder uitgediept in deze nota. Nagenoeg alle marine geoengineering technieken bevinden zich in een vroege ontwikkelingsfase en hoewel hun (theoretisch) potentieel vaak belofte inhoudt, zijn er nog **substantiële onzekerheden** verbonden aan hun gebruik in natuurlijke omstandigheden. Vooral wat de ecologische impact betreft (schaal, duur, niveau) zijn er nog heel wat vragen te beantwoorden (Royal Society 2009, Secretariat of the Convention on Biological Diversity (SCBD) 2012, Russell et al. 2012, Keller et al. 2014, 2018, NRC 2015a, 2015b). Hierdoor wordt hun **praktische inzet vooralsnog als te riskant aanzien** (Gattuso et al. 2018, Lawrence et al. 2018). Daarnaast stelt het gegeven van het grootschalig manipuleren van de natuurlijke processen in de strijd tegen de klimaatopwarming naast enkele ethische vragen ook niet te onderschatten bestuurlijke uitdagingen (Royal Society 2009, Galaz 2012, SCBD 2012, Maltais & Mckinnon 2015, Craik & Burns 2016, Lawford-Smith & Curie 2017, Pasztor 2017, Brent et al. 2019).

## 2. Beleidscontext - Het Verdrag en Protocol van Londen

Het Verdrag ter voorkoming van verontreiniging van de zee door het storten van afval en andere stoffen van 1972, kortweg het **Verdrag van Londen** (London Convention, LC), is een van de eerste wereldwijde verdragen ter bescherming van het mariene milieu tegen de impact van menselijke activiteiten en is sinds 1975 van kracht. Het Verdrag beoogt een doeltreffende controle van alle bronnen van verontreiniging van de zee, **met inbegrip van oceaangebonden klimaatmitigerende technieken die ingrijpen op het mariene milieu**, te bevorderen en alle uitvoerbare maatregelen te nemen om verontreiniging van de zee door het storten van afval en andere stoffen te voorkomen. Een eerste melding van de noodzaak tot het opnemen van oceanische klimaatmitigerende technieken binnen het

---

<sup>1</sup> Geoengineering wordt nog wel *Climate engineering* genoemd (NRC 2015a, Craik & Burns 2016, Pasztor 2017).

<sup>2</sup>Een overzicht en analyse van de effectiviteit, betaalbaarheid, timing en veiligheid van land-gebaseerde geoengineering technieken is te raadplegen in [Royal Society 2009](#).

Verdrag kwam in 2004 (LC 26/6/1) en handelde over het sequestreeren van CO<sub>2</sub> in onderzeese geologische structuren. Een amendement dat deze praktijk toestond (Annex 1 London Protocol, 24 maart 2006) werd aangenomen in het Londen Protocol ([LDC.26\(10\)](#)) in 2006. In december 2007 volgden vervolgens specifieke [richtlijnen](#) op basis van een eerder ontwikkeld beheerkader en risicobeoordeling.

In 2008, werden het Verdrag van Londen en het Londen Protocol geamendeerd in het kader van oceaanfertilisatiepraktijken. De partijen binnen LC/LP bepaalden via Resolutie [LC-LP.1\(1\)](#) dat alle oceaanactiviteiten die oceaanfertilisatie beogen op uitzondering van legitiem wetenschappelijk onderzoek, haaks stonden op de bepalingen binnen beide instrumenten. In 2010 volgde via Resolutie [LC-LP.2\(2\)](#), een niet-bindend beoordelingskader voor wetenschappelijk onderzoek naar oceaanfertilisatie.

Door een gebrek aan duidelijke internationale richtlijnen rond marine geoengineering vaardigden leden van het Verdrag over Biologische Diversiteit (*Convention on Biological Diversity*, CBD) de [Besluiten IX/16 \(2008\)](#) en [X/33 \(2010\)](#) uit, wat door bepaalde organisaties als een moratorium gezien wordt op alle vormen van geoengineering. Deze Besluiten zijn evenwel niet juridisch bindend en worden niet eenduidig als een moratorium geïnterpreteerd ([Horton 2010](#), [Galaz 2011](#)).

Een laatste aanpassing van het London Protocol volgde in 2013, welke de betrokken lidstaten toeliet om oceaanfertilisatie, alsook andere of toekomstige marine geoengineering technieken, te reguleren ([IMO, Resolutie LP.4\(8\)](#)). Het amendement stelt dat onder de gehanteerde definitie van marine geoengineering (zie hoger), **oceaanfertilisatie, op uitzondering van wetenschappelijk onderzoek, verboden is**. Het amendement biedt in annex 4 tevens een overzicht van de opgenomen marine geoengineeringstechnieken en hun regulerende vereisten (voorlopig limiteert dit zich tot oceaanfertilisatie). De definitie van het concept gaat ook breder dan ingrepen gericht op klimaatmitigatie.

Vandaag de dag conformeert het gros van de marine geoengineering technieken en het onderzoek ernaar met het Londen Protocol ([Royal Society 2009](#), [Brent et al. 2019](#), [GESAMP 2019](#)). Het amendement van 2013 biedt totnogtoe het meest uitgebreide en concrete kader voor de regulering van mariene geoengineering, al blijven er, zij het iets minder voor oceaanfertilisatie, ondanks dit amendement nog **grote hiaten in het internationaal rechtskader** wat betreft het *in situ*<sup>3</sup> toepassen van de verschillende technieken<sup>4</sup>. Omwille van de alsnog beperkte wetenschappelijke kennisbasis en de daarmee gekoppelde substantiële onzekerheden, wordt door een organisatie van experts gespecialiseerd in de wetenschappelijke aspecten van de bescherming van het oceaanmilieu (GESAMP) en belast met het adviseren van de Verenigde Naties in deze materie, gepleit voor het hanteren van het **voorzorgsbeginsel**<sup>5</sup> inzake marine geoengineering ([GESAMP 2019](#)).

---

<sup>3</sup> In de eerste plaats kijkt men hier naar internationale wateren (de hoge zee)).

<sup>4</sup> Onder andere de gebrekkige definiëring van het begrip 'schaal' (het Protocol stelt een verbod in op grootschalige langdurig zware ingrepen) zorgt voor verwarring onder belanghebbenden wat de validatie van bepaalde technieken in een natuurlijke context bemoeilijkt. Grootschalige *in-situ* experimenten (>10 km) kunnen immers potentieel drastische en/of langdurige wijdverspreide impact creëren ([Watson et al. 2008](#), [Wallace et al. 2010](#)). Om die reden wordt binnen bepaalde wetenschappelijke kringen geopperd om kleinschalige veldtesten toe te laten met minimale regulering ([Parson & Keith 2013](#)).

<sup>5</sup> Het voorzorgsprincipe stelt dat, in geval van dreiging van onherstelbare schade, het ontbreken van voldoende wetenschappelijk bewijs niet de reden mag zijn om kosteneffectieve maatregelen in te voeren ter voorkoming van schade aan milieu, volksgezondheid en consumentenrecht.



## 3. Carbon Dioxide Removal

### 3.1 Oceaanfertilisatie

De meest onderzochte marine geoengineering methode is deze van oceaanfertilisatie, en dan in de eerste plaats ijzerfertilisatie (Boyd et al. 2007, Lampitt et al. 2008, Wallace et al. 2010, SCBD 2012, Williamson et al. 2012, Hoegh-Guldbergh et al. 2019, GESAMP 2019). Het principe is dat anorganische nutriënten die belangrijk zijn voor het fytoplankton om aan fotosynthese te doen (vnl. ijzer, stikstof en fosfor) aan het oppervlaktewater worden toegevoegd om de **biologische productie kortstondig te stimuleren**, wat vervolgens, steunend op de mechanismen achter de biologische koolstofpomp, moet resulteren in een verhoogde (permanente) sequestratie van koolstof<sup>6</sup> (Young 2007, Lampitt et al. 2008, Royal Society 2009, SCBD 2012, Moore et al. 2013, Harrison 2017, Raven 2017). Het globale geofysische potentieel van oceaanfertilisatie wordt geschat op 1,8 Gton CO<sub>2</sub>/jaar (Hoegh-Guldbergh et al. 2019), al ligt dit in werkelijkheid waarschijnlijk lager (Royal Society 2009). De effectiviteit van oceaanfertilisatie wordt in grote mate bepaald door **de regionale condities, het tempo waarmee de toegevoegde nutriënten kunnen worden opgenomen door het plankton en de snelheid waarmee de nieuw geproduceerde biomassa wordt afgebroken (respiratie)** (Lampitt et al. 2008, Wallace et al. 2010). Daarnaast moet het netto-effect ook rekening houden met de impact van een potentieel lager oceaanalbedo (zie 4. Oceaanalbedo modificatie) (Frouin & Iacobellis 2002). Een systematische evaluatie van de techniek wordt gegeven in Wallace et al. (2010) en Williamson et al. (2012).

#### 3.1.1 IJzer (Fe) – Stikstof (N) – Fosfor (P)

IJzer (Fe) is een micronutriënt, wat betekent dat algen er slechts een beperkte hoeveelheid van nodig hebben om aan fotosynthese te kunnen doen. In regio's met een gebrek aan ijzer en een hoge nutriëntenconcentratie (N, P) kan een verhoging van de ijzerconcentratie ervoor zorgen dat algen (fytoplankton) de nodige nutriënten kunnen mobiliseren om snel nieuwe biomassa aan te maken (Boyd et al. 2007). Dit is in het verleden reeds **veeluldig experimenteel gedocumenteerd** (Aumont & Bopp 2006, Boyd et al. 2007, Williamson et al. 2012). In de natuur is ijzer-gestimuleerde algenbloei een jaarlijks weerkerend fenomeen (Blain et al. 2008, Pollard et al. 2009, Trull et al. 2015). Er zijn echter ook episodes van algenbloei gelinkt aan eenmalige ijzeraddities, zoals bijvoorbeeld na vulkanische erupties (Hamme et al. 2010, Achterberg et al. 2013, 2018) of stofstormen (Mahowald et al. 2005). In bepaalde gevallen resulteren dergelijke events ook in een verhoogde neerwaartse flux van koolstofdeeltjes (Blain et al. 2008, Pollard et al. 2009). De boost in fotosynthese bij een ijzerfertilisatie is in theorie hoog (Royal Society 2009, GESAMP 2019), maar **in situ is men er totnogtoe niet in geslaagd dit potentieel te bevestigen** (Wallace et al. 2010, Williamson et al. 2012, Yoon et al. 2016). Naast een zeer variabele opname-efficiëntie is er ook een grote onzekerheid over hoeveel van de geproduceerde biomassa uiteindelijk gesequestreerd wordt na het stopzetten van de fertilisatie (NRC 2015a). Het meeste onderzoek lijkt te wijzen op een **eerder beperkte sequestratiegraad** (Boyd et al. 2004, Aumont & Bopp 2006, Blain et al. 2008, Lampitt et al. 2008, Oschlies et al. 2010, Williamson et al. 2012, Robinson et al. 2014). Omdat de slaagkans van de techniek zodanig onderhevig is aan een reeks **regio- en tijdsgebonden randvoorwaarden** blijft het globale mitigatiepotentieel van een ijzerfertilisatie moeilijk in te schatten en ziet men deze eerder aan de lage kant uitvallen met een theoretische jaarlijkse bijdrage tussen 0,25-0,75 Gton CO<sub>2</sub> (Aumont & Bopp 2006, Wallace et al. 2010, Williamson et al. 2012). Bovendien kan er in de

---

<sup>6</sup> Het IPCC hanteert standaard een tijdshorizon van 100 jaar met betrekking tot het evalueren van de permanentie van CO<sub>2</sub>-opslag (Oschlies et al. 2010).

directe omgeving van de gefertiliseerde locatie een reductie in primaire productie optreden doordat de nodige nutriënten uit deze zone worden “gestolen” door fytoplankton in de bemeste zone (Wallace et al. 2010). Het netto mitigatiepotentieel is met andere woorden geenszins direct te koppelen met de gerealiseerde productieverhoging. Meer (langdurig) **onderzoek naar het sequestratieproces na fertilisatie is dus wenselijk** (Watson et al. 2008, Yoon et al. 2016).

Naast het bemesten met ijzer, kan ook het toevoegen van de macronutriënten stikstof en/of fosfor lokaal de productiviteit verhogen in regio's waar deze elementen limiterend zijn (Matear & Elliott 2004, Jones & Young 1997, Dixon 2008, Wallace et al. 2010, Lawrence 2014) en er bijgevolg minder koolstof wordt getransporteerd naar de diepe oceaan (Moore et al. 2013). De opname van stikstof en fosfor in koolstofverbindingen kent, net als bij een ijzerfertilisatie, een **wisselend succes** eveneens te wijten aan de impact van de vele regio-specifieke randvoorwaarden (GESAMP 2019). Ook hier is de **sequestratiegraad erg onzeker**, maar deze zou hoger liggen dan bij ijzerfertilisatie (Lawrence 2014, Harrison 2017).

### 3.1.2 Ecologische risico's

Een oceaanfertilisatie heeft potentieel verreikende gevolgen voor het mariene ecosysteem en de mariene voedselketen (Lampitt et al. 2008, Royal Society 2009, SCBD 2009, Wallace et al. 2010, Keller et al. 2014, NRC 2015a). Zo is o.a. aangetoond dat een wijziging in de nutriëntenbalans **drastische gevolgen kan hebben voor de oceanische koolstof- en nutriëntcycli** (Moore et al. 2013). Een veel voorkomend fenomeen is **een wijziging in de soortensamenstelling van het fytoplankton**. Dit effect kan mogelijk doorstromen naar het zoöplankton en zich verder verspreiden over de verschillende niveaus van de voedselketen. De consequenties hiervan op termijn zijn vooralsnog onvoldoende bestudeerd (Lampitt et al. 2008, SCBD 2009, Wallace et al. 2010, Moore et al. 2013, Caputi et al. 2019).

Te hoge Fe, N, P-concentraties in het oppervlaktewater worden ook in verband gebracht met een toegenomen risico op biologisch dode, **zuurstofarme zones** (Diaz & Rosenberg 2008, Wallace et al. 2014, OSPAR IA 2017, Rabotyagov et al. 2017, NOAA) en het ontstaan van **schadelijke algenbloei** in de kustzone (Silver et al. 2010, Trick et al. 2010, Zhang et al. 2010, Waldbuser & Salisbury 2014, Wallace et al. 2014, Gobler 2020). Indien de fertilisatie doeltreffend is, zal in eerste instantie door een verhoogde CO<sub>2</sub>-opname de zuurtegraad van het oppervlaktewater dalen. Wanneer de doorstroming naar hogere trofische organismen of diepere waterlagen ontoereikend is, zal een grootschalige algenbloei door een verhoogde respiratie (afbraakproces) resulteren in een verzuring van het oppervlaktewater (Wallace et al. 2010, Waldbuser & Salisbury 2014, Wallace et al. 2014). Verder kan in bepaalde gevallen, zoals bij lage zuurstofconcentraties, een verhoogde vrijgave van **andere, krachtigere broeikasgassen** zoals stikstofdioxide, methaan en dimethylsulfide, etc. plaatsvinden (Boyd et al. 2007, Lampitt et al. 2008, Law 2008, Wallace et al. 2010, Lenhart et al. 2016).

Het blijft echter moeilijk te voorspellen bij welke doses deze schadelijke effecten optreden. Om de ecologische verbanden tussen bovenstaande effecten en oceaanfertilisatie te doorgronden is **meer wetenschappelijk onderzoek nodig**. Een synthese van de wetenschappelijke bevindingen naar de potentiële impact van oceaanfertilisatie op het mariene milieu en de mariene biodiversiteit wordt gegeven in (Lampitt et al. 2008, SCBD 2009 en Wallace et al. 2010).

### 3.1.3 Fertilisatie in de Noordzee

Ijzer-gestimuleerde koolstofcaptatie is het meest efficiënt in regio's gekenmerkt door een lage concentratie aan nutriënten (N, P) en hoge concentratie aan koolstof (*High Nutrient, Low chlorophyll* regio's) (Aumont & Bopp 2006, Wallace et al. 2010, GESAMP 2019). Deze regio's bevinden zich voornamelijk in de Zuidelijke Oceaan en in de Noordelijke en Oost-equatoriale Stille Oceaan (Boyd et al. 2007, Yoon et al. 2016). **De Noordzee daarentegen is eerder eutroof en dus niet gelimiteerd in N, P en Fe** (Druon et al. 2004, Vanderbiest et al. 2017, EMODnet). Bovendien is het water door een hoge concentratie aan gesuspendeerd sediment vrij troebel, waardoor grootschalige algenbloei vrij zeldzaam is en de primaire productie eerder **licht gelimiteerd** is.

Indien de inzetbaarheid van de techniek in dit gebied geëvalueerd wordt, is het sterk aangewezen om een gedegen wetenschappelijk inzicht te bekomen van de **lokale nutriëntenbalans en de metabolische vereisten van de aanwezige primaire producenten** (Moore et al. 2013). De sleutel tot een doeltreffende (mits aan de fysico-geochemische randvoorwaarden is voldaan) mitigatie via oceaanfertilisatie is een goed functionerende **biologische koolstofpomp** (Sarmiento & Gruber 2002, Royal Society 2009, Wallace et al. 2010, Hernandez-Léon et al. 2020). Een goed werkende biologische koolstofcyclus gaat gepaard met gezonde ecosystemen bestaande uit abundante soortenpopulaties uit verschillende trofische niveaus die een efficiënte productie en sequestratie bewerkstelligen. De Noordzee is echter ondiep en turbulent van karakter, wat voor een deel de eerder beperkte accumulatie- en sequestratieprocessen verklaart (Vanderbiest et al. 2017). Niettegenstaande toont onderzoek aan dat de **Zuidelijke Noordzee** gekenmerkt wordt door een **sterke heterotrofe activiteit** resulterende in een goede nutriëntencirculatie. Dit verklaart voor een stuk dat het pelagiaal op jaarbasis als een **koolstofsink** fungeert (Brion et al. 2008, De Borger et al. 2021).

### 3.1.4 Klimaatmitigerend potentieel

Wetenschappelijk onderzoek heeft vooralsnog niet voldoende bewijs kunnen verzamelen voor een bestendige en ecologisch verantwoorde klimaatmitigatie via oceaanfertilisatie. Ongeacht de intensiteit en duur waarmee men kan fertiliseren, blijft het fotosynthese-stimulerende effect van de techniek **gelimiteerd door de beschikbaarheid van andere nutriënten, licht en de heersende omgevingscondities** (Dixon 2008, Oschlies et al. 2010, Wallace et al. 2010). Omwille van het nauwe werkvenster van de techniek zou volgens modelsimulaties een globale implementatie van oceaanfertilisatie slechts resulteren in een daling van 33 ppm CO<sub>2</sub> op 100 jaar (Aumont & Bopp 2006). Ter illustratie, de atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie in april 2021 bedroeg gemiddeld 419 ppm (CO<sub>2</sub> Earth). Bovendien is er een grote waarschijnlijkheid dat een significante proportie van de opgenomen CO<sub>2</sub> terug vrijkomt in de atmosfeer binnen een tijdspanne van tientallen tot honderden jaren na stopzetting van de fertilisatie (Aumont & Bopp 2006, Oschlies et al. 2010). Daarnaast is de technische haalbaarheid vooralsnog te beperkt om de praktijk succesvol en rendabel op schaal te kunnen toepassen en is het inzicht in de mogelijke ecologische implicaties ontoereikend. Op basis van de huidige expertise, concluderen diverse studies en rapporten dat oceaanfertilisatie **op lange termijn een weinig doeltreffend middel is in de strijd tegen klimaatopwarming** wat daarnaast weinig tot niets bijdraagt aan het reduceren van neveneffecten als oceaanoopwarming, -verzuring en zeespiegelstijging (Young 2007, Royal Society 2009, Gattuso et al. 2018, Hoegh-Gudberg et al. 2019a).

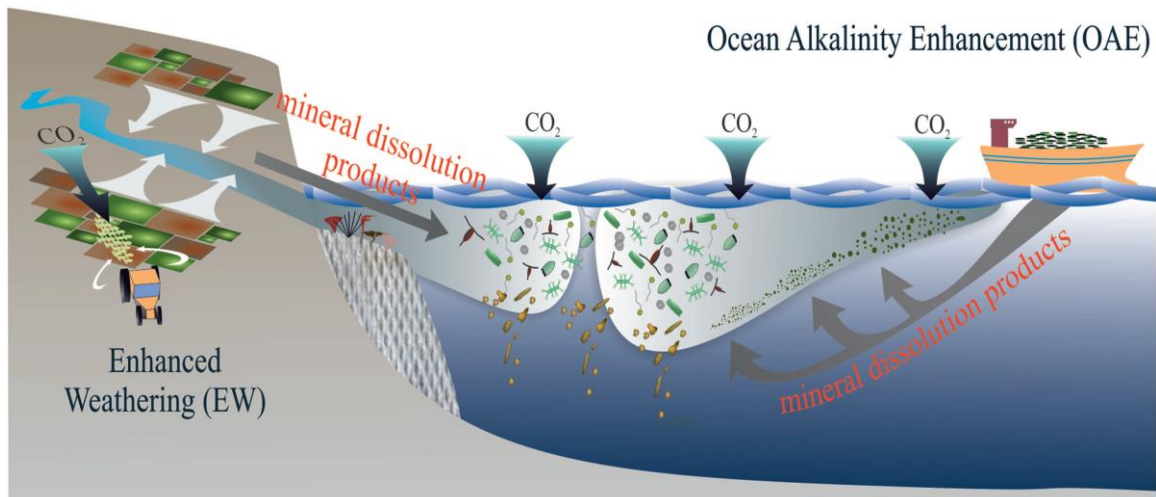
## 3.2 Oceaanalkalinisatie

Wanneer CO<sub>2</sub> oplost in het oppervlaktewater van de oceaan wordt koolzuur gevormd (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), dat nagenoeg volledig dissocieert en omgezet wordt naar stabiele moleculen. Dit proces verzuurt de oceaan met schadelijke gevolgen voor verschillende marien taxonomische groepen (koralen, tweekleppigen, schaaldieren, etc.) (Verleye et al. 2020, IPCC 2019). Wanneer basen, zijnde alkalische stoffen met een pH hoger dan 7 en hiermee de tegenhangers van zuren, toegevoegd worden aan het oceaanwater, daalt de verzuringsgraad van het oppervlaktewater. Dit resulteert in een aantal met elkaar gelinkte **positieve klimaatmitigerende effecten**: (1) de concentratie aan CO<sub>2</sub> in het oppervlaktewater verlaagt, waardoor meer CO<sub>2</sub> kan worden opgenomen uit de atmosfeer (Gonzalez & Ilyina 2016, Montserrat et al. 2017)<sup>7</sup>, (2) verdere oceaanverzuring wordt gebufferd (Rau 2011, Renforth & Henderson 2017, Balch et al. 2019), (3) er ontstaat een productie van een stabiel en quasi onuitputtelijk opslagmedium in de vorm van minerale (bi)carbonaat-ionen (alkalische ionen) in het oppervlaktewater (Hartmann et al. 2013) en (4) de vrijgave van CO<sub>2</sub> van de oceaan naar de atmosfeer vermindert (Gonzalez & Ilyina 2016, Renforth & Henderson 2017, GESAMP 2019). Daarnaast zijn **positieve neveneffecten mogelijk** doordat elementen die belangrijk zijn voor de fotosynthese kunnen vrijkomen bij deze reacties waardoor de opname van CO<sub>2</sub> een extra boost krijgt (Hartmann et al. 2013, Hauck et al. 2016, Montserrat et al. 2017, Balch et al. 2019).

Het principe van het toevoegen van basen/alkinaten aan het oceanisch oppervlaktewater is gekend als oceaanalkalinisatie. De methode is **geïnspireerd op het natuurlijk verweringsproces** waarbij silicaten en carbonaatmineralen reageren met atmosferische CO<sub>2</sub> en water en hierbij stabiele opgeloste of vaste alkalische componenten vormen (Schuiling & Krijgsman 2006, Hartmann et al. 2013, Renforth & Henderson 2017, Renforth 2019) (zie figuur). Dit principe is op geologische tijdschaal de voornaamste manier om CO<sub>2</sub> op te vangen en gezien meer dan 90% van de aardkorst uit alkalische mineralen bestaat, kent het theoretisch potentieel om de klimaatopwarming te mitigeren geen fysische limieten (IPCC 2013). Samen met de productie van hernieuwbare energie heeft oceaanalkalinisatie op globaal niveau het **grootste theoretische potentieel** om een antwoord te bieden op de klimaatopwarming en bepaalde schadelijke gevolgen voor het marien milieu (opwarming, verzuring) (Harvey 2008, Gattuso et al. 2018, Strefler et al. 2018). Enkele mogelijke verspreidingswijzen in een mariene context zijn het toedienen van alkinaten via het gebruik van (varende) schepen (Köhler et al. 2013), in de nabijheid van on/offshore platformen (Rau et al. 2013) of in de kustzone waar golfactie zorgt voor de verdere verspreiding en vermaling van de mineralen (Hangx & Spiers 2009, Meysman & Montserrat 2017).

---

<sup>7</sup> Het sterkste mitigatie effect op het vasteland is te bereiken in warme, vochtige regio's (Schuiling & Krijgsman 2006, Hangx & Spiers 2009, Hartmann et al. 2013, Taylor et al. 2015, Strefler et al. 2018).



Schematisch overzicht van 'versnelde verwerking' (enhanced weathering) en oceaankalinisatie (ocean alkalisation). Bij versnelde verwerking bereiken opgeloste mineralen de oceaan via riviertransport met vooral merkbare effecten in de estuaria en kustzones, waar bij oceaankalinisatie de mineralen bijvoorbeeld via schepen in de kustzone of verder offshore aan het oppervlaktewater van de oceaan worden toegediend. (Schets uit [Balch et al. 2019](#)).

Vandaag de dag bestaat een reeks aan technologieën die de alkaliniteit van de oceaan kunnen verhogen waarvan de **kosten vergelijkbaar zijn met die van andere systemen die koolstof capteren** (*grosso modo* tussen 18-180 euro per ton CO<sub>2</sub>) ([Renforth & Henderson 2017](#)). In de praktijk focust men het onderzoek vooral op het toevoegen van mineralen met een hoog siliciumgehalte en carbonaten ([Schuiling & Krijgsman 2006](#), [Henderson et al. 2008](#), [Renforth & Henderson 2017](#), [Beerling et al. 2018](#), [GESAMP 2019](#)). Er zijn evenwel nog **veel onbeantwoorde technische, ecologische, sociale en ethische vragen verbonden aan oceaankalinisatie**, maar omwille van het beloftevol mitigerend potentieel en de urgentie van de klimaatopwarming komt het principe steeds meer onder de aandacht van wetenschappers en andere belanghebbenden. Een grote uitdaging is om de techniek efficiënt te maken op menselijke tijdschaal. Daarom wordt vooral geïnvesteerd in onderzoek dat een veilige, kosten-efficiënte en praktische uitrol toelaat ([Strefler et al. 2018](#)).

Vanuit fysicochemisch oogpunt staat of valt het succes van oceaankalinisatie met de mate waarin het neerslaan van de geproduceerde (bi)carbonaatmineralen zich voordoet. Hoewel de oppervlaktewateren van de oceaan overgesatureerd zijn (met een factor vier) met kalk (calciet), kunnen carbonaten echter in oplossing blijven door de aanwezigheid van een reeks **ionen in het oceaانwater die het neerslaan verhinderen** ([Henderson et al. 2008](#), [Renforth & Henderson 2017](#)). De concentratie van deze ionen is in die mate dat het neerslaan van carbonaatmineralen kan vermeden worden tot de concentratie ervan twintig keer hoger ligt dan de normale saturatiewaarde. Wel bestaat het risico dat in het geval van een lokale additie de neerslaglimiet plaatselijk overschreden wordt doordat de additie het tempo van mengen en verdunnen overschrijdt ([Henderson et al. 2008](#)). De techniek zal ook, indien het de bedoeling is om langdurig de oceaانverzuring en klimaatopwarming te verminderen, continu moeten aangehouden worden ([GESAMP 2019](#)).

In wat volgt wordt het gebruik van twee pertinente oceaankalinisatietechnieken, die theoretisch gezien zouden kunnen plaatsvinden in ondiepe gematigde zeeën zoals de Noordzee, onder de loep genomen.

### 3.2.1 Olivijn

Olivijn<sup>8</sup> ((Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) is een silicaat dat kan toegevoegd worden aan de oppervlaktewateren van de oceaan om doeltreffend CO<sub>2</sub> te capteren (Köhler et al. 2010, Hartmann et al. 2013, Köhler et al. 2013, Hauck et al. 2016, Montserrat et al. 2017). Olivijn (in de vorm van duniet) lost relatief snel op in het oceaanwater en vereist een lagere energie-intensieve en chemische bewerking voor toediening (Schuiling & Krijgsman 2006, Renforth & Henderson 2017). Het theoretisch potentieel wordt geschat op een vermogen van 1 g olivijn om 1,25 g CO<sub>2</sub> op te vangen, al ligt dit potentieel in natuurlijke omstandigheden vermoedelijk vele malen lager (Hartmann et al. 2013, Hauck et al. 2016). Köhler et al. (2013) becijferde een opname van 0,28 g CO<sub>2</sub> voor elke gram olivijn in natuurlijke condities, al kan de totale efficiëntie nog lager uitvallen wanneer ook de CO<sub>2</sub>-productie verbonden aan de transportafstand en het vermalingsproces in rekening wordt gebracht (Hangx & Spiers 2009). Om een werkbare efficiëntie te bereiken binnen een voor ons relevante tijdschaal en om te vermijden dat het olivijn bezinkt vooraleer de koolstofcaptatie-reactie heeft plaatsgevonden, dient het olivijn **voldoende verkleind** te worden ( $\leq 10\mu\text{m}$ ) (Hangx & Spiers 2009, Schuiling & De Boer 2011, Hartmann et al. 2013, Köhler et al. 2013)<sup>9</sup>. Een proces dat, zeker in het geval van grote volumes, **erg energie-intensief is en mogelijk risico's voor de volksgezondheid met zich mee brengt** (Hangx & Spiers 2009, Köhler et al. 2013).

Via een andere piste kan olivijn langs een omweg als landbouwmeststof in zee terechtkomen. Vermaalde reactieve silicaten versnellen immers het natuurlijke verweringsproces van bodems, waardoor ze voedingsstoffen kunnen mobiliseren voor voedingsgewassen. Op die manier reduceert olivijn ook de nood aan kunstmatige meststoffen en pesticiden. De verweerde silicaten komen vervolgens in oplossing en komen via de watercyclus in de oceaan terecht waar ze het water alkaliseren (Hartmann et al. 2013, Montserrat et al. 2017, Beerling et al. 2018).

Het FWO-SBO project [ESW](#) (*Enhanced Silicate Weathering*) doet onderzoek naar de snelheid van ESW en de bijbehorende CO<sub>2</sub>-opname onder realistische natuurlijke omstandigheden (bioturbatie, golven, stromingen), alsmede naar potentieel belangrijke invloeden op de biogeochemische kringloop in kustecosystemen (vrijkomen van spoormetalen, alkaliniteit, effect opgelost silicaat) door gebruik te maken van mesokosmos-faciliteiten gelegen op het terrein van het [Marien Station Oostende](#).

<sup>8</sup> Voornamelijk het gebruik van olivijn in duniet, een ultramafisch dieptegesteente lijkt geschikt (Balch et al. 2019). Al moet aandacht gegeven worden aan de potentiële risico's verbonden aan een hoge concentratie aan nikkel (Ni) in het gesteente (Meysman & Montserrat 2017) (zie ook 3.3.4 Ecologische impact).

<sup>9</sup> Er wordt verwacht dat eens op de zeebodem, biologische processen resulteren in een verdere verwerking van het olivijn (Montserrat et al. 2017).

### 3.2.2 Kalk

Volgens hetzelfde principe kan naast olivijn ook kalk toegevoegd worden aan de oceaan. Het gaat dan om calciumoxide (CaO) of calciumhydroxide (CaOH<sub>2</sub>) (portlandiet), verkregen na calcinatie (oxidatie d.m.v. verhitting) van kalksteen. Alkalinisatie met calciumoxide of calciumhydroxide heeft als voordeel dat beide moleculen in tegenstelling tot natuurlijke carbonaten<sup>10</sup> **vrijwel onmiddellijk oplossen in zeewater** (Henderson et al. 2008, Renforth & Henderson 2017), maar ook hier blijft de energievraag om deze moleculen te bekomen hoog waardoor het netto-mitigatie effect daalt.

### 3.2.3 Een antwoord op het energievraagstuk

Eigen aan alkalinisatietechnieken is dat er een hoge energie-input vereist is om een relevante captatie-efficiëntie te bereiken, waardoor de netto toegevoegde waarde van de techniek in het gedrang komt. **Binnen de mariene context bestaan er echter opportuniteiten** om voor een stuk aan dit energievraagstuk tegemoet te komen. Zo bestaat er de mogelijkheid om de energie-intensieve stappen te koppelen aan **hernieuwbare energieproductie** op zee. Anno 2020 wordt in het gehele Noordzeegebied 25 GW aan offshore energie gewonnen, een productie die de komende jaren alsmaar zal toenemen (WindEurope 2020, WindEurope 2021) (zie dossier Hernieuwbare offshore energie).

Een andere opportuniteit in de mariene context is het droppen van de alkinaten in een **dynamische omgeving zoals kustregio's**, waar golfactie en biologische activiteit zorgen voor een verdere vermaling en zodoende de oplossing en koolstofcaptatie op een energiezuinige manier voldoende versnellen (Hangx & Spiers 2009, Schuiling & De Boer 2011, Montserrat et al. 2017). Dit zou bijvoorbeeld kunnen tijdens bagger- en stortwerken. Deze niet fijnmazige methode komt wel met het risico dat het captatiepotentieel negatief beïnvloed wordt door het ontstaan van niet-gebalanceerde oplossingen, ongewenste secundaire reacties, een saturatie van het poriewater op de zeebodem, etc. Wat de gevolgen hiervan zouden kunnen zijn voor de mariene voedselketen is nog onvoldoende onderzocht (Montserrat et al. 2017, GESAMP 2019).

Kalksteen (CaCO<sub>3</sub>) kan dan weer versneld ontbinden door deze in een industriële context (waar CO<sub>2</sub> als afvalstof vrijkomt) te laten reageren met zeewater. Hierbij wordt CO<sub>2</sub> verbruikt en alkalische ionen gevormd die vervolgens in zee kunnen gepompt worden (Caldeira & Rau 2000, Rau et al. 2001, Stolaroff et al. 2005, Rau et al. 2007, Langer et al. 2009, Rau 2011, Chou et al. 2015). De techniek vereist echter duizenden tonnen zeewater voor elke ton gecapteerd koolstof, waardoor de techniek eerder relevant lijkt wanneer **koelwater van kustnabije energiecentrales** kan gebruikt worden.

Verder situeren er zich ook opportuniteiten om het verweringsproces efficiënt te versnellen indien **elektrolyse zou toegepast worden met zeewater** (elektrochemische versnelde verwerking), bijvoorbeeld in combinatie met H<sub>2</sub>-productie. Bij dit proces ontstaan er zuren die in combinatie met carbonaat of

---

<sup>10</sup>Oceaanalkalinisatie met calciumcarbonaten (CaCO<sub>3</sub>) is theoretisch mogelijk, maar een oversaturatie aan carbonaten in de oppervlaktewateren verhinderen een efficiënte ontbinding van deze moleculen waardoor geen reactie met atmosferisch CO<sub>2</sub> mogelijk is. Het principe zou evenwel met succes kunnen toegepast worden in ondergesatureerde diepere waterlagen met een snelle verticale waterverplaatsing (Harvey 2008). Na verloop van tijd komt dit ondergesatureerde water aan het oppervlak en kan het zo extra CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer binden. In werkelijkheid is de tijdsperiode waarbinnen deze waterlagen aan het oppervlak komen (honderden jaren) te groot om van nut te kunnen zijn in klimaatmitigatie. Mede gezien het ondiep karakter van de Noordzee is de praktijk hier ook niet relevant.

silicium kunnen geneutraliseerd worden. Wat overblijft na de elektrolyse reactie zijn reactieve hydroxide ionen ( $\text{OH}^-$ ) die in aanwezigheid van oceanische kationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , of  $\text{Na}^+$ ) metaalhydroxiden vormen. Deze metaalhydroxiden zijn op hun beurt heel reactief met  $\text{CO}_2$ . Na contact met atmosferische  $\text{CO}_2$  vormen ze zich snel om tot stabiele bicarbonaatrijke oplossingen die door de oceaan gesequestreerd worden (House et al. 2007, Lu et al. 2015, Rau 2008, Rau et al. 2013). Hoewel het principe van  $\text{H}_2$ -productie gekoppeld aan de versnelde elektrochemische verwerking van carbonaten en silicaten nog in zijn kinderschoenen staat en het mitigatiepotentieel in hoge mate beïnvloed wordt door de gebruikte energiebron, schat een studie het technisch haalbaar om mits de juiste condities via deze weg jaarlijks honderden gigaton aan atmosferische  $\text{CO}_2$  te verwijderen en hierbij duizenden EJ (exajoule, 1 EJ =  $10^{18}$  Joule) aan energie te produceren en op deze wijze een **duurzamer alternatief te bieden aan BECCS** (zie dossier Koolstofcaptatie en -opslag) (Rau et al. 2018).

Ook pekels (*brine*) een restproduct bij de ontzilting van brak of zout water, kan ingezet worden om alkalische moleculen te produceren. Zo bevat de substantie magnesiumzouten zoals  $\text{MgCl}_2$  die na thermale decompositie omgezet worden naar  $\text{MgO}$  (Davies et al. 2018). Eens toegevoegd aan de oceaan worden stabiele bicarbonaten gevormd die de alkaliniteit verhogen en  $\text{CO}_2$  aan de atmosfeer onttrekken, al moet gezegd dat dit proces slechts traag (tientallen jaren) zou kunnen leiden tot een merkbaar effect in atmosferische  $\text{CO}_2$ -concentratie wat maakt dat technologie op korte termijn slechts interessant wordt wanneer de installaties aangedreven worden door hernieuwbare energie of uitgerust zijn met CCS-technologie. Daarnaast ligt het elektriciteitsverbruik bij de procedure circa 50% hoger omwille van een noodzakelijke nanofiltratie (ontwatering) van de pekels. Deze meerkost zou in theorie echter gecompenseerd worden door het **efficiënte koolstof-absorptievermogen van  $\text{MgO}$**  (Davies et al. 2018).

### 3.2.4 Ecologische impact

Het is momenteel nog onduidelijk wat de totale impact van oceanalkalinisatie kan zijn op het mariene milieu. Hoe dan ook zal een toegenomen alkaliniteit resulteren in een lokale stijging van de zuurtegraad, met mogelijks implicaties voor de koolstofcyclus en bijgevolg ook de hiermee verbonden biologische processen (Henderson et al. 2008, Gonzalez & Ilyina 2016, Hauck et al. 2016, Balch et al. 2019). Daarnaast is het aannemelijk dat de effecten een ruimtelijke gradatie kennen die afneemt naarmate men verder verwijderd is van de plaats of regio waar de alkalinitaten worden verspreid (Balch et al. 2019). Ook zal de respons variëren of de alkalinisatie gebeurt via carbonaten of silicaten (Schuiling & Krijgsman 2006, Hartmann et al. 2013, Balch et al. 2019). Beide technieken hebben immers een specifiek effect op het fytoplankton en beiden leiden ze tot een vrijgave van bepaalde spoorelementen (bv. chroom, nikkel, lood, kobalt, etc.) dewelke een potentieel toxisch of fertiliserend effect kunnen veroorzaken (Hartmann et al. 2013, Montserrat et al. 2017, Balch et al. 2019, Renforth 2019). Zo zou nikkel (Ni), in het geval van alkalinisatie met olivijn, vrijkomen in voor het marien milieu schadelijke concentraties (Montserrat et al. 2017). Ander spoorelementen hebben dan weer het risico op bio-accumulatie (Wilson et al. 2019). De meest voor de hand liggende respons is echter een wijziging in de soortensamenstelling, in eerste instantie, bij het fyto- en zoöplankton. Hoe sterk dit effect kan zijn is alsnog onduidelijk, maar het is niet ondenkbaar dat, ondanks een tijdelijke en lokale toediening, drastische wijzigingen in de populatiesamenstelling optreden met biogeochemische gevolgen voor het oceaansysteem (Köhler et al. 2010, Köhler et al. 2013, Balch et al. 2019). Si-gelimiteerde algen kunnen bijvoorbeeld profiteren door andere voedingsstoffen te mobiliseren (N, P) en hun fotosynthese te verhogen. Men kan de toevoeging van olivijn aan het oceaanwater dus beschouwen als een vorm van oceanfertilisatie (zie ook 2. Oceanfertilisatie).

Op het land vereist oceanalkalinisatie een uitbreiding van **milieubelastende mijnbouw** (Royal Society 2009). Zo wordt geschat dat het delven van siliciumhoudende gesteenten met een factor drie dient toe te nemen om te voldoen aan de verwachte vraag.



Er is bijgevolg **nood aan omvattende wetenschappelijke studies om het mitigatiepotentieel en de ecologische impact van deze methode in te schatten** (Montserrat et al. 2017, Balch et al. 2019).

### 3.2.5 Klimaatmitigerend potentieel

Het theoretisch mitigatiepotentieel van oceaankalinisatie is zeer hoog (Gonzalez & Ilyina 2016, Balch et al. 2019). Een studie gevoerd door Hangx & Spiers uit 2009 concludeerde evenwel dat het verspreiden van olivijn in de Nederlandse kustzone weinig efficiënt is. Uit een gedachte-experiment waarbij het jaarlijkse volume aan zand voorbehouden voor strandsuppleties in Nederland (12 miljoen m<sup>3</sup>, Noordzeeloket) wordt vervangen door een eenmalige suppletie van hetzelfde volume aan olivijn werd berekend dat na het volledig oplossen van alle olivijn (200 jaar) ongeveer 5% van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van Nederland uit 2013 zou geneutraliseerd zijn (170 Mton) (Montserrat et al. 2017).

Algemener kan gesteld worden dat er momenteel **te weinig kennis voorhanden** is om over te gaan tot een geïnformeerde besluitvorming wat betreft de geschiktheid van de techniek in het kader van klimaatmitigatie. Als voornaamste kennishiaten worden aangehaald: (1) een intensieve doorlichting van de gebruikte mineralen, met inbegrip van de vorming van ionen en materialen die gevormd worden bij een oceaankalinisatie, (2) de biologische respons op deze alkalische addities, (3) de kwantificatie van de reactie en implicaties van biotische en abiotische carbonaatneerslag en de gevolgen hiervan voor de koolstofopslag, (4) het publiek draagvlak, (5) een haalbare business case en kosten-efficiëntie, (6) adequate monitoring en validatie (Henderson et al. 2008, Hartmann et al. 2013, Köhler et al. 2013, Hauck et al. 2016, Strefler et al. 2018, Balch et al. 2019, GESAMP 2019). Verder zijn er ook substantiële investeringen en energieconsumptie verbonden aan het uitbouwen van mijninfrastructuur, verwerking en logistiek. Een fundamentele kosten-baten analyse over heel de waardeketen is dus aangewezen (Strefler et al. 2018)<sup>11</sup>. Omwille van bovenstaande redenen dient de techniek vooralsnog als laag technisch haalbaar en risicovol te worden gecatalogeerd en is vooreerst meer wetenschappelijk onderzoek naar de effectiviteit in natuurlijke omstandigheden en de implicaties van potentiële schadelijke neveneffecten vereist (NRC 2015b, Gattuso et al. 2019, GESAMP 2019).

---

<sup>11</sup> Een alomvattende beoordeling van de economische kosten, de energiebehoeften, de technische parameterisering en het wereldwijde en regionale koolstofverwijderingspotentieel is uitgevoerd door Strefler et al. 2018. De prijs van versnelde verwerking per ton gecapteerd CO<sub>2</sub> (54-180 euro) ligt hoger dan bij BECCS of herbebossing, maar is goedkoper dan DAC (zie 6. Negatieve emissies - BECCS en DAC, dossier koolstofcaptatie- en opvang).

## 4. Oceaanalbedo modificatie

Ongeveer 6% van het zonlicht dat de oceaan bereikt wordt teruggestraald naar het heelal (NSIDC). Dit fenomeen is gekend als het ‘albedo-effect’. De proportie aan gereflecteerd zonlicht wordt bepaald door het albedo-gehalte van een oppervlak. Donkere oppervlaktes met een laag albedo-gehalte absorberen meer zonlicht en warmen hierdoor sneller op, waar lichtere oppervlaktes (zoals sneeuw en ijs) met een hoog albedo-gehalte meer reflecteren. De aarde als geheel reflecteert gemiddeld 30% van het zonlicht, wat maakt dat **de oceaan slechts in beperkte mate het zonlicht weerkaatst en bijgevolg makkelijk warmte opneemt**. De oceaanalbedo varieert in hoofdzaak door veranderingen in de hoeveelheid zeeijs en door toedoen van de El Niño en La Niña events, die zorgen voor meer wolkvorming over bepaalde delen van de oceaan (NASA Earth Observatory). Modelexperimenten die de interacties tussen de oceaanalbedo, wolken en de atmosferische circulatie in rekening brengen, tonen aan dat indien de oceaanalbedo beperkt kan verhoogd worden, de oceaantemperatuur, zeespiegelstijging en het broeikas-effect drastisch kunnen afnemen (Seitz 2011, NRC 2015a, 2015b, Crook et al. 2016, Gabriel et al. 2017). Zo zou een verhoging van de oceaanalbedo van 5% voldoende zijn om de gehele antropogene klimaatopwarming te compenseren (Seitz 2011). Het **klimaatmitigatiepotentieel van het concept is dus erg hoog** (GESAMP 2019).

Binnen deze context zijn sedert tientallen jaren verschillende methodes onderzocht om de oceaanalbedo artificieel te verhogen aan de hand van albedo-modificerende (AM) technieken zoals de productie van microbubbels, stabiele schuimen, de stimulatie van reflectieve algenbloei (zie 2. Oceaanfertilisatie), het installeren van reflectieve materialen of het stimuleren van ijsvorming (GESAMP 2019)<sup>12</sup>. De verschillende gangbare AM-technieken kennen echter een **kortdurende uitwerking** (dagen-maanden) en **zorgen niet voor een reductie van de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer**, noch reduceren ze de oceaanzuurings (Russell et al. 2012, NRC2015b, Gattuso et al. 2018). Wel zouden ze enige relevantie kunnen hebben wanneer in geval van nood, zoals bij van het benaderen van ecologische/klimatologische “*tipping points*” een snelle afkoeling noodzakelijk is (Royal Society 2009). Door een gebrek aan veldtesten, is het tevens **niet duidelijk wat de langetermijneffecten van een grootschalige implementatie kunnen zijn**. Het is evenwel zeer waarschijnlijk dat de gevolgen substantieel kunnen zijn, daar de techniek direct ingrijpt op de energiebalans van de aarde en zorgt voor een verminderde lichtpenetratie over grote oceaanooppervlaktes (Robock 2011, Russell et al. 2012, NRC 2015a, 2015b, Crook et al. 2016). Een omvattende impactanalyse inclusief de ecologische effecten is dus aangewezen (Seitz 2011, Irvine et al. 2017).

Daarnaast vertonen AM-technieken over het algemeen een zeer lage technische haalbaarheid en behoort de kosten-efficiëntie tot de laagste van de huidig beschikbare marine geoengineering methodes (Gattuso et al. 2018, GESAMP 2019). De implementatie van AM-technieken vereist ook internationale samenwerking, gezien de effecten moeilijk geografisch af te bakenen zijn en met een grote waarschijnlijkheid juridische zeegrenzen overstijgen (Royal Society 2009, Pasztor 2017). In combinatie met een huidig aanzienlijk gebrek aan wetenschappelijke kennis dienen AM-technieken als een “risicovol” en weinig matuur concept te worden beschouwd (NRC 2015b, Gattuso et al. 2019, GESAMP 2019).

---

<sup>12</sup> Naast oceaanalbedo modificerende technieken, kan de oceaan ook ingezet worden om de albedo van de atmosfeer te veranderen, zoals in het concept van *Marine Cloud Brightening* (Jones et al. 2011, Kravitz et al. 2013, NRC 2015b, GESAMP 2019).

Wat volgt is een beknopte theoretische beschouwing van enkele AM-technieken die theoretisch gezien zouden kunnen plaatsvinden in ondiepe gematigde zeeën zoals de Noordzee. Omwille van de vooralsnog substantiële onzekerheden verbonden aan de ecologische impact, mogelijke klimaat-feedback reacties, de technische haalbaarheid en het mitigatiepotentieel, zal hier in tegenstelling tot de vorige marine geoengineering methoden geen evaluatie gemaakt worden van de toepasbaarheid of het mitigatiepotentieel van de voorgestelde methoden in het Noordzeegebied.

## 4.1 Bubbeldordijnen

Het creëren van microbubbels (< 100 µm) in de bovenste meters van de oceaan verhoogt de helderheid van het oppervlaktewater door een **toenemende reflectie** in de oceaan-atmosfeer grenslaag. Daarnaast kunnen de bubbels na openbarsten zoutpartikels in de lucht brengen die **wolkvorming** stimuleren en zodoende het albedo-effect verder verhogen (Evans et al. 2010, Seitz 2011, Crook et al. 2016, Gabriel et al. 2017). Hoewel de techniek een groot mitigatiepotentieel heeft (Seitz 2011, Crook et al. 2016, GESAMP 2019), hebben microbubbels vermoedelijk eerder de grootste verdienste **wanneer op lokale schaal en op korte termijn schadelijke meteorologische verschijnselen (zoals hevige stormen) gemitigeerd moeten worden**. Dergelijke microbubbels zouden immers de kracht van orkanen kunnen afremmen, doordat zij koeler water aan de oppervlakte brengen. Om praktische redenen is de techniek ook minder geschikt om effectief bij te dragen aan mondiale klimaatmitigatie, daar naar schatting meer dan 30.000 schepen vereist zouden zijn die simultaan bubbels produceren om een daling in de wereldtemperatuur van 0,5°C te bereiken (Crook et al. 2016). Om te besluiten of het concept in natuurlijke condities enig klimaatmitigatiepotentieel heeft, zouden er bovendien bubbels moeten geproduceerd worden over een zone die groter is dan eender welk uitgevoerd oceaanfertilisatie-experiment (>300 km<sup>2</sup>) (Wallace et al. 2010). Men zou daarentegen de efficiëntie van de techniek wel drastisch kunnen bevorderen indien de levensduur van de bubbels kan verlengd worden via **oppervlakte-actieve stoffen** (natuurlijke drijfstoffen zijn koolwaterstoffen, eiwitten, vetten naast amfifiele stoffen<sup>13</sup> (zoals gebruikt in detergents, zepen)) (voor meer achtergrond zie Dressaire et al. 2008, Aziz et al. 2014, Crook et al. 2016). Zo zou een eenzelfde temperatuurreductie van 0,5 °C mogelijk zijn wanneer de bubbels geproduceerd door de scheepvaart intact blijven voor 6-13 dagen in plaats van enkele minuten (Crook et al. 2016).

## 4.2 Stabiele schuimen

Een meer verkende onderzoekspiste is deze gewijd aan zogenaamde stabiele reflectieve schuimen (bv. schuimen op basis van gelatine-methylesters of cellulose-esters met carrageen) en hoe deze met een zo hoog mogelijke stabiliteit en klimaatmitigatiepotentieel kunnen geproduceerd worden (Aziz et al. 2014, Crook et al. 2016, Gabriel et al. 2017, Garciadiego Ortega & Evans 2019). Stabiele schuimen met een albedo ≥ 0,5 (meer dan 50% weerkaatsing) zijn reeds ontwikkeld (Aziz et al. 2014), maar deze vertoonden de **beste prestaties in labocondities** die het mariene milieu niet benaderden. Tot op heden (april 2021) zijn geen veldexperimenten bekend die de interactie van stabiele schuimen in een natuurlijke omgeving onderzochten.

---

<sup>13</sup>Amfifiele stoffen zijn stoffen met zowel een wateroplosbare als waterafstootbare eigenschap. De meest gekende amfifiele stoffen zijn zepen, detergents en eiwitrijke vetten.

### 4.3 Ecologische risico's

Met uitzondering van simulaties zijn er in de context van marine geoengineering vooralsnog (april 2021) **geen diepgaande onderzoeken gewijd aan de potentiële effecten** van bubbelgordijnen, stabiele schuimen en andere geïntroduceerde chemicaliën op een marien ecosysteem, of economische en sociale activiteiten in een kust- of mariene omgeving. Dit heeft allicht te maken met het feit dat veel AM-technieken eerder **theoretische oefeningen** zijn en nog ver van implementatie staan. Met behulp van modelstudies kan evenwel een reeks potentieel erg ingrijpende neveneffecten van bovenstaande technieken voorspeld worden. Zo riskeren AM-technieken oncontroleerbare wijzigingen in het klimaatsysteem, permanente biologische veranderingen in de oceaan met een impact op de koolstofcyclus, ongekende interacties met andere organische verbindingen in het oppervlaktewater, veranderingen in de oceaancirculatie, tot effecten verbonden aan de mogelijke chemische reacties met de alsmat talrijker aanwezige microplastics te veroorzaken (Robock 2011, Salter et al. 2011, Russell et al. 2012, Keller et al. 2014, NRC 2015a, 2015b, Crook et al. 2016, UNEP 2016, Gabriel et al. 2017, Mari et al. 2017, Cao 2018, GESAMP 2019). Een grote onzekerheid eigen aan het creëren van microbubbels en stabiele schuimen is de milieu-impact van de actieve stoffen en stabilisatoren die de levensduur van bubbels en schuimen moeten verlengen. Daarnaast zijn er ook **zorgen over het effect op de productiviteit** van het ecosysteem, gezien bubbelgordijnen en schuimen zorgen voor een verminderde lichtinval in de zone waar fotosynthese plaatsvindt. Wat het effect hiervan kan zijn op het biologisch systeem en op het mitigatiepotentieel van de technieken is nog niet onderzocht, maar onderzoek gedaan binnen de context van *marine cloud brightening*, dat eveneens een verminderde inval van zonlicht op het oppervlaktewater teweegbrengt, wijst op een daling van de productiviteit (Jones et al. 2011, NRC2015b). In tegenstelling tot AM-technieken die toegepast worden in de atmosfeer, zijn er in het geval van microbubbels echter geen schadelijke reflectieve elementen die de stratosfeer bereiken (bv. zwavel aerosolen).

Een overzicht van de voornaamste onzekerheden wat betreft de modificering van de (oceaan)albedo wordt gegeven in [NRC2015b](#) en [GESAMP 2019](#).



Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



# Dossier Blue carbon



# Inhoudsopgave

|   |           |
|---|-----------|
| 1. Introductie                            | (PAG. 2)  |
| 2. Schorren                               | (PAG. 4)  |
| 3. Zeegras                                | (PAG. 6)  |
| 4. Zeewier                                | (PAG. 7)  |
| 4.1 Zeewierkweek in de Belgische Noordzee | (PAG. 9)  |
| 4.2 Ecologische impact                    | (PAG. 10) |

# 1. Introductie

Kustecosystemen met zeegras, mangroves of schorren behoren tot de zogenaamde ‘blue carbon ecosystemen’ (Nelleman et al. 2009). Deze ecosystemen zijn in staat **substantiële hoeveelheden koolstof efficiënt te capteren en sequestreren** (Nelleman et al. 2009, Mcleod et al. 2011, Pendleton et al. 2012, Siikamäki et al. 2013, Howard et al. 2017, UNESCO 2020, IUCN 2021), met een sequestratiegraad die wel tien keer hoger ligt dan bij bosecosystemen<sup>1</sup> (Mcleod et al. 2011, IUCN 2021) (zie figuur). Hoewel hun oppervlakte op wereldschaal slechts overeenkomt met 1,5% van de totale beboste oppervlakte (Mcleod et al. 2011), bevatten deze ecosystemen, zij het hoofdzakelijk **op lokaal niveau, een sterk klimaatmitigatiepotentieel** (Herr & Landis 2016, Gattuso et al. 2018, IPCC 2019, UNESCO 2020, IUCN 2021). Een aantal studies wijzen er ook op dat de koolstofsinkfunctie van deze ecosystemen, mits het juiste beheer, nog kan gestimuleerd worden (Griscom et al. 2017, Howard et al. 2017a, 2017b, Macreadie et al. 2017, UNESCO 2020).

Schattingen van het globale klimaatmitigatiepotentieel van blue carbon ecosystemen (inclusief het mitigatiepotentieel verbonden aan zeewierkweek) lopen uiteen van 0,50 tot 1,38 Gton CO<sub>2</sub>/jaar<sup>2</sup> (Gattuso et al. 2018, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Deze relatief beperkte bijdrage valt vooral te verklaren doordat fysische en biogeochemische factoren een limiet stellen op het verspreidingsgebied. Wel kan er in bepaalde regio's, voornamelijk op het vlak van zeewieraquacultuur, artificieel ruimte bijgemaakt worden (Duarte et al. 2017, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a, zie ook 4. Zeewier<sup>3</sup>). De relatief grote onzekerheid in deze schatting is dan weer toe te schrijven aan problematische oppervlakteschattingen en de onzekere evolutie van schorren en zeegrasesystemen (Hoegh-Guldbergh et al. 2019a).

Naast een sterk mitigatiepotentieel zijn blue carbon ecosystemen, net als in het geval van oceaanalkalinisatie (zie Dossier Marine geoengineering), in staat schadelijke klimaateffecten (verzuring, zeespiegelstijging, opwarming) te mitigeren (Griscom et al. 2017, Gattuso et al. 2018, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Op lokaal niveau kunnen deze voordelen substantieel zijn. Zo is reeds aangetoond dat **dense zeewier- en zeegrasesystemen de oceaanverzuring tegengaan** (Unsworth & Unsworth 2013, Hendriks et al. 2014, Krause-Jensen & Duarte 2016, Wahl et al. 2018, Kapsenberg & Cyronak 2019) en dat deze effecten, mits een zeker areaal, kunnen doorstromen naar naburige ecosystemen (Camp et al. 2016). Dit bufferend effect tegen oceaanverzuring is onder meer voordelig voor de calcificerende organismen<sup>4</sup> die vertoeven in deze ecosystemen (Unsworth & Unsworth 2013, Sippo et al. 2016). Evenzeer **beschermen** blue carbon ecosystemen **het hinterland tegen de overstromingsrisico's** gelinkt aan de zeespiegelstijging door het atteneren van de golfenergie en het stabiliseren van de kustlijn (Duarte et

---

<sup>1</sup> De jaarlijkse primaire productie in de Noordzee bedraagt naar schatting tussen 370-6.000 kg C/ha.jaar (Brion et al. 2004). Voor het BNZ zou dit neerkomen op een stock van circa 1.380 kton koolstof (1,38 miljoen ton) (Vanderbiest et al. 2017). Dit zijn relatief lage cijfers, wat voornamelijk te verklaren valt door de lage dichtheid van fytoplankton en een gebrek aan zeewier in de Noordzee (Beaumont et al. 2007). Verder wordt het gros van de primaire productie gerecycleerd binnen het systeem, iets wat typisch is voor zeeën gedomineerd door zacht substraat en de afwezigheid van zeegrassen en zeewieren (Liquete et al. 2013).

<sup>2</sup> Exclusief het natuurlijk mitigatiepotentieel verbonden aan mariene fauna en het restoratiepotentieel van zeegras.

<sup>3</sup> Zeewiervelden zijn strikt gezien geen blue carbon ecosystemen (Krause-Jensen et al. 2018), maar zullen binnen dit dossier wel aan bod komen gezien hun sterke koolstofcaptatiepotentieel en mitigatie opportuniteiten.

<sup>4</sup> Organismen die voor hun overleving skeletten of schalen gaan aanmaken van calciumcarbonaat. Het proces is ook wel gekend als mariene biogene verkalking. Het fenomeen doet zich voor bij mariene organismen behorende tot de: foraminiferen (algen), coccolitoforen (algen), weekdieren, schaaldieren en echinodermata (koralen, zee-egels).

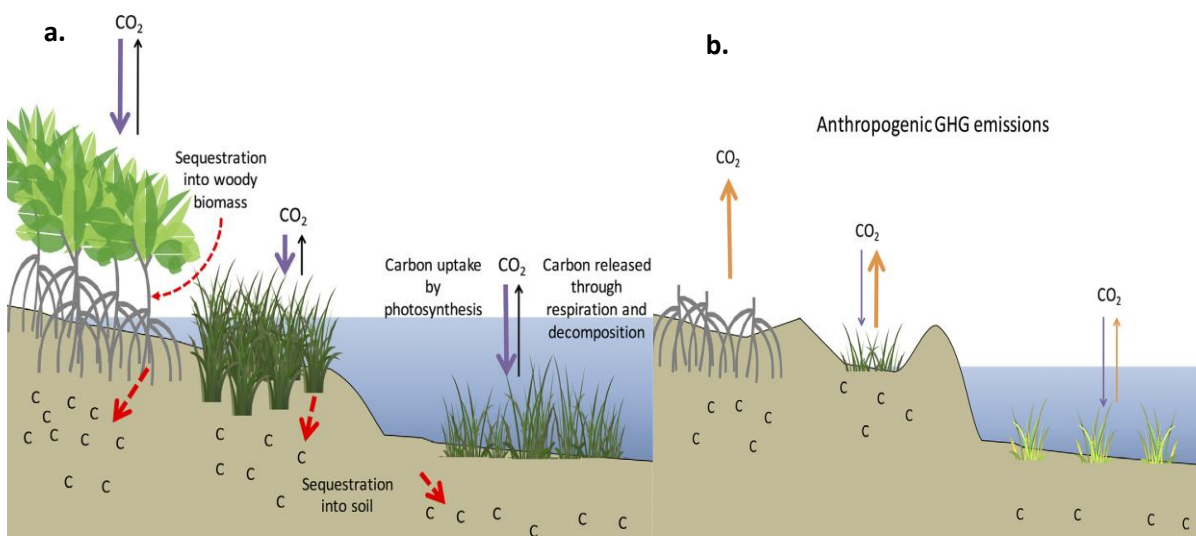
al. 2013). Verder hebben deze ecosystemen ook een **maatschappelijke waarde** op het vlak van toerisme en recreatie, voedselvoorziening, waterfiltering, etc. (Barbier et al. 2011, Unsworth & Unsworth 2013, Weatherdon et al. 2016, UNESCO 2020).

De bescherming, een passend beheer en herstel van blue carbon ecosystemen geldt als **een van de veiligste, doeltreffendste en meest kosten-efficiënte manieren om de strijd tegen de klimaatopwarming en zijn gevolgen aan te gaan** (Jones et al. 2012, Griscom et al. 2017, Gattuso et al. 2018, 2019, UNESCO 2020). Niet in het minst omdat de **voordelen quasi permanent** zijn en men reeds een goed beeld heeft van de voorwaarden waarbinnen deze ecosystemen goed kunnen gedijen (Siikamäki et al. 2012, Bayraktarov et al. 2016, Griscom et al. 2017, Seddon et al. 2019a, 2019b). Goede praktijkvoorbeelden over hoe deze ecosystemen te beschermen en beheren, worden gegeven in Laffolley & Grismditch (2009), Nelleman et al. (2009) en Herr et al. (2017). Een basisvoorwaarde om deze *best practice* richtlijnen te implementeren, is de noodzaak aan een diepgaand wetenschappelijk inzicht in de factoren die van invloed zijn op de koolstofcaptatie en -sequestratie in deze ecosystemen. Met deze kennis kunnen gebieden aangewezen worden die een hoge prioriteit hebben voor herstel en/of instandhoudingsbeheer. Daarenboven kan ook een **gedetailleerde kartering van blue carbon ecosystemen** gekoppeld aan het vrijwaren van de biofysische, sociale en economische voorwaarden voor restauratie, helpen om de slaagkans van restauratie te verhogen, alsook om de hoeveelheid gesequestreerd koolstof correct in te schatten (Crooks et al. 2011, Lee et al. 2019). Een vergelijkende analyse van de instandhoudings- en hersteltrajecten (heden-2030-2050) vanuit klimaatmitigerend perspectief voor blue carbon ecosystemen is terug te vinden in Hoegh-Guldberg et al. (2019).

Vanwege bovengenoemde eigenschappen draagt **binnen de mariene context het beheer en de bescherming van blue carbon ecosystemen (samen met offshore windproductie) momenteel het meest bij tot de VN-Duurzaamheidsdoelstellingen**. Dit verklaart eveneens de populariteit van deze mitigatiemaatregel in nationale klimaatplannen die oceanische klimaatmitigatie methodes vermelden, zoals blijkt uit de Nationale Bijdragen die in het kader van het Akkoord van Parijs zijn ingediend (Gallo et al. 2017, NDCs).

Blue carbon ecosystemen staan echter ondanks toenemende restauratiepogingen **wereldwijd onder druk** (Griscom et al. 2017, Unsworth et al. 2018, Gittman et al. 2019, Goldberg et al. 2020, UNESCO 2020). De mate van impact is vooral afhankelijk van de aard en intensiteit van menselijke activiteiten (bv. aanvoer van sediment, nutriëntbelasting, veranderingen in landgebruik, bevolkingsevolutie, zeeveringstrategie, etc.) en de effecten van de klimaatverandering op aangrenzende ecosystemen (Hopkinson et al. 2012, Saunders et al. 2013, Schuerch et al. 2018). Daarnaast zijn blue carbon ecosystemen zelf ook niet immuun voor klimaatopwarming (McDermott et al. 2012, Saunders et al. 2013, Schuerch et al. 2018, IPCC 2019, UNESCO 2020). Gezien deze ecosystemen het merendeel van hun koolstof ondergronds opslaan, waar het zoute water zorgt voor extreem lage decompositie en aanleiding geeft tot grote koolstofstocks, zorgt het verlies van deze ecosystemen dan ook voor een grote vrijgave van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer, wat de klimaatopwarming verder versterkt (Duarte et al. 2005, Mcleod et al. 2011, Pendleton et al. 2012, Hopkinson et al. 2012, IPCC 2014, Griscom et al. 2017, Howard et al. 2017, Lovelock et al. 2017) (zie figuur). Klimaat-gerelateerde effecten zijn reeds voelbaar, zo blijken bepaalde zeewier- en zeegrassoorten kwetsbaar voor **mariene hittegevolgen** met een verminderde productiviteit tot gevolg (Arias-Ortiz et al. 2018, Wernberg et al. 2019). De natuurlijke distributie van zeewieren, zeegrassen en schorren kan, mits de omgeving het toelaat, echter verschuiven wanneer niet langer aan de optimale groeicondities kan voldaan worden, waarbij sommige soorten zich poolwaarts kunnen uitbreiden, terwijl soorten gebonden aan warmere wateren waarschijnlijk aan ruimte zullen moeten inboeten (Hastings et al. 2020). Naast een toenemende klimaatdreiging zijn deze ecosystemen ook vatbaar voor de gevolgen van slechte beheer- of beleidskeuzes (Herr et al. 2017, Lee et al. 2019).





a. Intacte blue carbon ecosystemen zijn efficiënte koolstofcapteerders en sequestreerders. b. Beschadigde blue carbon ecosystemen nemen minder CO<sub>2</sub> op en stoten, zeker in contact met zuurstof, veel CO<sub>2</sub> uit door een versnelde afbraak van de opgebouwde koolstofstocks (Schets uit Howard et al. 2017).

## 2. Schorren

Schorre-ecosystemen zijn opgebouwd uit zoutminnende vegetatie die zich ontwikkelt tussen de hoogwater- en springvloedlijn en vormen zich op slibrijke sedimenten van estuaria en ondiepe kustvlaktes (Natura2000, Vandebussche et al. 2002, Vanderbiest et al. 2017). Van alle blue carbon ecosystemen heeft dit ecosysteem het kleinste areaal en zijn ze geografisch gezien het sterkst verspreid. Een studie uitgevoerd door McOwen et al. (2017) schatte de globale oppervlakte aan schorren op circa 55.000 km<sup>2</sup> waarvan >4.500 km<sup>2</sup> in Europa (zij het met een bepaalde onzekerheid). Deze onzekerheid is te wijten aan het feit dat vooral op globaal niveau deze ecosystemen nog niet op een systematische manier gekarteerd zijn (McOwen et al. 2017). De evolutie van het schorrenbestand is eveneens moeilijk in te schatten (Schuerch et al. 2018, Laengner et al. 2019), al wordt ervan uitgegaan dat reeds **25-50% van alle schorren verdwenen zijn**, hoofdzakelijk omwille van landconversie voor menselijke activiteiten. Jaarlijks zou ook nog een habitatverlies in de grootteorde van 1-2% plaatsvinden, al zijn er duidelijk afwijkende regionale trends (Bridgham et al. 2006, Crooks et al. 2011, Laengner et al. 2019). In Europa zijn deze ecosystemen beschermd (Natura 2000, Kaderrichtlijn Water 2000/60/EG).

Net als zeegrassen (en mangroves) zijn ook schorren **efficiënte koolstofcapteerders**. Schorren capteren de meeste koolstof via sedimentatie en de begraving van plantenresten (Mcleod et al. 2011, Duarte et al. 2013). Gemiddeld bedraagt de sedimentatiesnelheid bij schorren (gemeten op de Zeeschelde) tussen de 0,5-2,0 cm per jaar (Maris et al. 2016), overeenkomstig met de natuurlijke buffercapaciteit van ecosystemen tegen een stijgende zeespiegel (Brouwers et al. 2015)<sup>5</sup>. Uit onderzoek waarbij directe en indirecte data van 143 locaties in de noordelijke en zuidelijke hemisfeer gecombineerd werd, bleek dat het jaarlijks koolstofaccumulatiepotentieel van schorren bij benadering 242,2 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> bedroeg, resulterend in een totaalpotentieel van 10,1 Mton CO<sub>2</sub>/jaar (Ouyang & Lee 2014). Hiermee zou het

<sup>5</sup> Op globaal niveau steeg de zeespiegel tussen 1993 en 2015 met 3 mm/jaar (Brouwers et al. 2015).

accumulatievermogen van koolstof door schorren vergelijkbaar zijn met deze van mangroves en deze van zeegrassen overtreffen (Mcleod et al. 2011). Hoeveel het werkelijke opslagpotentieel effectief bedraagt, is echter moeilijk te kwantificeren omwille van de sterke geografische spreiding en de gebrekkige kartering van deze ecosystemen en daarnaast zijn er nog belangrijke beïnvloedende omgevingsvariabelen. Zeker is wel dat het verlies van deze ecosystemen bijdraagt aan de klimaatopwarming en het hiermee gepaard gaande overstromingsrisico (Pendleton et al. 2012). Schorre ecosystemen zouden tegen 2050 mits het juiste beheer en restauratieprojecten in staat zijn om jaarlijks tussen de 0,05 en 0,10 Gton koolstof te mitigeren (Hoegh-Guldbergh et al. 2019a).

**Schorren stoten echter ook CO<sub>2</sub>, lachgas (N<sub>2</sub>O) en methaan (CH<sub>4</sub>) uit (Poffenbarger et al. 2011, Ford et al. 2012).** Deze twee laatste stoffen zijn eveneens belangrijke broeikasgassen en na omrekening naar hun koolstofequivalent kan dit resulteren in een jaarlijkse netto uitstoot tussen 2,5-6,9 ton CO<sub>2</sub>/ha (gebaseerd op schattingen uit een ecosysteem vergelijkbaar met de Belgische kust) (Ford et al. 2012, Vanderbiest et al. 2017). Dergelijke omrekeningen naar koolstofequivalenten moeten echter met de nodige voorzichtigheid benaderd worden, daar de netto captatiecapaciteit en uitstoot sterk onderhevig zijn aan de lokale omstandigheden en de natuurlijke dynamiek. Onderzoek wijst in de richting dat schorren in polyhalieene (sterk zoute) milieus amper methaan uitstoten (Poffenbarger et al. 2011) en dus **in wezen nagenoeg altijd netto een sink zijn voor koolstof.**

Naast een doeltreffende koolstofcaptatie en -sequestratie, zijn schorren ook **belangrijke leveranciers van andere maatschappelijk (en in se dus economisch) interessante ecosysteemdiensten** waar de mens al geruime tijd gebruik van maakt (Gedan et al. 2009, Maris et al. 2014, Rendón et al. 2019). Een belangrijke ecosysteemdienst binnen de klimaatcontext is de bescherming tegen een stijgende zeespiegel en stormen. Zo vormt een sterke sedimentcaptatie in combinatie met vaak erg flexibele stengels een efficiënte buffer tegen de getijstrooming en golfwerking (Shepard et al. 2011, Silinski 2015). Dit maakt schorren zeer **geschikt als natuurlijke kustbeschermingsmaatregel** in het rijtje van klimaatadaptieve mogelijkheden (Gedan et al. 2009, Shepard et al. 2011, Temmerman et al. 2013, Möller et al. 2014, Stark et al. 2015, Müller-Navarra et al. 2019). Daarnaast gedragen ze zich ook als een filter voor nutriënten en afvalstoffen, waardoor ze van waarde zijn als regulator van de waterkwaliteit, zijn het beschermde habitatgebieden met een belangrijke foerageer- en voortplantingsfunctie, en bieden ze ook recreatieve opportuniteiten (Gedan et al. 2009, Barbier et al. 2011, Maris et al. 2014, Rendón et al. 2019).

Hoewel ze floreren in erg dynamische omgevingen, zijn ook deze waardevolle ecosystemen kwetsbaar voor klimaatverandering. Schorren zijn minder gevoelig voor verzuring en een hogere watertemperatuur, maar **reageren sterk op veranderingen in het zeespiegelniveau** (Gedan et al. 2009, Cahoon & Guntenspergen 2010, Kirwan & Megonigal 2013, Hood et al. 2016). De voornaamste bedreiging voor hun verspreiding en functioneren stelt zich wanneer een steile of harde kustlijn een landinwaartse uitbreiding verhindert of wanneer de sedimentaanvoer, dewelke vooral afkomstig is uit de lager gelegen slikken, te laag is om te compenseren voor een stijgend zeeniveau (Gedan et al. 2009, Hood et al. 2016, Schuerch et al. 2018, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Naast de zeespiegelstijging zijn er nog een hele reeks andere bedreigingen, zoals bv. invasieve soorten, vervuiling, eutrofiëring, etc. (An et al. 2007, Gedan et al. 2009). Een relevant voorbeeld in verstedelijkte gebieden is het nadelig effect van overmatig veel voedingsstoffen (zie dossier Marine geoengineering). Zo is bij schorren die extra voedingsstoffen toegediend kregen, aangetoond dat deze minder ondergrondse biomassa aanmaakten en dat deze ook sneller afgebroken werd. Dit maakt het opbouwen van ondergrondse koolstofstocks problematisch en daarnaast zijn deze schorren ook minder in staat het omliggend sediment te stabiliseren waardoor hun adaptief vermogen tegen zeespiegelstijging afneemt (Deegan et al. 2012). Dergelijke resultaten wijzen nogmaals op de **noodzaak van integratief wetenschappelijk onderzoek en monitoring** naar het

functioneren van schorren zodat een goed beeld kan gevormd worden van hoe dit ecosysteem onder invloed staat van verschillende stressoren en omgevingsvariabelen (Gedan et al. 2009, Nolte et al. 2013). Bovenal tonen deze inzichten aan dat het optimale klimaatmitigatiepotentieel van natuurlijke ecosystemen slechts kan gerealiseerd worden **indien de algemene kwaliteit van het milieu verbeterd**.

Ondanks het feit dat schorre ecosystemen onder druk staan, is het herstellen van schorre landschappen **technisch gezien niet moeilijk, met over het algemeen blijvend succes** (An et al. 2007, Mossman et al. 2012, Bayraktarov et al. 2016). De restauratie van deze ecosystemen kan dus resulteren in substantiële klimaatmitigatie-winsten (Esteves & Williams 2017), al moet gezegd dat de opbouw van de ondergrondse koolstof- en stikstofstocks trager verloopt bij herstelde schorren dan bij ongewijzigde ecosystemen (Craft et al. 2003). De aanwezigheid van de bovengenoemde ecosystemendiensten kan de praktijk bovendien economisch rendabel maken, gezien de maatschappelijke meerwaarde t.o.v. conventionele harde kustbeschermingsmaatregelen (Turner et al. 2007, Luisetti et al. 2011, Sigmaphan, Temmerman et al. 2013, Griscom et al. 2017). Een middel om de bescherming en restauratie van deze nuttige ecosystemen verder te stimuleren bestaat erin **een bedrag te plaatsen op relevante ecosystemendiensten**, zoals het sequesteren van koolstof of kustverdediging (Herr et al. 2017, Coopman et al. 2019).

Schorren komen langs de Belgische kust voor aan de monding van de IJzer, de Baai van Heist en het Zwin. Hun areaal wordt geschat op 64,7 ha (Vanderbiest et al. 2017). De maximaal mogelijke verspreiding van schorren in de Belgische kustzone (exclusief Schelde-estuarium) wordt geschat op 117,7 ha (Vanderbiest et al. 2017). De Westerschelde bevat zo'n 2.265 ha aan buitendijkse schorren (PAS-gebiedsanalyse Westerschelde en Verdrongen Land van Saefthinge 2017).

### 3. Zeegras

Zeegrasesystemen (*Zostera* spp.) beslaan slechts 0,1% van de oceaan, maar komen op uitzondering van de poolstreken in alle werelddelen voor (Short et al. 2007, World Atlas of Seagrasses – UNEP 2013). Deze zeldzame ecosystemen behoren, proportioneel tot hun aanwezigheid, tot de grootste koolstofsinks van alle aardse ecosystemen, wat deze ecosystemen potentieel tot een **belangrijke bondgenoot maakt in de strijd tegen de klimaatopwarming** (Duarte et al. 2010, Mcleod et al. 2011, Duarte et al. 2013, Mazarrasa et al. 2015, Duarte & Krause-Jensen 2017). Naast het opvangen en sequesteren van grote hoeveelheden koolstof, verhogen zeegrasvelden lokaal de zuurtegraad van het water waardoor ook **schadelijke verzuringseffecten afgeremd** worden (Unsworth & Unsworth 2013). Zeegrassen zijn de laatste jaren echter **drastisch afgenomen in oppervlakte** (Mcleod et al. 2011, Unsworth & Unsworth 2013, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a, Green et al. 2021), al lijkt de trend in Europa de laatste jaren te zijn omgebogen (De Los Santos et al. 2019). De voornaamste reden voor deze achteruitgang is de sterke gevoeligheid voor verstoring, sterke temperatuurfluctuaties in het zeewater, en de behoefte aan helder, onvervuild water (Duarte et al. 2002, Unsworth & Unsworth 2013, Saunders et al. 2013, Hyndes et al. 2016, Philippart et al. 2020). Het jaarlijkse globale verlies aan zeegrasesystemen wordt geschat tussen 2-7% (Duarte et al. 2008, Waycott et al. 2009, Unsworth et al. 2018), wat resulteert in een CO<sub>2</sub>-uitstoot tussen 0,05-0,33 Gton/jaar (Pendleton et al. 2012). Net als schorre ecosystemen leveren zeegrassen talrijke **belangrijke ecosystemendiensten**. Zo zijn ze belangrijk voor de biodiversiteit, verbeteren ze de waterkwaliteit, zijn ze in staat om de hydrodynamiek af te remmen, etc. (Duarte 2002, Unsworth & Unsworth 2013). De maatschappelijke waarde van deze ecosystemen mag met andere woorden niet onderschat worden (Unsworth & Unsworth 2013, Unsworth et al. 2018), al blijkt dit nog te weinig erkend (Duarte et al. 2008).

Het herstellen van deze ecosystemen en hun ecosysteemdiensten is haalbaar, maar niet eenvoudig. De voorbije decennia zijn er echter belangrijke inzichten verworven en nemen de restauratiepogingen toe (Paling et al. 2009, Greiner et al. 2013, De Los Santos et al. 2019, Orth et al. 2020, Philippart et al. 2020, Seagrass Ocean Rescue). De beste resultaten lijken te worden behaald in gebieden waar zeegrassen voorheen voorkwamen, de waterkwaliteit van voldoende hoge kwaliteit is en wanneer het donormateriaal verzameld wordt in een vergelijkbaar habitat als het te herstellen gebied (van Katwijk et al. 2009, Philippart et al. 2020). Zeegrassen hebben een hoger restoratiepoteentieel dan schorren, al ligt het potentieel hersteld areaal hoger bij schorren (gecorrigeerd naar km<sup>2</sup>) (Griscom et al. 2017, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Volgens schattingen zijn, behoudens herstellende maatregelen en een goed beheer, zeegrasesystemen tegen 2050 in staat om jaarlijks 0,22-0,70 Gton CO<sub>2</sub> te capteren (Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Een middel om deze cijfers te benaderen bestaat erin om een geldwaarde te verbinden aan de koolstofsink functie en de ecosysteemdiensten en een financiële compensatie mogelijk te maken bij herstelwerken (zie ook 2. Schorren). Ideeën over hoe dit in het geval van zeegrassen zou kunnen vorm krijgen, komen aan bod in Hejnowicz et al. (2015).

In de Noordzee vindt men zeegrassen vooral nog terug voor de Britse kust en voor een stuk in de Waddenregio (EMODnet, Philippart et al. 2020). Het ecosysteem **kwam historisch voor in de Belgische Noordzee** (Natura2000, Vanderbiest et al. 2017), waardoor onderzoek naar de haalbaarheid van een mogelijke herintroductie het overwegen waard is (Coastbusters, PLANT ME-project).

PLANT ME-project (Vlaio Baekeland, met steun van Jan De Nul Group, DEME Group en het Portugees Maritiem Instituut CCMAR) onderzoekt hoe kusten bedreigd door een stijgende zeespiegel, kunnen beschermd worden door gebruik te maken van zeegras. Het onderzoeksteam tracht via het ontwikkelen van nieuwe aanplantingstechnieken het restoratiesucces van zeegras te vergroten.

## 4. Zeewier

Zeewierecosystemen zijn wereldwijd de **wijdst verspreide en productiefste kustecosystemen** (Krause-Jensen & Duarte 2016, Krause-Jensen et al. 2018). Zeewier is in staat efficiënt CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer te capteren en het zuurstofgehalte in het water te verhogen, wat aanleiding geeft tot een afname van de zuurtegraad en een verbeterde waterkwaliteit van het oceaانwater. Dit beschermt en verhoogt de natuurlijke buffercapaciteit van de oceaan (Duarte et al. 2017). Het mitigatiepotentieel van zeewier valt evenwel moeilijk te kwantificeren, vooral omdat er onduidelijkheid bestaat hoeveel van het reeds vernielde habitat nog kan hersteld worden en wat de bijdrage kan zijn van een hoger albedo verbonden aan zeewiervelden (zeewiervelden stralen meer zonlicht terug met een lokaal bijkomend koelingseffect tot gevolg) (Raven 2017, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). In tegenstelling tot schorren is het wel mogelijk om **via aquacultuur het mitigatiepotentieel van zeewier te vergroten**, doordat op die manier het verspreidingsgebied artificieel vergroot wordt (Moreira & Pires 2016, Duarte et al. 2017, Sondak et al. 2017). Zo realiseerde een pilootstudie voor de kust van Zuid-Korea, waar bruinwieren werden gekweekt, een jaarlijkse koolstofcaptatie van 10 ton/ha voor een kweekoppervlak van 0,5 ha (Chung et al. 2013). Het jaarlijkse mitigatiepotentieel van zeewierkweek wordt ingeschat op 0,05 – 0,29 Gton tegen 2050 (Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Het kweken van zeewier in een offshore omgeving is een beproefde en wijdverspreide techniek, vooral gangbaar in Indo-Pacifisch Azië (Cottier & Cook 2016, SOFIA 2020, FAO

Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Service). Maricultuur van zeewier kan indirect de CO<sub>2</sub>-voetafdruk naar omlaag brengen door het gebruik of de verwerking van zeewierproducten in voedsel voor menselijke consumptie, veevoeder, kunstmest, biobrandstoffen of bioplastics (Machado et al. 2015, Lehahn et al. 2016, World Bank Group 2016, Duarte et al. 2017, Kinley et al. 2020). Het proces is verondersteld volledig klimaatneutraal te zijn. **De klimaatwinst is dus verbonden aan het reduceren van de CO<sub>2</sub>-uitstoot elders in de waardeketen.** Het meeste marktpotentieel lijkt in deze weggelegd indien het vastgelegde koolstof ingezet wordt in de productie van biogas of biobrandstoffen (Ullah et al. 2015, Raven 2017, Sondak et al. 2017, Sudhakar et al. 2018).

Om relevant te zijn in het mitigeren van de klimaatopwarming wordt het belang van een wereldwijde uitbreiding van het zeewierareaal onderschreven. Teneinde de beschikbare ruimte te maximaliseren en optimaliseren, worden verschillende innovatieve technieken verkend die beroep doen op natuurlijke processen (*nature based solutions/working with nature*). Zo is er de mogelijkheid van **mariene permacultuur**, een vooralsnog vrij onbekende methode waarbij de nutriëntrecyclering gestimuleerd wordt via oceaanenergie (golven of de oceaancirculatie, maar evengoed via zonnecellen). Op die manier krijgt de productie van fytoplankton en zeewier een lokale boost (mits aanwezigheid van een vaste structuur waarop gekiemd kan worden). Het principe levert daarbij nuttige ecosystemendiensten (bv. vergroten vispopulaties) en is niet gelimiteerd tot kustzones of ondiepe wateren (von Herzen et al. 2018 abstract, Climate Foundation - marine permaculture).

Daarnaast is er **multitrofische aquacultuur** (IMTA – *Integrated Multi-Trophic Aquaculture*), een methode waarbij conventionele aquacultuur van verschillende soorten weekdieren, wieren, schaaldieren, vissen op een symbiotische manier gecombineerd wordt (Cottier & Cook 2016, Degraer et al. 2020). De techniek produceert een reeks van positieve, faciliterende interacties wat de primaire en secundaire productiviteit ten goede komt (Degraer et al. 2020). Naast een evidente stimulus van mariene aquacultuur, wordt meer atmosferisch koolstof opgenomen en kunnen bijkomende voordelen worden gecreëerd zoals habitatcreatie, kustverdediging, etc. Wat de klimaatbijdrage kan zijn van multitrofische aquacultuur moet evenwel nog verder worden onderzocht (Buck et al. 2018). Ook **meervoudig ruimtegebruik** is een optie, waarbij zeewier gekweekt wordt binnen windparkconcessiezones (Buck et al. 2004, Verhaeghe et al. 2011, Maes et al. 2018, Degraer et al. 2020, MARCOS-project, MUSES-project, Wier en Wind-project).

Hoezeer zeewier via het proces van koolstofsequestratie kan bijdragen aan klimaatmitigatie (en dus als een negatieve emissie-methode kan worden beschouwd) is voer voor discussie, met als voornaamste discussiepunt het belang van het gebrek aan wortelstructuren voor het sequestratieproces<sup>6</sup> (Chung et al. 2011, Chung et al. 2013, Krause-Jensen & Duarte 2016, Moreira & Pires 2016, Duarte et al. 2017, Raven 2017, Chung et al. 2017, Krause-Jensen et al. 2018). Onderzoek lijkt eerder te wijzen in de richting van **een hoge sequestratiegraad**, met een geschatte totale flux die hoger ligt dan deze van schorren en mangroves in kustecosystemen (170 Mton CO<sub>2</sub>/jaar) (Krause-Jensen & Duarte 2016). Ook is het nog **niet geheel duidelijk hoe zeewierproductie beïnvloed wordt door de gevolgen van klimaatopwarming** (Westmeijer et al. 2019). De meeste resultaten wijzen op een soort- of levensstadium specifieke respons (Roleda et al. 2012, Chung et al. 2017, Van der Loos et al. 2018, Britton et al. 2019), wat de nood aan wetenschappelijk onderzoek benadrukt wanneer men de inzet van bepaalde soorten voor mitigatiedoelinden overweegt.

---

<sup>6</sup> Het ontbreken van een connectie met sedimentsubstraat maakt dat zeewier in se niet catalogueert onder de blue carbon ecosystemen (zeegrassen, mangroves, schorren), waardoor het kweken of herstellen ervan in theorie ook niet kan beschouwd worden als “oceanbebossing” (N’Yeurt et al. 2012). De wortelstructuren zouden het transport van CO<sub>2</sub> naar de bodem faciliteren alsook zwevend organisch materiaal opvangen en stabiliseren.

## 4.1 Zeewierkweek in de Belgische Noordzee

In de Belgische Noordzee komen verschillende zeewiersoorten voor waarvan een aantal potentieel hebben voor aquacultuur ([AlgaeBase](#), [Westmeijer et al. 2019](#), [van der Loos et al. 2021](#)). De mogelijkheden voor zeewierkweek in onze Noordzee worden reeds een aantal jaren verkend en sinds kort ook praktisch uitgewerkt binnen een reeks aan projecten ([Vlaams Aquacultuurplatform](#)). Enkele concrete voorbeelden binnen deze context zijn:

- [Zeeboerderij Westdiep](#) – Colruyt Group (2020-2050): Het bedrijf Colruyt Group wil in de zone Westdiep voor de kust van Nieuwpoort een zeeboerderij opstarten van zo'n 4,6 km<sup>2</sup> groot. In de eerste fase zouden mosselen en oesters gekweekt worden, maar er zijn plannen om dit later uit te breiden met zeewier. De concessie (september 2020) en milieuvergunning (december 2020) zijn recent goedgekeurd ([BMM](#)), al wordt door belanghebbenden bijkomend onderzoek gevraagd naar hoe het project rekening houdt met andere gebruikersfuncties zoals de kustvisserij en de impact op het nabij gelegen Natura2000 gebied Vlaamse Banken. Ook wordt verdere verduidelijking gevraagd omtrent het beleidskader rond maricultuur en medegebruiksrechten in projectzones;
- [H2020 project United](#) (2020-2023): Dit Europees project tracht het meervoudig ruimtegebruik van de oceaan te bevorderen door middel van de installatie van demonstratie projecten, waarbij technische, regelgevende, economische, sociale en milieueisen en -effecten worden onderzocht. Voor België gaat het concreet om testen rond de restauratie van platte oesters en zeewierkweek binnen het offshore windpark 'Parkwind';
- [Interreg V project Wier en Wind](#) (2019-2022): Streeft naar de installatie van een grootschalige geautomatiseerde zeewierboerderij in het offshore windpark 'Norther';
- [Symapa](#) (2019-2022): In dit project worden de mogelijke synergiën tussen maricultuur van mosselen, oesters en zeewieren en passieve visserij onderzocht. De proefopzet, waarbij de mogelijkheden van meervoudig ruimtegebruik worden bestudeerd, is uniek in de wereld;
- [Value@Sea](#) (2016-2019): Demonstratieproject voor de kust van Nieuwpoort waarin de haalbaarheid van de gecombineerde kweek van oesters, zeewier en sint-jakobsschelpen onderzocht werd.
- [SeaConomy](#) (2016-2018): Project waarbij een consortium van bedrijven samen met sectororganisaties en overheidsinstanties het potentieel van een Vlaamse zeewiereconomie onderzochten. Het project focuste zich voornamelijk op de economische haalbaarheid, duurzaamheid en het identificeren van belangrijke externe barrières;
- [Aquavalue project](#) (2014-2015): Het Aquavalue project had tot doel een *roadmap* op te stellen voor geïntegreerde aquacultuur in Vlaanderen. De integratie werd niet enkel bekeken in het kader van de offshore windparken, maar ook met andere functies zoals kustverdediging. De mogelijkheid om hierbij ook multitrofisch (i.e. combinatie van verschillende trofische niveaus) te werken met aanvullende soorten in de voedselketen, kreeg hierbij speciale aandacht.

## 4.2 Ecologische impact

Ondanks lokale wijzigingen in de hydrodynamiek, het sedimenttransport en de introductie van hard substraat, zijn er weinig bewijzen dat offshore zeewierkweek leidt tot significante of blijvende veranderingen aan het marien milieu. Al zijn deze bevindingen mogelijks schaalafhankelijk (Cottier-Cook et al. 2016, Wood et al. 2017, Bossier et al. 2018, Campbell et al. 2019). Bovendien **brenge de kweek van zeewier vaak verschillende positieve effecten mee voor het ecosysteem en zijn gebruikers** (Bossier et al. 2018, Hasselström et al. 2019, SOFIA 2020), ofschoon er soms conflicten optreden met andere gebruikersfuncties of er esthetische bekommernissen zijn (Hasselström et al. 2019).

De Europese teelt limiteert zich voorlopig tot kleinschalige projecten die vaak tijdelijk van aard zijn. Indien daarentegen de techniek, bijvoorbeeld in functie van klimaatmitigatie, een snelle Europese expansie zou ondergaan, zou dit kunnen leiden tot onvoorziene ecologische en sociaal-economische gevolgen. Dergelijke opschaling zal bijgevolg gedegen **onderzoek en monitoring vereisen om eventuele schaalafhankelijke veranderingen in het functioneren van het ecosysteem te capteren** en de risico's van de teelt beter te kunnen afwegen tegen de voordelen. Voorlopig is de mate van onzekerheid op dit vlak hoog, maar het is aannemelijk dat onderzoeksactiviteiten zich zullen moeten richten op het observeren en kwantificeren van waarschijnlijk voorkomende fenomenen zoals ziekteoverdracht en ziektegevoeligheid, wijzigingen in de populatiegenetica, invasieve soorten en lokale veranderingen in de fysicochemische samenstelling van het water (Cottier-Cook et al. 2016, Wood et al. 2017, Campbell et al. 2019). In Campbell et al. 2019 wordt dieper ingegaan op de potentiële ecologische gevolgen van grootschalige aquacultuurprojecten en wat met name op het vlak van onderzoek en monitoring kan gedaan worden om deze te beantwoorden. Daarnaast kan een aangepast beleids- en monitoringskader helpen in het omgaan met onvoorziene effecten en het realiseren van een duurzame balans tussen economische groei, de gezondheid van de oceaan en de mens (Cottier-Cook et al. 2016, Campbell et al. 2019, Stentiford et al. 2020, MARCOS-project).

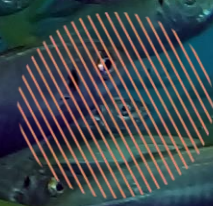
Binnen de Belgische context kan voor een synthese op de potentiële impact van de aquacultuursector en de bestaande instrumenten die een duurzaam gebruik faciliteren verwezen worden naar Bossier et al. (2018).



Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



## Dossier Mariene reservaten





# Inhoudsopgave

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| 1. Introductie               | (PAG. 2) |
| 2. Mariene fauna             | (PAG. 3) |
| 3. Bodemberoering            | (PAG. 4) |
| 3.1 Bodemberoerende visserij | (PAG. 4) |
| 3.2 Diepzeemijnbouw          | (PAG. 4) |

# 1. Introductie

Het oprichten van mariene reservaten is wereldwijd een **gangbare en adequate methode** om kostbare natuur en maatschappelijk nuttige ecosysteemdiensten (bv. kustverdediging, voedselvoorziening, mitigatie van verontreiniging, algemeen welzijn, etc.) te beschermen en herstellen (Worm et al. 2006, Leisher et al. 2007, Caselle et al. 2015, Schultz et al. 2015, Costello et al. 2016, Barbier et al. 2018, Ban et al. 2019, Seddon et al. 2019). Naast een meerwaarde voor de biodiversiteit en de visbestanden, heeft onderzoek aangetoond dat het oprichten van **strikt beschermde mariene reservaten** met gezonde en diverse populaties een praktische en kosten-efficiënte manier is om ook klimaatmitigatie te ondersteunen en te stimuleren (McCrea-Strub et al. 2011, Roberts et al. 2017, Sala et al. 2021). Onverstoorde ecosystemen capteren namelijk meer koolstof, zijn weerbaarder tegen verstoring (Worm et al. 2006) en zijn in staat zich sneller te herstellen van schadelijke klimaatgevolgen (Micheli et al. 2012, Perry et al. 2015, Mellin et al. 2016, Sala & Giakoumi 2017). **Deze positieve effecten zijn vooral merkbaar op lokale schaal, maar spillover effecten naar naburige ecosystemen zijn mogelijk** (Micheli et al. 2012, Caselle et al. 2015). De beste resultaten worden doorgaans behaald met goed beheerde, afgelegen gebieden van minstens 100 km<sup>2</sup> (Edgar et al. 2014), maar behoorlijke mitigatie- en adaptatieresultaten kunnen eveneens verkregen worden met een netwerk van kleine gebieden, op voorwaarde van een goed beheer in aanpalende zones (Cinner & Aswani 2007, Gelcich et al. 2008, Gutiérrez et al. 2011, Edgar et al. 2014, Gelcich et al. 2015). Ondanks de grote maatschappelijke meerwaarde van mariene reservaten is momenteel slechts **2,7%** van de oceaan goed beschermd (IUCN, Marine Protection Atlas). In Europa is ongeveer 12,4% van de zeeën beschermd<sup>1</sup>, maar voor slechts 1,8% hiervan zijn beheersplannen uitgewerkt (situatie september 2019) (WWF 2019). Uit onderzoek blijkt echter dat bij voorkeur minstens **30%** van de oceaan beschermd dient te worden als we de biodiversiteitsdoelstellingen en het voortbestaan van nuttige ecosysteemdiensten (waaronder klimaatmitigatie) en belangrijke socio-economische activiteiten willen garanderen (O'Leary et al. 2016, WWF 2019, Roberts et al. 2020, Sala et al. 2021). Hierom, en om de internationale klimaatdoelstellingen te realiseren, wordt op internationaal niveau gepleit om tijdens de eerstvolgende *Convention on Biological Diversity* (COP15, China) 30% van de oceaan te beschermen tegen menselijke impact (WWF 2019, Roberts et al. 2020, Sala et al. 2021).

Beschermde gebieden zijn evenwel **niet geschikt om snel drastische reducties in atmosferisch koolstof te verwezenlijken** (Roberts et al. 2017, Gattuso et al. 2019, Hoegh-Guldbergh et al. 2019a). Ook zijn ze niet immuun voor (plotse) wijzigingen in abiotische omstandigheden door klimaatopwarming of andere schadelijke effecten in naburige gebieden. Deze mitigatie- en adaptatieoptie moet dus gezien worden als één instrument in een bredere klimaatmitigatie en -adaptatiestrategie.

Er zijn verschillende manieren waarop mariene reservaten een klimaatmitigerend effect kunnen uitoefenen op hun omgeving, maar de aanwezigheid van **dieren en het elimineren van bodembegroeiing** zijn de belangrijkste factoren die maken dat een reservaat al dan niet een positief klimaateffect heeft (Roberts et al. 2017).

---

<sup>1</sup> In de Belgische Noordzee valt 37% van de totale oppervlakte onder een zeker beschermingsstatuut. In bepaalde gebieden blijven economische activiteiten echter toegestaan mits een passende beoordeling (Degraer et al. 2018, Kustportaal, Natura2000, Marien ruimtelijk plan 2020-2026).

## 2. Mariene fauna

Dieren kunnen zowel direct als indirect biogeochemische processen beïnvloeden met belangrijke implicaties voor de werking van de oceanische koolstofcyclus en de productiviteit (Schmitz et al. 2014, De Borger et al. 2021, Toussaint et al. 2021, Heidi Pearson – The Conversation 17 april 2019). Een goed werkende oceanische koolstofcyclus met gezonde ecosystemen bestaande uit abundante soortenpopulaties uit verschillende trofische niveaus realiseren de meest efficiënte productie- en sequestratie-processen. Een belangrijke rol in deze is weggelegd voor gewervelde zeedieren, in het bijzonder de aanwezigheid van predatoren en grote zeezoogdieren (Pershing et al. 2010, Roman & McCarthy 2010, Atwood et al. 2015, Schmitz et al. 2018, Heidi Pearson – The Conversation 17 april 2019). Predatoren kunnen immers een mitigerend effect bevorderen, via het **vermijden van overbegrazing** door herbivore soorten (Wilmers et al. 2012, Schmitz et al. 2018). Zo is gebleken dat wanneer predatoren zich herstellen in beschermde gebieden, ook de koolstofcaptatie en koolstofopslag toeneemt (Schmitz et al. 2014, Atwood et al. 2015). Grote zeezoogdieren vormen door hun omvang een grote bron van koolstof dat bij hun dood deels begraven wordt op de zeebodem. Daarnaast verspreiden en herverdelen ze nutriënten via hun uitwerpselen en verplaatsing doorheen de waterkolom wat potentieel lokaal de productiviteit verhoogt (Pershing et al. 2010, Roman & McCarthy 2010, Heidi Pearson – The Conversation 17 april 2019). Ook vissen kunnen een belangrijke rol spelen, daar ze via hun kieuwen continu ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) uitscheiden, de meest beschikbare vorm van stikstof voor fotosynthese, in hoeveelheden die wel 100 maal hoger kunnen liggen dan bij bodembewonende tweekleppigen (bentische bivalven) (Villéger et al. 2012, Lapointe et al. 2014). Tot slot kunnen ook filtervoeders (bv. mosselen, krill, kleine vissen), als ze in grote aantallen aanwezig zijn, een positief effect hebben op de productiviteit. Wanneer op de oceaانبodem gevestigd, kunnen deze dieren het sediment waarop ze vertoeven verrijken met nutriënten en de **lichtpenetratie in het water** verhogen, wat stimulerend werkt voor de plantengroei (Chambers et al. 2017, Fodrie et al. 2017). Bovendien vormen filtervoeders een **belangrijke schakel in de transfer van opgeloste organische materie naar de zeebodem** (Kahn et al. 2015). De relatie tot de koolstofcyclus en of ze zich eerder als reservoir (*sink*) of bron (*source*) van koolstof gedragen, is echter niet eenduidig gezien weinig studies een integratie maken van alle ecofysiologische processen die spelen (Fodrie et al. 2017, Filgueiras et al. 2019). Tot slot blijken ook kwallen een belangrijke bijdrage te leveren aan koolstofsequestratie in de oceaan (Luo et al. 2020).

Of een marien reservaat in zijn geheel fungeert als een koolstofsink, is afhankelijk van vele factoren en complexe interacties (Filgueiras et al. 2019). Het vaststellen of mariene fauna in een bepaalde regio de productiviteit verhoogt, is dan ook geen eenvoudig gegeven. Meer **wetenschappelijk onderzoek naar de abiotische-biotische (koolstof)dynamiek binnen mariene reservaten is dus noodzakelijk**. Wat de Zuidelijke Noordzee betreft, heeft onderzoek een **sterke heterotrofe activiteit** aangetoond, resulterende in een goede nutriëntencirculatie. Daarnaast fungeert het pelagiaal netto op jaarbasis als een **koolstofsink** (Brion et al. 2008, De Borger et al. 2021).

## 3. Bodemberoering

Oceanische sedimenten bevatten op wereldschaal de grootste stock aan organisch koolstof dat, indien onaangeroerd, voor duizenden jaren opgeslagen blijft (Estes 2019, Atwood et al. 2020). Echter, bodemberoerende activiteiten, zoals bepaalde visserij- en aquacultuurtechnieken, ontginningspraktijken en bioturbatie (bodemverstoring door levende organismen) wijzigen de biogeochemische cycli door reeds **begraven koolstof in resuspensie** te brengen. Mineralisatieprocessen zetten dit sedimentair koolstof terug om naar CO<sub>2</sub> (Pusceddu et al. 2014, OSPAR), mogelijk **resultierend in erg schadelijke gevolgen** voor de oceanische koolstofcyclus, de biodiversiteit en de productiviteit (Atwood et al. 2020, Legge et al. 2020). Naast een directe fysieke impact op de oceaanbodem kunnen bovengenoemde activiteiten ook de samenstelling aan bentische (bodembewonende) organismen wijzigen (Hiddink et al. 2006). Het beschermen van de oceaanbodem is met andere woorden een belangrijk element in de strijd tegen de klimaatopwarming en de oceaanverzuring (Griscom et al. 2017, Roberts et al. 2017). Twee activiteiten met potentieel grote gevolgen voor de oceanische koolstofcyclus, en hiermee het mitigatiepotentieel van de oceaan, worden hieronder tegen het licht gehouden.

### 3.1 Bodemberoerende visserij

Op basis van satellietbeelden (met een nauwkeurigheid van 1 km<sup>2</sup>) heeft men bepaald dat jaarlijks circa 1,3% van de werelddoceaan (4,9 miljoen km<sup>2</sup>) bevestigd wordt met bodemberoerende vistechieken (Sala et al. 2021)<sup>2</sup>. Naar schatting komt hierdoor 1,47 Pg CO<sub>2</sub> (1 Pg = 1 Petagram = 1.10<sup>12</sup> kg) in resuspensie. Om dit in perspectief te plaatsen, komt dit neer op 0,02% van alle organische koolstof die opgeslagen is in mariene sedimenten ofwel **15-20% van de jaarlijks opgenomen hoeveelheid aan atmosferische CO<sub>2</sub> door de oceaan** (IPCC 2005, Gruber et al. 2019). Een vrijgave die vergelijkbaar is met het jaarlijkse verlies aan bodemkoolstof door landbouwactiviteiten (Davidson & Ackerman 1993). Bovendien blijven verstoorde bodems **nog gedurende vele jaren begraven koolstof verliezen** (Sala et al. 2021). Naast een verlies aan organisch koolstof betekent bodemberoerende visserij bijgevolg ook een verlies aan voedingsstoffen in de toplaag van het sediment en habitatverlies voor bentische (bodembewonende) organismen met hun afsterven als gevolg (De Borger et al. 2021). Omwille van de schadelijke impact van deze vistechiek is er steeds meer onderzoek naar duurzame alternatieve vismethoden en visstrategieën (bv. onderzoeksactiviteiten ILVO).

### 3.2 Diepzeemijnbouw

Om de stijgende vraag naar metalen voor de elektrificering van de maatschappij (met name in de hernieuwbare energie sector en mobiliteit sector) te ondersteunen, stijgt de internationale aandacht rond de mogelijkheid van het delven van metaalrijke minerale afzettingen, zoals mangaanknollen, polysulfidische afzettingen of mangaankorsten, op de oceaanbodem. Momenteel is meer dan 1 miljoen km<sup>2</sup> aan volle zee, **een gebied waarover nog steeds zeer weinig geweten is**, toegewezen aan exploratiecontracten voor onderzeese mijnbouw. Tot op heden werden in de diepzee nog geen exploitatiecontracten toegekend, wat maakt dat dit gebied, samen met Antarctica, het enige ter wereld is waar geen commerciële mijnbouw plaatsvindt (Levin et al. 2020). Actieve exploitatie grijpt wel al plaats in ondiepere gebieden, bijvoorbeeld de nationale wateren van bijvoorbeeld Nieuw-Zeeland, waar

---

<sup>2</sup> De impact van bodemberoerende visserij in het OSPAR gebied, waar de Noordzee toe behoort wordt gegeven op de [website](#) van OSPAR.

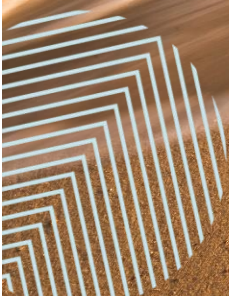
ijzerzand en fosforiet gewonnen worden ([Miller et al. 2018](#)). Het risico bestaat dat via deze praktijk grote hoeveelheden begraven koolstof geremobiliseerd worden met vooralsnog onduidelijke gevolgen voor de oceanische koolstofcyclus, de ecosystemen en het wereldklimaat ([Thurber et al. 2014](#), [Niner et al. 2018](#), [Washburn et al. 2019](#)). Meer wetenschappelijk onderzoek naar de effecten van het winnen van mineralen uit de diepzee is dus noodzakelijk, gekoppeld aan een doorgedreven maatschappelijke kosten-baten analyse.



Vlaams Instituut voor de Zee vzw  
Flanders Marine Institute



# Synthese & Annex



### III. Synthese

De oceaan biedt de mens tal van opportuniteiten in de strijd tegen de klimaatopwarming en zijn schadelijke gevolgen (Gattuso et al. 2018, Cooley et al. 2019, Hoegh-Guldberg et al. 2019a, Stuchtey et al. 2020). Ondanks een **sterk klimaatmitigerend potentieel**, wordt mariene klimaatmitigatie tot op heden slechts beperkt meegenomen in nationale klimaatstrategieën (Gallo et al. 2017, NDCs). Dit lijkt verband te houden met de onzekerheid omtrent korte termijn-voordelen op nationaal niveau, het historisch politiek beleid en de complexiteit verbonden aan bi- of multilaterale samenwerking (Kaul et al. 1999, Barrett 2005, Rogelj et al. 2016, Gallo et al. 2017, Rockström et al. 2017, Peters & Geden 2017, De Coninck & Revi 2019). Deze elementen zijn voor een groot stuk terug te brengen tot een gebrekkige wetenschappelijke kennisbasis, onstabiele of inadequate wetgevende en bestuurlijke kaders, of een gebrek aan stimuli om de technologische omgeving te creëren waaruit beloftevolle technieken kunnen ontwikkeld en marktcompetitief gepositioneerd worden (Craik & Burns 2016, Fuss et al. 2016, Nature and Climate Change editorial 2017, Gattuso et al. 2018, De Coninck & Revi 2019, European Marine Board 2019, Gattuso et al. 2019, GESAMP 2019, Hoegh-Guldberg et al. 2019b, IPCC 2019, IRENA 2019a, IRENA 2020, Stuchtey et al. 2020).

De momenteel meest mature mariene mitigatiestrategie is deze van **offshore hernieuwbare energie**, en meer specifiek de offshore productie van windenergie. Europa kende eind 2020 een geïnstalleerde offshore windenergiecapaciteit van ruim 25.000 MW, waarvan 79% in de Noordzee (WindEurope 2021). Offshore windenergie kan aan competitieve marktarieven geproduceerd worden en bovendien zijn er ook commercieel interessante koppelingen mogelijk met de traditionele energie-industrie en andere duurzamere sectoren van de toekomst, zoals het gebruik van windenergie voor de productie van groene waterstof, energieopslag, vermaasde (internationale) elektriciteitsnetten, en koolstofcaptatie en -opslag (COM(2012) 494, IRENA 2019a, IEA 2021). Er wordt dan ook verwacht dat offshore windproductie een steeds belangrijker rol zal spelen in het energielandschap (IRENA 2020, IEA 2021, WindEurope 2021).

Een andere, minder gekende, industriële mitigatiestrategie, is deze gebaseerd op **koolstofcaptatie en -opslag technieken (CCS – Carbon Capture and Storage)**. Via CCS-technologie kan de klimaatbelasting van de CO<sub>2</sub>-intensieve industrie verminderd worden door de CO<sub>2</sub> op te vangen vóór deze vrijkomt in de atmosfeer (IOGP 2019, GCCSI 2020a). De weggevangen CO<sub>2</sub> wordt vervolgens onshore of offshore opgeslagen in diepe ondergrondse geologische reservoirs. Hoewel technologisch haalbaar, heeft de praktijk te kampen met verschillende barrières. Zo wordt het kostenplaatje van de techniek vaak nog als te hoog ervaren en moet er dus gezocht worden naar commercieel interessantere toepassingen met het weggevangen CO<sub>2</sub> (**CCU – carbon capture and utilization**) (EC-SAM 2018). Daarnaast wordt de verdere ontplooiing afgeremd door gebrekkige wetgevende en regulerende kaders die internationale samenwerking bemoeilijken, onduidelijke aansprakelijkheidsrichtlijnen langsheen de waardeketen, en heersen er bezorgdheden omtrent de veiligheid en de milieu-impact van het offshore opslaan van CO<sub>2</sub> (Peters & Geden 2017, Zapantis et al. 2019, GCCSI 2020a).

Een piste die lang als laatste strohalm werd beschouwd, maar intussen meer aandacht krijgt gezien de jaarlijks toenemende dringendheid van het klimaatprobleem, is deze van 'geoengineering' of 'climate engineering'. Hierbij voert de mens doelbewuste ingrepen uit op het natuurlijk systeem met als doel de klimaatopwarming of de gevolgen ervan af te remmen. Ook in de oceaan zijn er hiertoe verschillende opties en spreekt men van '**marine geoengineering**' (GESAMP 2019). De enige methode die tot op heden in natuurlijke condities werd getest is deze waarbij voedingsstoffen voor het plankton aan het oppervlaktewater worden toegevoegd om de fotosynthese te boosten (oceanfertilisatie). Het grootste nadeel van marine geoengineering is dat er momenteel nog te weinig kennis voorhanden is om de voor-

en nadelen, alsook de kost, van dergelijke manipulerende praktijken betrouwbaar in te schatten. Vooral het risico op het induceren van een permanente ecologische ontwrichting van de oceaan is reëel indien de praktijk foutief wordt toegepast (Balch et al. 2019). Integratief en multidisciplinair wetenschappelijk onderzoek is hier aangewezen, maar dan blijft er nog de ethische vraag of het moreel aanvaardbaar is de natuurlijkheid van de oceaan te modificeren voor het maatschappelijk belang (Rau 2014, NRC 2015a, Pasztor 2017, Lawford-Smith & Curie 2017, GESAMP 2019).

Een veiligere, efficiëntere en doeltreffendere piste is het beschermen en herstellen van **'blue carbon'** ecosystemen. Deze kustecosystemen met zeegras, schorren (en in meer tropische regio's mangroves), zijn efficiënte koolstofsinks die voorzien in diverse maatschappelijk nuttige ecosysteemdiensten en daarnaast ook schadelijke gevolgen van klimaatopwarming tegengaan (Nelleman et al. 2009, Mcleod et al. 2011, UNESCO 2020, IUCN 2021). Blue carbon ecosystemen zijn dan ook populair in nationale klimaatstrategieën die de oceaan vermelden (Gallo et al. 2017, NDCs). Deze ecosystemen gedijen echter het best in onvervuilde milieus en er is ook geen algemene standaard voorhanden hoe deze ecosystemen best te beschermen en te herstellen. Het is dan ook aan te raden een integratieve situatie-specifieke analyse te voeren om de meest geschikte beheer- en beschermingsmaatregelen te evalueren. Richtlijnen hoe blue carbon ecosystemen zo optimaal en duurzaam mogelijk te beheren om de koolstofcaptatie- en sequestratieprocessen te beschermen en te vergroten, zijn na te lezen in de literatuur (Leisher et al. 2007, Nelleman et al. 2009, Herr et al. 2017, Howard et al. 2017). De bescherming van deze ecosystemen is het meest succesvol wanneer er een duurzame balans is tussen zowel lokale als nationale belangen en de voordelen verbonden aan deze ecosystemen holistisch beschouwd worden in plaats van doelspecifiek, zoals voor biodiversiteits- of klimaatadaptatiedoelinden. Een middel om de bescherming en restauratie van deze nuttige ecosystemen verder te stimuleren bestaat erin een bedrag te plaatsen op relevante ecosysteemdiensten, zoals het sequestreren van koolstof of kustverdediging (Herr et al. 2017, Coopman et al. 2019). Daarnaast is er ook nog **zeewier**. Zeewieren zijn goed te cultiveren macroalgen die ondanks een gebrek aan wortelstructuren efficiënt koolstof lijken te capteren en sequestreren (Krause-Jensen & Duarte 2016, Krause-Jensen et al. 2018).

Mogelijks de zachtste vorm van mariene klimaatmitigatie is het instellen van **mariene reservaten**. Strikt beschermde mariene reservaten nemen immers meer koolstof op dan niet beschermde zones en zijn ook weerbaarder tegen verstoring (Micheli et al. 2012, Edgar et al. 2014, Roberts et al. 2017, Sala et al. 2021). Beschermde gebieden zijn evenwel niet geschikt om snel drastische reducties in atmosferisch koolstof te verwezenlijken (Roberts et al. 2017, Gattuso et al. 2019, Hoegh-Guldberg et al. 2019). Ondanks de grote maatschappelijke meerwaarde van mariene reservaten is momenteel slechts 2,7% van de oceaan goed beschermd (IUCN, Marine Protection Atlas). Dat de beschermingscijfers zo laag zijn, heeft vooral te maken met de vrees dat mariene reservaten een hypotheek stellen op extractieve economisch belangrijke activiteiten zoals visserij en de ontginning van de zeebodem (Sala et al. 2021). Dat dit niet de norm hoeft te zijn, werd recent aangetoond met behulp van een omvattend afwegingskader voor het instellen van mariene reservaten, opgesteld door Sala et al. (2021). Hieruit blijkt o.a. dat een effectieve bescherming van mariene gebieden elementen in rekening brengt die de beschermde zone of het doel van bescherming overstijgen. Daarnaast is het belangrijk aandacht te hebben voor socio-economische argumenten en zodoende het risico op armoede of ongelijkheid te minimaliseren (Cinner & Aswani 2007, Singh et al. 2018). Goed functionerende reservaten hebben immers aangetoond bij te dragen aan armoedereductie, werkgelegenheid, de bevordering van de gezondheid, het vergroten van kansen voor vrouwen, etc. (Leisher et al. 2007, Howard et al. 2017).

Het mag duidelijk zijn dat het oceaansysteem veel opportuniteiten biedt in de strijd tegen de klimaatverandering. Er dient echter een belangrijke kanttekening gemaakt te worden. De relatie tussen het fenomeen klimaatopwarming en het oceaansysteem is complex en de verschillende processen zijn sterk met elkaar verweven. Zo wordt **ook de oceaan bedreigd door klimaatopwarming** (Pörtner et al.



2014, IPCC 2019, Silvy et al. 2020, Verleye et al. 2020) waardoor het functioneren of voortbestaan van maatschappelijk belangrijke oceaangebonden ecosysteemdiensten, zoals voedselvoorziening, kustbescherming, maar ook klimaatmitigatie, niet gegarandeerd zijn (Hoegh-Guldberg & Bruno 2010, Gattuso et al. 2015, Magnan et al. 2016, Poloczanska et al. 2016, Hillebrand et al. 2018, Ullah et al. 2018, IPCC 2019a, 2019b, Complex Project Kustvisie). Hoe drastisch de gevolgen van deze schadelijke klimaateffecten zullen zijn, staat in direct verband met de hoeveelheid atmosferische CO<sub>2</sub> (Bopp et al. 2013), maar zonder uitzondering vormen ze een gevaar voor ons maatschappelijk welzijn (Adger et al. 2012, Gattuso et al. 2015, Schultz et al. 2015, OECD 2016, EEA 2018, Coopman et al. 2019, European Marine Board 2019, IPCC 2019a, Woetzel et al. 2020). Het is met andere woorden belangrijk mariene klimaatmitigatiemaatregelen niet te zien als een substituuut voor klimaatacties op het land, maar deze als **complementair** te beschouwen aan het gamma van **bestaande mitigerende mogelijkheden** (Gattuso et al. 2019, Hoegh-Guldberg et al. 2019a, 2019b). Daarnaast is het van belang om te realiseren dat de aarde, ongeacht men erin slaagt de opwarming te beperken tot +1,5°C, alsnog significante klimaatstress en schade zal ondervinden (Hoegh-Guldberg & Bruno 2010, Gattuso et al. 2015, Magnan et al. 2016, IPCC 2014-2018-2019). Dit betekent dat de draagkracht van onze leefomgeving in het gedrang blijft (Rockström et al. 2009) en dat overheden in hun klimaatbeleid **klimaatmitigatie niet meer kunnen loskoppelen van klimaatadaptatie** (kustverdediging, watervoorziening, hitte resistente maatregelen, etc.).

Wetenschappelijk onderzoek dat beleidsmakers en de maatschappij als geheel helpt om de implicaties van mariene klimaatmitigatie- en adaptatiestrategieën in een veranderende wereld te begrijpen is met andere woorden relevanter dan ooit. Een doorgedreven **multidisciplinaire collaboratie, transparantie en communicatie** zijn de sleutelprincipes richting een duurzame, maatschappelijk aanvaarde en daadkrachtige mariene klimaatmitigatiestrategie die ons in staat stelt dichterbij de klimaatdoelen te komen en hierbij voorziet in nuttige nevendiensten. Een overzicht van de Belgische onderzoekscapaciteit inzake mariene klimaatmitigatie en -adaptatie wordt gegeven in Verleye et al. (2020).

## IV. Annex

Overzicht van de 27 marine geoengineering technieken, ingedeeld naar categorie (CO<sub>2</sub>- verwijdering (Carbon Dioxide Removal, CDR) of Albedo-modificatie (AM)). De in deze nota behandelde methoden zijn gemarkeerd in groen. Voor een diepere beschrijving van de verschillende methoden, zie [GESAMP 2019](#).

| Categorie | Techniek                  | Methode   | Principe   |
|-----------|---------------------------|---|--|
| CDR       | Oceaanfertilisatie        | Ijzerfertilisatie ( <i>Iron fertilisation</i> )   | Stimuleren van de productiviteit van het fytoplankton door toevoeging van het limiterend micronutriënt, ijzer. Met behulp van de biologische koolstofpomp zou op die manier CO <sub>2</sub> permanent uit het systeem verdwijnen (zie p. 4 – dossier Marine geoengineering).   |
|           |                           | Fertilisatie met stikstof/fosfor ( <i>Macronutrient fertilisation – Nitrogen/Phosphorus</i> )                                     | Stimuleren van de productiviteit van het fytoplankton (en de daaropvolgende sequestratieprocessen) door toevoeging van de limiterende macronutriënten stikstof en/of fosfor (zie p. 4 – dossier Marine geoengineering).  |
|           |                           | Fertilisatie met het oog op het boosten van vispopulaties ( <i>Fertilisation for fish stock enhancement</i> )                     | Het toevoegen van nutriënten (ijzer) aan het oppervlaktewater van de oceaan met als doel de vispopulaties te boosten. Hierbij rekenend op de assumptie dat een toename in fytoplankton biomassa doorstroomt naar hogere schakels in de voedselketen ( <a href="#">GESAMP 2019</a> ).                                     |
|           | Oceanische koolstofopslag | Opslag van vloeibare CO <sub>2</sub> diep in de waterkolom ( <i>Liquid CO<sub>2</sub> placed in mid/deep ocean water depths</i> ) | Het transporteren van vloeibare CO <sub>2</sub> naar de diepe oceaan waar dit oplost en omgezet wordt in carbonaten (en in se verzuring veroorzaakt). Rekening houdend met het tempo van de hydrologische cyclus zouden deze carbonaten gedurende lange tijd onttrokken worden aan contact met de atmosfeer (IPCC 2005). |
|           |                           | Opslag van vloeibare CO <sub>2</sub> op de oceaniebodem ( <i>Liquid CO<sub>2</sub> placed on the seabed</i> )                     | Op een diepte van 2.800 m is de dichtheid van vloeibaar CO <sub>2</sub> hoger dan deze van zeewater waardoor CO <sub>2</sub> quasi permanent op de oceaniebodem zou kunnen gestockeerd worden (IPCC 2005).   |

|  |               |  |   |
|--|---------------|--|---|
|  |               | Opslag van vloeibare CO <sub>2</sub> in losse sedimenten op de oceaanbodem<br>( <i>Liquid/solid CO<sub>2</sub> placed into unconsolidated deep-sea sediments</i> ) | Het injecteren van vloeibare CO <sub>2</sub> honderden meters diep in (ongeconsolideerd) sediment dat zich minstens 3.000 m diep in de oceaan bevindt. De opslagmethode zou stabiel zijn omwille van de hoge druk en lage temperatuur in dergelijke omgeving (Koide et al. 1997).   |
|  |               | Mineralisatie van CO <sub>2</sub> in geologische structuren onder de zeebodem<br>( <i>Mineralisation of CO<sub>2</sub> in rocks beneath the seabed</i> )           | De injectie van CO <sub>2</sub> in basalt of peridotiet gesteente dat zich op de oceaanbodem bevindt. Tijdens deze procedure zou de CO <sub>2</sub> omgezet worden in stabiele carbonaatmineralen (Matter & Kelemen 2009).  |
|  |               | Dumpen van gewasresten op de zeebodem<br>( <i>Depositing crop wastes in the deep ocean</i> )   | Het dumpen/begraven van gewasresten op de oceaanbodem (> 1.000 m diep) waar deze mineraliseren en zodoende sequestreren (Strand & Benford 2009).  |
|  |               | Zeewierkweek voor koolstofsequestratie of gebruik in biobrandstoffen<br>( <i>Macroalgal cultivation for sequestration</i> )  | Het kweken van zeewier met het oog op het direct sequestreren van koolstof via de biologische koolstofpomp of indirect door het zeewier in te zetten als een component in biobrandstoffen (zie p.7 - dossier Blue Carbon).  |
|  | Ocean pumping | Kunstmatige opstuwing<br>( <i>Artificial upwelling</i> )   | Kunstmatige opstuwing is gesuggereerd als een soort van fertilisatiemethode waarbij via kunstmatige ingrepen dieper, voedingsrijk water naar de fotsche zone getransporteerd wordt waar de meegelifte voedingsstoffen fytoplanktongroei kunnen stimuleren en zodoende ook de export van organische koolstof naar de diepte (Lovelock & Rapley 2007).                            |
|  |               | Captatie en opslag van oceanisch koolstof<br>( <i>Ocean Carbon Capture and Storage</i> )   | Een methode waarbij het opgeloste anorganisch koolstof van de oceaan wordt verwijderd en opgeslagen in permanente opslaglocaties zoals geologische opslagreservoirs (conform de praktijk bij de CCS-technologie, zie dossier Koolstofcaptatie- en opslag). Om het evenwicht te herstellen zou de oceaan opnieuw koolstof moeten opnemen uit de atmosfeer (Eisaman et al. 2018). |

|                     |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|
|                     |  | Kunstmatige neerwaartse stroming ( <i>Artificial downwelling</i> )   | Koud koolstofrijkwater wordt hierbij getransporteerd naar de diepte waar dit aan de oppervlakte vervangen wordt door warmer water. Wanneer dit warmer water afkoelt wordt CO <sub>2</sub> opgenomen uit de atmosfeer (Zhou & Flynn 2005).  |
| Oceaanalkalinisatie |  | Kalk ( <i>Adding lime to the ocean</i> )   | Wanneer kalk toegevoegd wordt aan het oppervlaktewater lost dit op en neemt hierbij CO <sub>2</sub> op uit de atmosfeer (zie p. 10 – dossier Marine geoengineering).   |
|                     |  | Carbonaatmineralen ( <i>Adding carbonate minerals to the ocean</i> )   | Het toevoegen van carbonaatmineralen in ondiepe, snel circulerende en niet met carbonaten gesatureerde waterlagen. In deze lagen lossen deze mineralen op zodat deze, wanneer ze de zone waarbij interactie met de atmosfeer plaatsvindt bereiken, CO <sub>2</sub> kunnen opnemen (zie p. 10 – dossier Marine geoengineering).   |
|                     |  | Versnelde verwerking van kalksteen ( <i>Accelerated weathering of limestone</i> )  | Kalksteen (CaCO <sub>3</sub> ) kan versneld ontbinden door deze in een industriële context (waar CO <sub>2</sub> als afvalstof vrijkomt) te laten reageren met zeewater. Hierbij wordt CO <sub>2</sub> verbruikt en alkalische ionen gevormd die vervolgens in zee kunnen gepompt worden (zie p. 10 – dossier Marine geoengineering).  |
|                     |  | Elektrochemische versnelde verwerking van carbonaten en silicaat mineralen ( <i>Electrochemical enhancement of carbonate and silicate mineral weathering</i> ) | Wanneer elektrolyse (bijvoorbeeld toegepast bij de productie van waterstof) toegepast wordt met zeewater ontstaan er zuren die in combinatie met carbonaat of silicium kunnen geneutraliseerd worden. Wat overblijft na de elektrolysereactie zijn reactieve hydroxide ionen (OH <sup>-</sup> ) die in aanwezigheid van oceanische kationen (Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , of Na <sup>+</sup> ) metaalhydroxiden vormen. Deze metaalhydroxiden zijn op hun beurt heel reactief met CO <sub>2</sub> . Na contact met atmosferische CO <sub>2</sub> vormen ze zich snel om tot stabiele bicarbonaatrijke oplossingen die door de oceaan gesequestreerd worden (zie p. 11 – dossier Marine geoengineering). |

|    |                                |   |   |
|----|--------------------------------|---|---|
|    |                                | Olivijn ( <i>Olivine</i> )  | Olivijn ((Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ) is een silicaat dat kan toegevoegd worden aan de oppervlaktewateren van de oceaan om doeltreffend CO <sub>2</sub> te capteren (zie p. 9 – dossier Marine geoengineering).  |
|    |                                | Thermische afbraak van pekel ( <i>brine</i> )   | Pekel (een restproduct na ontzilting) bevat magnesiumzouten zoals MgCl <sub>2</sub> die na thermale decompositie omgezet worden naar MgO. Eens toegevoegd aan de oceaan worden stabiele bicarbonaten gevormd die de alkaliniteit verhogen en CO <sub>2</sub> aan de atmosfeer onttrekken (zie p. 11 – dossier Marine geoengineering).   |
|    | Methaancaptatie- en degradatie | Methaancaptatie- en degradatie ( <i>Methane capture and destruction/degradation</i> ) | Een methode waarbij methaanhydraten in oceanisch sediment geoogst worden en vervangen door CO <sub>2</sub> . Het gecapteerde methaan zou dan ingezet kunnen worden als brandstof of grondstof ( <a href="#">Babu et al. 2014</a> , <a href="#">Zhang &amp; Zai 2015</a> ).  |
| AM | Oceaanalbedo modificatie       | Microbubbels ( <i>Microbubbles</i> )  | Het opwekken van microscopische bubbels aan het oceaanoppervlak die enerzijds de helderheid van het oppervlaktewater verhogen en anderzijds aanleiding kunnen geven tot wolkvorming en zodoende bijdragen tot een verhoging van het oceaanalbedo (zie p. 14 – dossier Marine geoengineering).   |
|    |                                | Stabiele schuimen ( <i>Stable foams</i> )   | Het (chemisch) produceren van stabiele schuimen die zorgen voor een toename in gereflecteerd zonlicht (zie p. 14 – dossier Marine geoengineering).  |
|    |                                | Reflectieve algenbloei ( <i>Reflective algal blooms</i> )                             | Door middel van een grootschalige oceaanfertilisatie zou een wijdverspreide algenbloei gecreëerd worden waardoor een hogere proportie aan zonlicht wordt gereflecteerd. Daarnaast kan dergelijke algenbloei aanleiding geven tot een verhoogde uitstoot van dimethylsulfide, een molecule dat wolkvorming katalyseert en hiermee het albedo- effect verder versterkt ( <a href="#">Holligan et al. 1993</a> , <a href="#">Quinn &amp; Bates 2011</a> ). |

|             |                   |  |   |
|-------------|-------------------|--|---|
|             |                   | Ijsvorming ( <i>Ice (formation)</i> )  | Concepten die via het pompen van zeewater over het zeeijs ( <a href="#">Desch et al. 2016</a> ) of het verspreiden van siliciumbollen ( <a href="#">Field et al. 2018</a> ) ijsvorming willen stimuleren zijn reeds gekend.   |
|             |                   | Reflectieve partikels ( <i>Reflective particles</i> )  | Het oceaanalbedo verhogen door het verspreiden van reflectieve partikels over grote delen van de oceaan (NRC 1977).   |
|             |                   | <i>Marine Cloud Brightening</i> (vorm van <i>Stratospheric Aerosol Injection</i> , SAI – <a href="#">GESAMP 2019</a> ) | Stimuleren van (densere) wolkvorming door het uitstoten van microdruppels zeewater in de atmosfeer. Naast een toename in reflectie zou deze techniek ook de levensduur van wolken verhogen ( <a href="#">Latham et al. 2014</a> , <a href="#">NRC2015b</a> ).   |
| <b>CDR*</b> | Andere technieken | <i>Omzetting van thermische oceaanenergie</i> ( <i>Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC</i> )                         | OTEC maakt gebruik van het verschil in temperatuur tussen warm oppervlaktewater en koud, dieper water om elektrische energie op te wekken. Het oppervlaktewater wordt gebruikt om een werkvloeistof met een laag kookpunt te verdampen (bv. ammoniak). De damp wordt vervolgens gebruikt om een turbine en generator aan te drijven waarmee koud water uit de diepe oceaan naar boven wordt gepompt wat de werkvloeistof opnieuw condenseert. Het temperatuurverschil moet groter zijn dan 20 °C om netto stroom op te wekken. Dergelijke verschillen zijn te vinden tussen de 20-24 <sup>e</sup> breedtegraad ( <a href="#">Yool et al. 2009</a> , <a href="#">Fujita et al. 2012</a> ). |
|             |                   | <i>Seawater air conditioning</i>   | Koud oceaانwater uit de diepte wordt opgepompt om gebouwen te koelen ( <a href="#">Elsafy &amp; Saeid 2009</a> ).   |

\*Indirecte of deels indirecte reductie in atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie.