



**Vlaamse  
overheid**

**Onderzoek naar mogelijk  
ondersteuningsbeleid m.b.t.  
nieuwe toepassingsmogelijkheden van  
CO<sub>2</sub> als grondstof/feedstock**

**DEPARTEMENT  
LEEFMILIEU,  
NATUUR &  
ENERGIE**

[WWW.LNE.BE](http://WWW.LNE.BE) | [WWW.VITO.BE](http://WWW.VITO.BE)

## **Auteurs**

Linsey Garcia-Gonzalez, Guinevere Thomassen, Mieke Quaghebeur, Stella Vanassche, Miet Van Dael,  
Heleen De Wever (VITO)  
Vanden Berghe Joost (DNV-GL Belgium)

## **Begeleidende stuurgroep**

Els Brouwers (essenscia)  
Veerle Buytaert (Vlaams Energie Agentschap)  
Karen Callebaut (Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen)  
Jorre De Schrijver (Departement Leefmilieu, Natuur en Energie)  
Thomas Desnijder (Havenbedrijf Gent)  
Michel Leyseele (Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen)  
Jan Schaerlaekens (Departement Leefmilieu, Natuur en Energie)  
Jan Suls (Flanders Innovation Hub for Sustainable Chemistry)  
Lieven Top (Departement Economie, Wetenschap & Innovatie)  
Dries Van Hooydonk (Agentschap Innovatie en Ondernemen)  
Tomas Velghe (Departement Leefmilieu, Natuur en Energie)

coverbeeld: Proviron | [www.proviron.be](http://www.proviron.be)

V.U.: Jean-Pierre Heirman, Secretaris-generaal Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Koning  
Albert II-laan 20/8, 1000 Brussel

## INHOUD

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| MANAGEMENT SAMENVATTING.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 12        |
| MANAGEMENT SUMMARY.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 16        |
| <b>1</b> INLEIDING.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>20</b> |
| 1.1 Situering van de opdracht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 20        |
| 1.2 Doelstellingen van de studie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 23        |
| <b>2</b> BESCHRIJVING VAN DE MEEST BELOFTEVOLLE NIEUWE CO <sub>2</sub> -GEBRUIKSTECHNIEKEN MET CONCRETE TOEPASSINGEN IN HET VLAAMS GEWEST.....                                                                                                                                                                                                                    | <b>24</b> |
| 2.1 Inventarisatie van CO <sub>2</sub> -gebruiksonderzoek van kennisinstellingen in Vlaanderen                                                                                                                                                                                                                                                                    | 24        |
| 2.1.1 Katholieke Universiteit Leuven – Centrum voor Oppervlaktechemie en Katalyse (COK) – Katalyse ( <a href="http://www.biw.kuleuven.be/m2s/cok/Groups/prof.-dirk-de-vos">http://www.biw.kuleuven.be/m2s/cok/Groups/prof.-dirk-de-vos</a> )                                                                                                                      | 26        |
| 2.1.2 Katholieke Universiteit Leuven – Centrum voor Oppervlaktechemie en Katalyse (COK) – Fotoelectrochemie ( <a href="http://www.kuleuven.be/wieiswie/nl/person/00008614">http://www.kuleuven.be/wieiswie/nl/person/00008614</a> )                                                                                                                               | 28        |
| 2.1.3 Katholieke Universiteit Leuven – Procestechologie voor Duurzame Systemen ( <a href="http://www.kuleuven.be/wieiswie/nl/person/00011040">http://www.kuleuven.be/wieiswie/nl/person/00011040</a> )                                                                                                                                                            | 29        |
| 2.1.4 Universiteit Antwerpen - Onderzoeksgroep Plasma, Laser Ablatie en Oppervlakte modellering (PLASMANT - <a href="https://www.uantwerpen.be/en/rg/plasmant/">https://www.uantwerpen.be/en/rg/plasmant/</a> ) en Laboratorium voor Adsorptie en Katalyse (LADCA - <a href="https://www.uantwerpen.be/en/rg/ladca/">https://www.uantwerpen.be/en/rg/ladca/</a> ) | 31        |
| 2.1.5 Universiteit Antwerpen – Organische synthese ( <a href="https://www.uantwerpen.be/en/rg/orsy/">https://www.uantwerpen.be/en/rg/orsy/</a> )                                                                                                                                                                                                                  | 34        |
| 2.1.6 Universiteit Antwerpen – Duurzame Energie en Luchtzuivering (DuEL - <a href="https://www.uantwerpen.be/en/rg/sustainable-energy-air-water-tech/">https://www.uantwerpen.be/en/rg/sustainable-energy-air-water-tech/</a> )                                                                                                                                   | 36        |
| 2.1.7 Universiteit Gent – Centrum voor Microbiële Ecologie en Technologie (CMET - <a href="http://labmet.ugent.be/">http://labmet.ugent.be/</a> )                                                                                                                                                                                                                 | 38        |
| 2.1.8 Universiteit Gent – Laboratorium voor Chemische Technologie ( <a href="http://www.lct.ugent.be/">http://www.lct.ugent.be/</a> )                                                                                                                                                                                                                             | 40        |
| 2.1.9 Thomas More – Campus Geel ( <a href="http://www.sunbuilt.be/">http://www.sunbuilt.be/</a> )                                                                                                                                                                                                                                                                 | 42        |
| 2.1.10 VITO – Duurzame chemie ( <a href="https://vito.be/nl/chemie">https://vito.be/nl/chemie</a> )                                                                                                                                                                                                                                                               | 43        |
| 2.1.11 Bio Base Europe Pilot Plant ( <a href="http://www.bbeu.org/">http://www.bbeu.org/</a> )                                                                                                                                                                                                                                                                    | 46        |
| 2.2 Beschrijving van toegepaste/geplande CCU-technieken in de industriële sector in Vlaanderen en identificatie van de meest beloftevolle technieken                                                                                                                                                                                                              | 47        |
| 2.2.1 ArcelorMittal                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 49        |
| 2.2.2 Havenbedrijf Antwerpen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 52        |
| 2.2.3 Avecom                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 55        |
| 2.2.4 Carbstone Innovation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 58        |
| 2.2.5 Organic Waste Systems (OWS)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 61        |
| 2.2.6 Proviron                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 64        |
| 2.3 Succesvolle internationale toepassingen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 67        |
| 2.3.1 Meest beloftevolle technologieën                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 67        |
| 2.3.2 Covestro                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 70        |
| 2.4 Identificatie van de meest beloftevolle technieken                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 72        |
| <b>3</b> GLOBALE EVALUATIE.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>77</b> |
| <b>4</b> ANALYSE VAN DE MEEST BELOFTEVOLLE TECHNIEKEN.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>82</b> |





## LIJST VAN TABELLEN

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 1: Overzicht van voornaamste CO <sub>2</sub> -gebruiksonderzoeken bij Vlaamse kennisinstellingen.....                                                                                                                                                            | 25  |
| Tabel 2: Overzicht van voornaamste CO <sub>2</sub> -gebruiksonderzoeken bij Vlaamse industrie.....                                                                                                                                                                     | 48  |
| Tabel 3: Overzicht van de meest beloftevolle CCU omzettingen gerapporteerd in verschillende studies .....                                                                                                                                                              | 69  |
| Tabel 4: Status van de meest beloftevolle technologieën door Joint Research Centre - DG JRC. Evaluatiecriteria zijn gebaseerd op Global CCS Institute en Parsons Brinckerhoff (2011) (Bocin-Dumitriu et al., 2013) .....                                               | 69  |
| Tabel 5: Kwalitatieve evaluatie van industriële CCU initiatieven volgens een aantal criteria. Groen: gunstig, rood: ongunstig. Semi-comm.: semi-commercieel.....                                                                                                       | 74  |
| Tabel 6: Stand van ontwikkeling voor geïnventariseerde CCU activiteiten in Vlaanderen. *Haalbaar onder bepaalde condities .....                                                                                                                                        | 78  |
| Tabel 7: Geschatte tijdslijn tot commercialisatie voor geïnventariseerde CCU activiteiten in Vlaanderen .....                                                                                                                                                          | 79  |
| Tabel 8: Massabalans voor de synthese van methanol uit CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                                                                                           | 86  |
| Tabel 9: Energiebalans voor de synthese van methanol uit CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                                                                                         | 87  |
| Tabel 10: Overzicht van CO <sub>2</sub> -emissies voor de synthese van methanol uit CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                                                              | 87  |
| Tabel 11: Massabalans voor de synthese van methanol uit syngas .....                                                                                                                                                                                                   | 90  |
| Tabel 12: Energiebalans voor de synthese van methanol uit syngas .....                                                                                                                                                                                                 | 91  |
| Tabel 13: Overzicht van CO <sub>2</sub> -emissies voor de synthese van methanol uit aardgas .....                                                                                                                                                                      | 92  |
| Tabel 14: Vergelijking van de massa- en energiebalans voor de synthese van methanol uit CO <sub>2</sub> (CCU-scenario) en aardgas (referentiescenario) .....                                                                                                           | 93  |
| Tabel 15: Gassamenstelling van de uitstoot van hoogovens ( <i>blast furnace gas</i> ) .....                                                                                                                                                                            | 96  |
| Tabel 16: Finale massabalans voor de omzetting van CO en CO <sub>2</sub> aanwezig in de uitstoot van de hoogovens naar ethanol.....                                                                                                                                    | 97  |
| Tabel 17: Energiebalans voor de productie van ethanol uit gassen afkomstig van hoogovens .....                                                                                                                                                                         | 98  |
| Tabel 18: Overzicht van CO <sub>2</sub> -emissies voor de synthese van ethanol uit CO <sub>2</sub> . Er werd verondersteld dat 50% restwarmte gebruikt wordt waarbij de CO <sub>2</sub> -emissies gerelateerd aan de productie van restwarmte verwaarloosd wordt ..... | 99  |
| Tabel 19: Massabalans voor de verbranding van gassen afkomstig van uitstoot van hoogovens ..                                                                                                                                                                           | 100 |
| Tabel 20: Energiebalans voor de productie van elektriciteit door de verbranding van gassen afkomstig uit uitstoot van hoogovens.....                                                                                                                                   | 101 |
| Tabel 21: Overzicht van CO <sub>2</sub> -emissies voor de synthese van ethanol uit CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                                                               | 101 |
| Tabel 22: Finale massabalans voor de productie van ethanol uit nafta. De co-producten uitstroomkraken zijn niet vermeld in de tabel.....                                                                                                                               | 104 |
| Tabel 23: Energiebalans voor de productie van ethanol uit nafta .....                                                                                                                                                                                                  | 105 |
| Tabel 24: Overzicht van CO <sub>2</sub> -emissies voor de synthese van ethanol uit nafta .....                                                                                                                                                                         | 106 |
| Tabel 25: Vergelijking van de massa- en energiebalans voor de synthese van ethanol uit CO/CO <sub>2</sub> (CCU-scenario) en de productie van elektriciteit uit CO (referentiescenario 1). Er werd                                                                      |     |





## Lijst van figuren

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figuur 1: Niet-exhaustieve samenvatting van de drijfveren voor CCU<br>( <a href="http://www.scotproject.org/drivers">http://www.scotproject.org/drivers</a> )                                                                                                                                                                                             | 20 |
| Figuur 2: Schematische illustratie van de toepassingen van CO <sub>2</sub><br>( <a href="http://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/research-and-development/co2-utilization">http://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/research-and-development/co2-utilization</a> )                                                               | 21 |
| Figuur 3: Voorstelling thermisch katalyseproces (links) en elektrokatalyse (rechts)                                                                                                                                                                                                                                                                       | 26 |
| Figuur 4: Plasmakatalytische omzetting van CO <sub>2</sub> in aanwezigheid van een pakking                                                                                                                                                                                                                                                                | 31 |
| Figuur 5: Algenproductie op gezuiverde afgasstromen                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 36 |
| Figuur 6: Concept van microbiële elektrosynthese ( <a href="http://www.electrotalk.org">www.electrotalk.org</a> )                                                                                                                                                                                                                                         | 38 |
| Figuur 7: Concept van <i>chemical looping reforming</i> (Galvita, 2016)                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Figuur 8: PHA productie vanuit CO <sub>2</sub> en hernieuwbare energie                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 43 |
| Figuur 9: Broeikasgasemissies in Vlaanderen per sector (bron: MIRA op basis van EIL (VMM, 2012))                                                                                                                                                                                                                                                          | 47 |
| Figuur 10: Steelanol aanpak ( <a href="http://www.steelanol.eu">www.steelanol.eu</a> )                                                                                                                                                                                                                                                                    | 49 |
| Figuur 11: Principe van methanolproductie uit CO <sub>2</sub> en hernieuwbare energie (Van Osselaer, 2016; Stefansson, 2015)                                                                                                                                                                                                                              | 52 |
| Figuur 12: <i>Power-to-protein</i> concept ( <a href="http://www.powertoprotein.eu/programme/">http://www.powertoprotein.eu/programme/</a> , Verstraete, 2016)                                                                                                                                                                                            | 56 |
| Figuur 13: Principe van Carbstone carbonatatieproces ( <a href="http://www.carbstoneinnovation.be/">http://www.carbstoneinnovation.be/</a> )                                                                                                                                                                                                              | 58 |
| Figuur 14: <i>Power-to-gas</i> concept (Hydrogenics, 2012)                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 61 |
| Figuur 15: Algenplantage in ProviAPT systeem op Hooge Maey (Antwerpen)                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 64 |
| Figuur 16: Opschalingstraject ProviAPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 65 |
| Figuur 17: Overzicht van CCU initiatieven in Europa ( <a href="http://www.entrepreneurship.tu-berlin.de/CCU/">http://www.entrepreneurship.tu-berlin.de/CCU/</a> , geconsulteerd in maart 2016)                                                                                                                                                            | 67 |
| Figuur 18: Ranking van CCU start-ups (Stute, 2015)                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 68 |
| Figuur 19: Copolymerisatie van propyleenoxide en CO <sub>2</sub> naar polyethercarbonaat polyol (Langake et al., 2014). DMC, dubbel metaalcyanide                                                                                                                                                                                                         | 70 |
| Figuur 20: Positionering van verschillende CCU <i>cases</i> volgens de relatieve toegevoegde waarde en het marktvolume. De grootte van de bollen staat in verhouding tot de CO <sub>2</sub> -vastlegging per ton product                                                                                                                                  | 75 |
| Figuur 21: Positionering van verschillende CCU <i>cases</i> volgens de productwaarde en verbrandingswarmte. De grootte van de bollen staat in verhouding tot de duur van de CO <sub>2</sub> -vastlegging in het eindproduct. Waarde product is gebaseerd op fossiele brandstoffen (prijs maart 2016). De prijs voor geavanceerde biobrandstoffen is hoger | 76 |
| Figuur 22: Aantal voltijdse equivalenten (VTE) actief op het vlak van CCU in Vlaamse kennisinstellingen (minstens op niveau van doctoraatsonderzoek). De lichtgebaseerde processen omvatten fotosynthese en foto-electrochemie                                                                                                                            | 81 |
| Figuur 23: Blokschema voor de synthese van methanol uit CO <sub>2</sub> . De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton methanol geproduceerd) worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                           | 85 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figuur 24: Blokschema voor de synthese van methanol uit aardgas. De energiebalansen (uitgedrukt per ton methanol geproduceerd) worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 89  |
| Figuur 25: Netto CO <sub>2</sub> -emissies voor de productie van methanol uit CO <sub>2</sub> (CCU-scenario) en aardgas (referentiescenario) en het verschil in CO <sub>2</sub> -emissies van beide scenario's                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 93  |
| Figuur 26: Blokschema voor de synthese van ethanol uit CO en CO <sub>2</sub> . De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton ethanol geproduceerd) worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 95  |
| Figuur 27: Blokschema voor de verbranding van CO en H <sub>2</sub> met productie van elektriciteit. De massa- en energiebalansen worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 100 |
| Figuur 28: Blokschema voor de synthese van ethanol uit nafta. De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton ethanol geproduceerd) worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 103 |
| Figuur 29: Netto CO <sub>2</sub> -emissies voor de productie van ethanol (CCU-scenario) en elektriciteit (referentiescenario 1) uit CO en het verschil in CO <sub>2</sub> -emissies van beide scenario's                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 107 |
| Figuur 30: Netto CO <sub>2</sub> -emissies voor de productie van ethanol uit CO/CO <sub>2</sub> (CCU-scenario) en nafta (referentiescenario 2) en het verschil in CO <sub>2</sub> -emissies van beide scenario's                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 108 |
| Figuur 31: Blokschema voor de productie van micro-algen in gesloten fotobioreactor (ProviAPT). De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton droge biomassa geproduceerd) worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 110 |
| Figuur 32: Blokschema voor de productie van micro-algen in open vijversysteem. De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton droge biomassa geproduceerd) worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 114 |
| Figuur 33: Netto CO <sub>2</sub> -emissies voor de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (CCU-scenario) en open vijver (referentiescenario) en het verschil in CO <sub>2</sub> -emissies van beide scenario's                                                                                                                                                                                                                                                                           | 118 |
| Figuur 34: Blokschema voor de productie van bouwmaterialen uit staalslakken en CO <sub>2</sub> . De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton bouw materiaal geproduceerd) worden in de tekst toegelicht.                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 120 |
| Figuur 35: Blokschema voor de productie van bouwmaterialen uit beton. De massa- en energiebalansen worden in de tekst toegelicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 124 |
| Figuur 36: Netto CO <sub>2</sub> -emissies voor productie van bouwmaterialen op basis van CO <sub>2</sub> en minerale grondstoffen (CCU-scenario) en beton (referentiescenario) en het verschil in CO <sub>2</sub> -emissies van beide scenario's. In het CCU-scenario werd verondersteld dat de thermische energie voor het drogen van de fijne slak geproduceerd wordt door het verbranden van aardgas                                                                                                   | 129 |
| Figuur 37: Netto CO <sub>2</sub> -emissies voor productie van bouwmaterialen op basis van CO <sub>2</sub> en minerale grondstoffen (CCU-scenario) en beton (referentiescenario) en het verschil in CO <sub>2</sub> -emissies van beide scenario's. In het CCU-scenario werd laagwaardige restwarmte verondersteld voor het drogen van de fijne slak waarbij de CO <sub>2</sub> -emissies verwaarloosd werden                                                                                               | 129 |
| Figuur 38: Netto CO <sub>2</sub> -voetafdruk van de geselecteerde cases voor het CCU-scenario (afgekort CCU) en het conventionele proces (Referentie-scenario, afgekort Ref) in de veronderstelling van volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie. "Ref1 en Ref 2 – ethanol" staat respectievelijk voor referentiescenario 1 (i.e., verbranding van hoogovengas) en 2 (i.e., productie van ethanol uit nafta). "CCU1 en CCU2 – bouwmaterialen" staat respectievelijk voor Carbstone bouw materiaal met |     |

als thermische energie voor het drogen van de fijne slak het verbranden van aardgas en laagwaardige restwarmte. Vermits het “Ref2 – ethanol” scenario de huidige CO<sub>2</sub>-emissies van de staalindustrie (weergegeven in Ref1 - ethanol) ongewijzigd laat, dienen in feite de CO<sub>2</sub>-emissies van “Ref1 – ethanol” mee in rekening gebracht te worden (aangeduid in rood) voor de totale balans 131

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figuur 39: Onzekerheidsanalyse voor de <i>Power-to-methanol case</i>                | 135 |
| Figuur 40: Onzekerheidsanalyse voor de ethanol case                                 | 137 |
| Figuur 41: Onzekerheidsanalyse voor de micro-algen case                             | 141 |
| Figuur 42: Onzekerheidsanalyse voor de Carbstone case                               | 144 |
| Figuur 43: SWOT-analyse <i>Power-to-methanol</i>                                    | 153 |
| Figuur 44: SWOT-analyse ethanol                                                     | 155 |
| Figuur 45: SWOT-analyse micro-algen                                                 | 157 |
| Figuur 46: SWOT-analyse Carbonatatie                                                | 159 |
| Figuur 47: Visuele voorstelling van de aanpak voor het uitwerken van een CCU-beleid | 166 |
| Figuur 48: Overzicht van de voornaamste beleidsdomeinen over de CCU-waardeketen     | 177 |
| Figuur 49: Aanpassingen aan EU ETS reglementering – Optie 1                         | 179 |
| Figuur 50: Aanpassingen aan EU ETS reglementering – Optie 2                         | 181 |
| Figuur 51: Aanpassingen aan EU ETS reglementering – Optie 3                         | 182 |

## MANAGEMENT SAMENVATTING

Koolstofafvang en -gebruik of CCU (*Carbon Capture and Utilization*) omvat processen waarbij CO<sub>2</sub> uit puntbronnen wordt ingezet als basismateriaal voor de synthese van nieuwe moleculen met een economische waarde. Deze aanpak kan bijdragen tot de reductie van het broeikasgas CO<sub>2</sub> in de atmosfeer, dat beschouwd wordt als één van de belangrijkste oorzaken voor de klimaatverandering. Hoewel verschillende CCU-technologieën ontwikkeld worden, blijft de implementatie van CCU op industriële schaal voorlopig eerder beperkt in Vlaanderen.

Het doel van deze opdracht was de meest beloftevolle nieuwe toepassingsmogelijkheden van CO<sub>2</sub> als grondstof/*feedstock* in kaart te brengen, met het oog op de toepassing ervan in het Vlaams Gewest. Deze opdracht focuste zich specifiek op het hergebruik en de omzetting van CO<sub>2</sub>. Afvang en opslag van CO<sub>2</sub>, ook wel aangeduid als *Carbon Capture and Storage* (CCS), en het gebruik van CO<sub>2</sub> *an sich* voor de voedingsindustrie of voor de winning van aardgas of aardolie vielen buiten het bestek van deze studie.

Het huidig CO<sub>2</sub>-gebruiksonderzoek van de verschillende kennisinstellingen en CCU-initiatieven in de industriële sector in Vlaanderen werden in kaart gebracht a.h.v. een stakeholderbevraging ([Hoofdstuk 2](#)). De vraagstelling had betrekking op *inputs* en *outputs* van het proces, proceskenmerken, de status van de technologie-ontwikkeling, de mogelijkheid om hernieuwbare energie te gebruiken, economische aspecten en technologische en niet-technologische barrières. De geïnventariseerde industriële CCU-activiteiten werden vervolgens geëvalueerd volgens een aantal thermodynamische, economische en milieucriteria. Daarnaast werd onderzocht welke succesvolle internationale toepassingen relevant zijn voor Vlaanderen rekening houdend met de Vlaamse actoren/markt.

Een globale evaluatie van de geïnventariseerde CCU technieken ([Hoofdstuk 3](#)) leerde dat de activiteiten bij de kennisinstellingen zich logischerwijze in de onderzoeksfase situeren, terwijl de hoofdmoot van de processen die bij bedrijven ontwikkeld of toegepast worden, zich al in de demonstratiefase bevindt en onder bepaalde omstandigheden economisch haalbaar kan zijn. De tijdslijn tot commercialisatie werd voor de bedrijfsgebonden activiteiten ingeschat op 2 à 3 jaar. Voor de activiteiten bij de kennisinstellingen zijn er enerzijds een groep processen die binnen 5 jaar doorontwikkeld zouden zijn en anderzijds een aantal meer embryonale ontwikkelingen waarvoor nog minstens 10 tot 15 jaar nodig is tot commercialisatie. Een aantal barrières die de introductie van CCU-technologieën afremmen werden geïdentificeerd. Een eerste groep beperkingen is technologisch van aard. De processen die zich nog op een laag TRL (*technology readiness level*) niveau bevinden, dienen verder gekarakteriseerd en geoptimaliseerd te worden voor een correcte inschatting van hun potentieel. Voor bepaalde technologieën kan een uitbreiding van de product *range* marktintroductie waarschijnlijk versnellen. Meer interactie tussen bedrijven en onderzoeksinstituten lijkt aangewezen om een beter zicht te krijgen op beschikbare puntbronnen en op de vereiste productspecificaties in termen van zuiverheid en kostprijs. Dit kan immers mee bepalen welke combinatie technologie - product het meeste potentieel heeft. De onderzoekswereld zou daarnaast ook graag een beter beeld hebben van de



onzekerheidsanalyse uitgevoerd. Vervolgens werd het niveau van de technologieontwikkeling (TRL) beoordeeld (criterium 4).

Uit de techno-economische analyse (*i.e.* criterium 1-4) kan besloten worden dat de *cases* technologisch even marktrijp zijn en dat ze nu gedemonstreerd dienen te worden in een operationele omgeving.

De productie van constructiematerialen en algenbiomassa zijn winstgevend onder de gemaakte assumpties, maar scoren lager in schaalgrootte. De lage CO<sub>2</sub>-sequestratie per ton bouw materiaal en de hoeveelheid beschikbare staalslakken, zijn belangrijke limiterende factoren voor bredere toepassing in het Vlaamse gewest. Door diversificatie in de input van reststoffen kan de hoeveelheid te verwerken CO<sub>2</sub> echter verhoogd worden. Voor algenteelt is het de geringe markt van larvale voeders die de schaalgrootte beperkt. Hoewel een verruiming van toepassingen de vraag naar micro-algen kan vergroten, zal dit de schaalgrootte maar beperkt beïnvloeden wegens het oppervlaktebeslag.

*Power-to-methanol* is momenteel nog niet concurrentieel met fossiele brandstoffen maar heeft het grootste potentieel om CO<sub>2</sub> vast te leggen en past in de circulaire economie. Om ten volle gebruik te maken van het potentieel voor CO<sub>2</sub>-besparing en een bredere afzetmarkt te garanderen, kan gediversifieerd worden naar andere producten en dus andere *Power-to-X* concepten.

Ethanolproductie uit hoogovengas is economisch haalbaar onder de gemaakte assumpties. In dit geval is er sprake van verminderde CO<sub>2</sub>-emissies t.o.v. de huidige situatie waarin de gassen verbrand worden met opwekking van energie, tenminste wanneer dit verlies aan energie gecompenseerd wordt door hernieuwbare elektriciteitsproductie.

Voor beide brandstoffen geldt wel dat de duur van de CO<sub>2</sub>-vastlegging beperkt is en dat er bij gebruik in de transportsector *downcycling* plaatsvindt, in de zin dat emissies van puntbronnen uiteindelijk verspreid en verdund worden vrijgezet na verbranding van de brandstoffen.

Verder werd een systeemanalyse uitgevoerd (criterium 5) gericht op input, technologie, output en duurzaamheid. Daaruit kon o.a. het volgende besloten worden.

- Inkomsten uit eventueel veel hoger gewaardeerde CO<sub>2</sub>-emissierechten dan vandaag kunnen vanzelfsprekend een doorslaggevende factor worden voor de meeste technologieën indien de Europese wetgeving het mogelijk maakt om vermeden CO<sub>2</sub>-emissie wel in mindering te brengen.
- De kostprijs voor de captatie en voorbehandeling van CO<sub>2</sub> is voor alle pistes nog onduidelijk. Infrastructuur voor CO<sub>2</sub>-transport is nog niet aanwezig en de infrastructuurkosten is gelijkaardig voor de geanalyseerde technologieën. De kostprijs per ton wordt in grote mate bepaald door de compressie.
- De locatie voor een CCU-site dient zo gekozen te worden dat de milieu-impact en de kost voor aanvoer van CO<sub>2</sub> en andere grondstoffen redelijk is.
- De kwaliteit van de captatie wordt o.a. bepaald door directe en indirecte emissies voor captatie, transport, gebruik van de CO<sub>2</sub> (in LCA perspectief), de graad van permanentie, het circulair karakter van het CO<sub>2</sub>-gebruik.
- *Downcycling* na kortstondige captatie van zuivere CO<sub>2</sub>-stromen is op langere termijn te vermijden.
- Diversificatie van eindproducten verhoogt de marktkansen van een CCU-technologie.

Deze systeemanalyse geeft een inzicht hoe een CCU-beleid op deze factoren kan inspelen.

Tot slot werden concrete beleidsaanbevelingen geformuleerd om de toepassingsmogelijkheden van CO<sub>2</sub> in het Vlaamse Gewest aan te moedigen, rekening houdend met het algemeen EU ETS (*Emissions Trading System*) kader in Europa (Hoofdstuk 5). In de voorgestelde beleidsvisie wordt een onderscheid gemaakt tussen een beleidsvisie op korte en lange termijn. Op korte termijn is het beleid enerzijds gericht op de implementatie van beleidsmaatregelen op Vlaams niveau. Deze maatregelen hebben tot doel om de economische en innovatieve meerwaarde van CCU voor Vlaanderen en Europa in evidentie te stellen door bv. de acceptatie van CCU en de producten ervan te helpen vergroten en doorbraken te helpen forceren bij gemeenschappelijke problemen bv. op vlak van captatie en transport van CO<sub>2</sub>. Op langere termijn richt het beleid zich op het opschalen van CCU in functie van de klimaatdoelstellingen door bv. het mogelijk maken dat het hergebruik van CO<sub>2</sub> in rekening wordt gebracht in CO<sub>2</sub>-emissie inventarissen van de CO<sub>2</sub>-bronnen. Ook dient bekeken te worden hoe bij de herziening van de *Renewable Energy Directive* (RED) in 2017 het aanmoedigingsbeleid voor hernieuwbare brandstoffen compatibel kan gemaakt worden met de stimulatie van CCU-technieken. Zo kan een gelijkaardige behandeling van CCU-brandstoffen en elektrische voertuigen een grote stimulans vormen voor CCU-toepassingen.

De beleidsvisie kan uitgewerkt worden in concrete beleidsplannen voor de korte en lange termijn. In deze beleidsplannen is plaats voor een breed gamma beleidsmaatregelen. Deze laatste bouwen veelal voort op reeds bestaande maatregelen betreffende bv. innovatie, klimaat en energie.

Op korte termijn richt het voorgestelde beleidsplan zich op

- het stimuleren van LCA's (*Life Cycle Assessment*) van de CCU-technologieën
- het faciliteren van demonstratieprojecten
- het ondersteunen van investeringen
- het promoten van CCU-producten (brandstoffen en materialen) en CCU-diensten
- het ondersteunen van clusterontwikkeling.

Dit korte termijn beleid draagt bij tot een marktgedreven groei van CCU en tot technologie-ontwikkeling in Vlaanderen in sectoren waarin Vlaanderen sterk staat en kennis heeft, bv. de chemie en de bouwmaterialen.

Op langere termijn richt het beleidsplan zich op

- het aanbevelen van aanpassingen in de EU ETS en RED
- het aanspreken van eventuele NER400 middelen
- het mee vorm geven van een EU-actieplan voor de circulaire economie waarin CO<sub>2</sub>-gebruik tot zijn recht komt.

5.10.2016

## MANAGEMENT SUMMARY

Carbon Capture and Utilization or CCU includes processes in which CO<sub>2</sub> from point sources is being used as feedstock for the synthesis of new molecules with an economic value. This approach can contribute to the reduction of the greenhouse gas CO<sub>2</sub> in the atmosphere, which is considered one of the main causes for climate change. Although several CCU technologies are developed, the implementation of CCU on an industrial scale remains for the time being rather limited in Flanders.

The general aim of this study was to map the most promising new valorization pathways for CO<sub>2</sub> as raw material/feedstock, with a view to their application in the Flemish Region. This study focused specifically on the recycling and conversion of CO<sub>2</sub>. Carbon capture and storage or CCS and the use of CO<sub>2</sub> in the food industry or for enhanced oil recovery are outside the scope of this study.

The current CO<sub>2</sub>-utilization projects of research centers and the industrial CCU-initiatives in Flanders were reviewed by means of a stakeholder survey ([Chapter 2](#)). The questionnaire was designed to gather information on the inputs and outputs of the process, process characteristics, status of technology development, possibility of using renewable energy, economics and technological and non-technological barriers. Subsequently, the inventoried industrial CCU activities were evaluated according to a number of thermodynamic, economic and environmental criteria. In addition, it was assessed which successful international applications are relevant to Flanders, taking into account the Flemish actors/market.

An overall assessment of the inventoried CCU techniques ([Chapter 3](#)) showed that the activities of the research centers are situated in the research phase, conform expectations. The bulk of the processes that are developed or applied in industry, are already in the demonstration phase and are economically viable under certain conditions. The timeline to commercialization for industry-associated activities is estimated at 2 to 3 years. For the research-related activities, one group of processes can be further developed within five years, while more embryonic developments require at least 10 to 15 years to reach the commercialization phase. A number of barriers that inhibit the introduction of CCU technologies were identified. First, there is a number of technological limitations. The processes that are still at a low TRL (technology readiness level) should be further characterized and optimized for a proper assessment of their potential. For certain technologies, expanding the product range can probably accelerate market introduction. More interaction between companies and research centers would be appropriate to get a better view on the available point sources and the required product specifications in terms of purity and cost price. This would allow to better determine which combination technology - product has the most potential. The research community would also like to have a better view on the interest of companies or industrial sectors to participate in CCU research and commercialize CCU technology.

Regulation has an impact on the commercialization of a CCU process in several ways. Depending on the end product, compliance with complex legislation or standards may be required or challenges may exist to qualify the product for specific applications. Moreover, the current climate policy framework offers rather limited incentives for CCU technologies: the implementation of CCU techniques is not really stimulated by the current reporting obligations within the ETS and there are hurdles to obtain the renewable fuel status. The importance of upscaling and demonstration projects that show the potential of a CCU technology under real conditions is recognized, but financing is difficult due to the high investment costs.

Four cases were selected from the inventoried CCU technologies for further evaluation in Chapter 4:

Following criteria were taken into account for this selection:

Subsequently, the selected cases were analyzed based on 5 criteria and an assessment was made which contribution they could make to emission reductions in the Flemish Region. The analysis took into account the system boundaries of each individual case and should therefore not be considered as an overall assessment of the applied technology. The general aim of the analysis was to compare the different cases, to identify the strengths and to evaluate how weaknesses could be overcome. It should be emphasized that in the framework of this study, only an exploratory first assessment could be performed for the various criteria.

The techno-economic analysis (criteria 1-4) showed that the technologies are equally mature and need to be demonstrated in an operational environment.

The amount of processed CO<sub>2</sub> can however be increased by diversifying the input of waste materials. For the cultivation of microalgae, the small market of larval feed limits the scale. Although broadening the range of applications could increase the demand for micro-algae, the scale of application will be limited by the footprint (required surface area of land).

Power-to-methanol is currently not competitive with fossil fuels, but has the largest potential to capture CO<sub>2</sub> and fits into the circular economy concept. Diversification to other products and thus other Power-to-X concepts could maximize the CO<sub>2</sub> reduction potential and ensure a wider market.

The production of ethanol from waste gases produced in the steelmaking process is economic feasible under the given assumptions. In this case, CO<sub>2</sub> emissions are reduced compared to the current situation where off-gases are burned to generate power, at least when this loss of energy is compensated by renewable energy production.

For both fuels, the duration of CO<sub>2</sub> fixation is limited and downcycling takes place when they are applied in transportation, in the sense that emissions from point sources are eventually dispersed and diluted in the atmosphere upon combustion of fuels.

Furthermore, a system analysis was performed (criterion 5) focusing on input, technology, output and sustainability. The following conclusions could be drawn (among others):

- Revenues from possibly higher rated CO<sub>2</sub> emission rights than today can obviously be decisive for most technologies if European legislation makes it feasible to account for the avoided CO<sub>2</sub> emissions.
- The cost price for capture and pretreatment of CO<sub>2</sub> is unclear for all processes. Infrastructure for CO<sub>2</sub> transport is still lacking and the infrastructure cost is comparable for the analyzed technologies. The cost price per tonne CO<sub>2</sub> is largely determined by compression.
- The location for a CCU site should be chosen such that the environmental impact and the cost of supply of CO<sub>2</sub> and other raw materials is reasonable.
- The quality of capture is among others determined by the direct and indirect emissions for capture, transportation, use of CO<sub>2</sub> (from a LCA point of view), degree of permanence of fixation and circular nature of the CO<sub>2</sub> usage.
- Downcycling after short term capture of pure CO<sub>2</sub> streams should be avoided in the longer term.
- Diversification of end products increases the market opportunities of a CCU technology.

This system analysis provides insights on how CCU-policy could address these factors.

Finally, concrete policy recommendations were formulated to encourage the application of CO<sub>2</sub> in the Flemish Region, taking into account the EU ETS (Emissions Trading System) framework in Europe ([Chapter 5](#)). The proposed policy vision distinguishes between a short and long-term strategy. On the short term, focus is on the implementation of policy measures in Flanders. These measures aim to establish economic and innovative added value of CCU for Flanders and Europe by facilitating the acceptance of CCU and its products, and aims to enforce breakthroughs on common problems such as capture and transport of CO<sub>2</sub>. On the long term, focus is on the upscaling of CCU in view of the climate goals, for instance by enabling the registration of recycled CO<sub>2</sub> in the CO<sub>2</sub> emissions inventories of CO<sub>2</sub> sources. In addition, during the revision of the Renewable Energy Directive (RED) in 2017, it should be considered how policies encouraging the use of renewable fuels can be

made compatible with the stimulation of CCU techniques. Equal treatment of CCU fuels and electric vehicles could for instance stimulate CCU applications.

The policy vision can be elaborated into concrete policy plans for the short and long term, which can include a large spectrum of policy measures. The latter will largely build upon existing measures concerning innovation, climate and energy for example.

On the short term, the proposed policy plan focuses on

- stimulating LCA of the CCU technologies
- facilitating demonstration projects
- supporting investments
- promoting CCU products (fuels and materials) and CCU services
- supporting cluster development.

This short term policy will contribute to a market driven growth of CCU and to technology development in Flanders in sectors in which Flanders plays a leading role, e.g. chemistry and construction materials.

In the long term, the policy plan focuses on

- recommending amendments to the EU ETS and RED addressing NER400 funding
- contributing to an EU action plan for the circular economy where CO<sub>2</sub> utilization is recognized for its merits.

## 1 INLEIDING

### 1.1 SITUERING VAN DE OPDRACHT

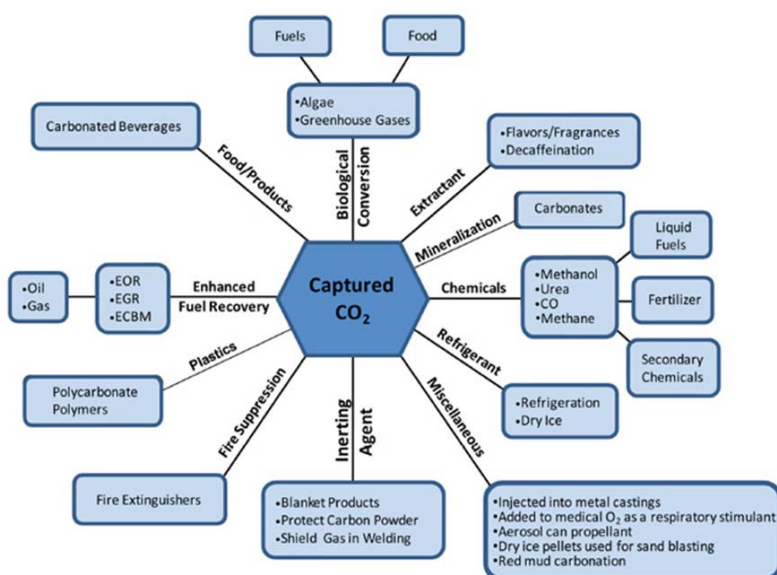
De uitstoot van kooldioxide of CO<sub>2</sub> wordt beschouwd als de belangrijkste oorzaak van de klimaatverandering. Om de nodige emissiereducties te realiseren moeten maatregelen op verschillende vlakken genomen worden, zoals inzake energie-efficiëntie, inzetten op hernieuwbare energiebronnen en het hergebruik van materialen. Als deze maatregelen onvoldoende reducties opleveren, vormt de afvang en opslag of hergebruik van CO<sub>2</sub> een beloftevolle piste om de emissies te reduceren. In het verleden focuste het meeste onderzoek zich op de afvang en opslag van CO<sub>2</sub>, ook wel aangeduid als *Carbon Capture and Storage* (CCS). CCS is een technologie gericht op CO<sub>2</sub>-reductie en verwijdert koolstof uit de economie via bv. injectie in gebruikte olievelden. Hoewel volgens scenario's van onder de andere de Europese Commissie CCS in sommige sectoren kostenefficiënte emissiereducties kan bewerkstelligen, heeft het ook belangrijke tekortkomingen, zoals hoge investeringskosten en een hoog energieverbruik. Dit belemmert de industriële toepassing en brengt daarnaast ook een negatieve publieke perceptie met zich mee.

Een aantrekkelijk alternatief voor het ondergronds opslaan van CO<sub>2</sub> is het gebruik van CO<sub>2</sub> als grondstof voor diverse producten. Dit alternatief staat bekend als koolstofafvang en -gebruik (*Carbon Capture and Utilisation*, CCU). CCU neemt CO<sub>2</sub> uit puntbronnen en zet het om in commercieel waardevolle producten. CCU op zich zal nooit het klimaatprobleem wat betreft de stijgende atmosferische CO<sub>2</sub> niveaus oplossen. Hiervoor ligt de huidige CO<sub>2</sub>-uitstoot (> 35 Gton/jaar) immers te hoog in verhouding tot de vraag naar potentiële waardevolle producten omgezet uit CO<sub>2</sub>. Toch zal CCU extra capaciteit verstrekken in de transitie naar een koolstofarme economie (Styring et al., 2011). Een overzicht van de redenen om te investeren in CCU werd onlangs samengevat door het SCOT project (Figuur 1).

| Reason                                                                                                                                  | Societal or policy objective |             |                 |                 |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|------------|
|                                                                                                                                         | Climate                      | Environment | Energy security | Competitiveness | Innovation |
| To create profitable business based on the demand for CO <sub>2</sub> end-products                                                      | ✓                            |             |                 | ✓               |            |
| To help reduce fossil (fuel) dependency                                                                                                 | ✓                            | ✓           | ✓               |                 |            |
| To improve the carbon footprint of the industry                                                                                         | ✓                            | ✓           |                 | ✓               | ✓          |
| To make use of the specific attributes of CO <sub>2</sub> , to foster product innovation                                                |                              |             |                 | ✓               |            |
| To reduce the cost and environmental impact by using CO <sub>2</sub> in process innovation                                              |                              | ✓           |                 | ✓               |            |
| To help the industry transition to a more circular economy                                                                              |                              | ✓           |                 |                 | ✓          |
| To use the excess-supply of renewable (or conventional) energy production; doing so it will support the development of renewable energy |                              | ✓           | ✓               |                 |            |

Figuur 1: Niet-exhaustieve samenvatting van de drijfveren voor CCU (<http://www.scotproject.org/drivers>)

Figuur 2 geeft een overzicht van de voornaamste huidige en potentiële toepassingen van CCU. CO<sub>2</sub> kan “rechtstreeks” gebruikt worden als o.a. grondstof voor glastuinbouwproducten, frisdrankindustrie en verbeterde oliewinning. Het gebruik van CO<sub>2</sub> *an sich* zal slechts een erg beperkte hoeveelheid van de geëmitteerde CO<sub>2</sub> kunnen omvatten. Daarnaast kan CO<sub>2</sub> als grondstof ook “omgezet” worden voor de productie van bulk- en fijnchemicaliën, synthetische brandstoffen en bouwmaterialen. Door VCI en DECHEMA wordt ingeschat dat de chemische industrie wereldwijd maximaal 1% van alle CO<sub>2</sub>-emissies kan omzetten in fijn- en bulkchemicaliën en tot 10% in brandstoffen (VCI en DECHEMA in Duitsland, 2009<sup>1</sup>). Er wordt weinig informatie gegeven over hoe men tot deze percentages komt. De vastlegging voor de productie van chemicaliën is wel voor ongeveer de helft toe te schrijven aan het nu reeds toegepaste proces van ureumproductie. Op basis van data van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) en Eurostat, kan berekend worden dat de chemische industrie in de EU27 ca. 233 Mton CO<sub>2</sub> zou nodig hebben om de volledige koolstofvraag voor het maken van materialen af te dekken. Dit zou overeenkomen met 5,5% van de totale CO<sub>2</sub>-emissies in hetzelfde gebied en houdt enkel rekening met materialengebruik, niet met energie<sup>2</sup>.



Figuur 2: Schematische illustratie van de toepassingen van CO<sub>2</sub> (<http://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/research-and-development/co2-utilization>)

Hoewel verschillende technologieën hiervoor ontwikkeld worden, blijft de implementatie van CCU op industriële schaal voorlopig eerder beperkt in Vlaanderen. In het kader van een *roadmap* oefening “Valorisatie van Nevenstromen” organiseerde FISCH<sup>3</sup> in 2014 een enquête bij Vlaamse bedrijven en universiteiten. CO<sub>2</sub> werd gerangschikt in de top 5 van de meest waardevolle en/of meest dringende afval/nevenstromen van de

<sup>1</sup> [http://www.chemieundco2.de/\\_media/VCI-DECHEMA-Positionspapier\\_CO2-Nutzung.pdf](http://www.chemieundco2.de/_media/VCI-DECHEMA-Positionspapier_CO2-Nutzung.pdf)

<sup>2</sup> [http://www.co2reuse.eu/images/stories/pdf-files/8-Klotz\\_CO2reuse\\_Industry\\_View\\_Oct2012.pdf](http://www.co2reuse.eu/images/stories/pdf-files/8-Klotz_CO2reuse_Industry_View_Oct2012.pdf)

<sup>3</sup> Flanders Innovation Hub for Sustainable Chemistry

Vlaamse industrie. Hoewel CO<sub>2</sub> hoog gerangschikt werd, was het moeilijk om aan te geven welke route(s) moeten gevolgd worden om een competitief voordeel te hebben. Bedrijven zijn zich dus wel bewust van het belang van CO<sub>2</sub>, maar kunnen (nog) geen mogelijke oplossingen identificeren. De bestaande technologieën om CO<sub>2</sub> te gebruiken hebben elk verschillende voor- en nadelen en de meeste van hen bevinden zich nog in een vroeg ontwikkelingsstadium. Dit maakt het voor de Vlaamse industrie moeilijk om te beslissen welke technologie het meest geschikt is voor het portfolio van het bedrijf en welke economisch vatbaar is. De uitdaging ligt erin CO<sub>2</sub> om te vormen van een duur afvalproduct naar een duurzame grondstof waaruit waarde gecreëerd kan worden. Bovendien zijn er ook een aantal belangrijke niet-technologische problemen voor CCU die de industriële implementatie belemmeren. Deze werden recent samengevat door nova-Instituut op de 3de Conferentie over CO<sub>2</sub> als grondstof voor chemicaliën en polymeren (Carus, 2014):

- De voordelen van CCU zijn niet voldoende bekend of geaccepteerd door ngo's, milieu-experten, politici en het grote publiek. Effectieve communicatie en lobbyen voor CCU ontbreken;
- CCS is nog steeds de beter gekende aanpak om geïncapteerde CO<sub>2</sub> te benutten, wat resulteert in eerder beperkte O&O- budgetten voor CCU op Europees niveau;
- Standaarden en normen voor CO<sub>2</sub>-gebaseerde brandstoffen, chemicaliën en polymeren ontbreken. De invoering van een CO<sub>2</sub>-label kan de potentiële voordelen van producten gemaakt uit afgevangen CO<sub>2</sub> erkennen;
- CCU is nog onvoldoende geïntegreerd in de bestaande stimuleringsregelingen voor biobrandstoffen of duurzame energie.

Aangezien CCU nog in de kinderschoenen staat en het om erg diverse technologieën gaat, zijn beleid en regelgeving hier vaak nog niet voldoende op afgestemd.

## 1.2 DOELSTELLINGEN VAN DE STUDIE

Het doel van deze opdracht is de meest beloftevolle nieuwe toepassingsmogelijkheden van CO<sub>2</sub> als grondstof/*feedstock* in kaart te brengen, met oog op de toepassing hiervan in het Vlaams Gewest.

De opdracht is tweeledig:

1. In kaart brengen van de reeds toegepaste/geplande CCU-technieken in het Vlaams Gewest en de rol die deze nieuwe toepassingsmogelijkheden kunnen betekenen voor de noodzakelijke emissiereducties in het Vlaams Gewest;
2. Concrete beleidsaanbevelingen formuleren om de toepassingsmogelijkheden van CO<sub>2</sub> in het Vlaamse Gewest aan te moedigen, rekening houdend met het algemeen EU ETS kader in Europa.

Deze opdracht focust specifiek op het hergebruik en de omzetting van CO<sub>2</sub>. CCS en het gebruik van CO<sub>2</sub> *an sich* voor de voedingsindustrie of voor de winning van aardgas of aardolie valt buiten het bestek van deze studie.

## 2 BESCHRIJVING VAN DE MEEST BELOFTEVOLLE NIEUWE CO<sub>2</sub>-GEBRUIKSTECHNIEKEN MET CONCRETE TOEPASSINGEN IN HET VLAAMS GEWEST

Op basis van consultaties van bestaande literatuur, internet en relevante actoren, werd een overzicht gemaakt van de initiatieven die momenteel in Vlaanderen lopen. De relevante stakeholders werden gecontacteerd, geïnformeerd over de doelstellingen van het project en er werd gepeild naar hun bereidheid om deel te nemen aan de inventarisatie. Bij een positief antwoord werd hen een vragenlijst (zie Bijlage 1) bezorgd en werd een tijdstip afgesproken voor een telefonisch interview van ongeveer één uur. De vragenlijst had betrekking op inputs en outputs van het proces, proceskenmerken, de status van de technologie-ontwikkeling, de mogelijkheid om hernieuwbare energie te gebruiken, economische aspecten en niet-technologische barrières.

In de volgende twee onderdelen van dit rapport worden de resultaten van de stakeholderbevraging weergegeven voor respectievelijk de kennisinstellingen en de bedrijven. Aanvullend werd op basis van publieke rapporten en literatuuronderzoek nagegaan welke succesvolle internationale CCU toepassingen voor Vlaanderen relevant kunnen zijn. Uit dit overzicht werden de meest beloftevolle technieken geïdentificeerd voor een meer diepgaande analyse.

### 2.1 INVENTARISATIE VAN CO<sub>2</sub>-GEBRUIKSONDERZOEK VAN KENNISINSTELLINGEN IN VLAANDEREN

Tabel 1 toont aan welke kennisinstellingen en onderzoeksgroepen actief zijn op het vlak van CCU. De vermelde contactpersonen werden geïnterviewd.

In wat volgt, wordt per onderzoeksgroep een samenvatting van het interview weergegeven. De individuele fiches weerspiegelen de meningen van de onderzoekers in kwestie en werden ter goedkeuring aan hen voorgelegd. De inschattingen komen niet noodzakelijk overeen met meer algemene evaluaties van specifieke technologieroutes in studies van bv. ADEME (2014), Hendriks et al. (2013), enz.

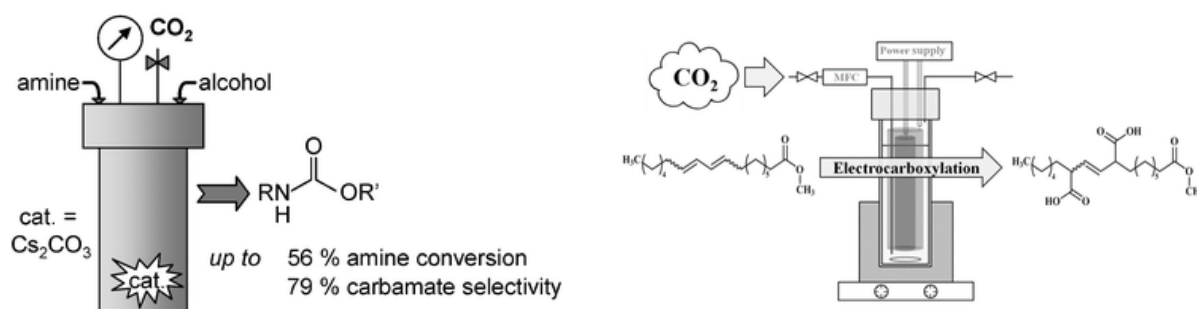


### 2.1.1 Katholieke Universiteit Leuven – Centrum voor Oppervlaktechemie en Katalyse (COK) – Katalyse (<http://www.biw.kuleuven.be/m2s/cok/Groups/prof.-dirk-de-vos>)

Het interdisciplinair onderzoek van het Centrum voor Oppervlaktechemie en Katalyse (COK) is gericht op de chemie van vast-gas, vast-vloeibaar, en vast-vast interfaces. De groep van Prof. De Vos wil in deze context nieuwe concepten ontwikkelen voor katalyse en adsorptieve scheidingen. Het onderzoek spitst zich toe op poreuze materialen en hun interactie met organische moleculen. Op het vlak van CO<sub>2</sub>-omzettingen werden tot nog toe 2 routes bekeken: thermische katalyse en elektrokatalyse.

#### 2.1.1.1 Concept

In het thermisch katalyseproces wordt CO<sub>2</sub> gebruikt voor de synthese van o.a. carbamaten en carbonaten (Figuur 3) in een reactie waarbij het koolstofatoom van CO<sub>2</sub> niet gereduceerd moet worden. Als inputs zijn alcoholen en/of amines nodig. Een katalysator faciliteert het proces, dat doorgaat bij verhoogde temperatuur (<200°C) en druk (< 10 bar).



Figuur 3: Voorstelling thermisch katalyseproces<sup>5</sup> (links) en elektrokatalyse<sup>6</sup> (rechts)

In elektrokatalyse<sup>7</sup> vindt een elektrochemische synthese van carboxylzuren plaats uit CO<sub>2</sub>. Afhankelijk van de gebruikte substraatgroep (alcoholen, ketonen, onverzadigde koolwaterstoffen, enz.) kan een breed gamma van eindproducten bekomen worden. Het proces verloopt vlotter met aromatische substraten dan met alifatische. De elektrode zelf fungeert als katalysator. De uitdaging bestaat erin elektrodes te gebruiken die niet wegreageren in het proces. Er wordt gewerkt bij kamertemperatuur en verhoogde drukken (0,5-30 bar).

Beide concepten zijn ééntrapsprocessen. Na opzuivering wordt het eindproduct bekomen.

<sup>5</sup> Ion, A., Van Doorslaer, C., Parvulescu, V., Jacobs, P., De Vos, D. 2008. Green synthesis of carbamates from CO<sub>2</sub>, amines and alcohols. Green Chemistry 10, 111-116

<sup>6</sup> <http://www.biw.kuleuven.be/m2s/cok/Groups/prof.-dirk-de-vos/ResearchAreas>

<sup>7</sup> Matthessen, R., Fransaeer, J., Binnemans, K., De Vos, D. E. 2014. Electrocatalysis: towards sustainable and efficient synthesis of valuable carboxylic acids. Beilstein Journal of Organic Chemistry 10, 2484-2500



## **2.1.2 Katholieke Universiteit Leuven – Centrum voor Oppervlaktechemie en Katalyse (COK) – Fotoelectrochemie (<http://www.kuleuven.be/wieiswie/nl/person/00008614>)**

Het interdisciplinair onderzoek van het Centrum voor Oppervlaktechemie en Katalyse (COK) is gericht op de chemie van vast-gas, vast-vloeibaar, en vast-vast interfases. De expertise van Prof. Martens situeert zich in de synthese en toepassing van gefunctionalizerende nanoporeuze materialen voor katalyse, sorptie, moleculaire scheiding en gecontroleerde vrijzetting. In het domein van CCU werkt hij rond foto-electrochemische omzettingen.

### **2.1.2.1 Concept**

Het proces kan beschouwd worden als een vorm van artificiële fotosynthese. In een foto-elektrochemische cel wordt zonne-energie gebruikt voor de conversie van CO<sub>2</sub>. Een zonnepaneel zet zonlicht om in elektrische energie. Deze wordt aangewend voor de productie van brandstoffen of chemicaliën in een elektrochemische cel. Deze bestaat uit 2 compartimenten gescheiden door een protonuitwisselend membraan. In één compartiment wordt water gesplitst in zuurstof en protonen. In het andere compartiment worden de protonen na omzetting tot waterstof gecombineerd met CO<sub>2</sub> voor de productie van methaan, methanol of mierenzuur. Er wordt gewerkt bij atmosferische druk en temperatuur.

### **2.1.2.2 Status**

De huidige activiteiten worden uitgevoerd op laboschaal. Het TRL niveau wordt ingeschat op 2-3. De tijdslijn om tot commercialisatie te komen wordt ingeschat op >10 jaar. De voornaamste technologische uitdaging is de ontwikkeling van innovatieve multimaterialen georganiseerd op nanoschaal voor praktische toepassingen.

### **2.1.2.3 Randvoorwaarden**

Tot op heden werd enkel met zuivere gasen gewerkt. Er wordt verondersteld dat een brede CO<sub>2</sub>-concentratierange geschikt is als input. Over interferentie van diverse onzuiverheden of nood aan voorzuivering of conditionering is voorlopig weinig bekend.

Cijfers over energieverbruik zijn niet beschikbaar.

### **2.1.2.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing**

Massabalansen hangen af van het eindproduct en variëren tussen 1 en 2,8 ton CO<sub>2</sub>/ton eindproduct voor respectievelijk mierenzuur en methanol. Het directe gebruik van zonne-energie zorgt voor bijkomende CO<sub>2</sub>-emissiereducties t.o.v. de huidige processen.

### **2.1.2.5 Markt en kostenaspecten**

De eindproducten zijn brandstoffen of chemicaliën. Vermits dit bulkchemicaliën zijn, situeren de totale wereldwijde marktvolumes zich minimum rond 1 Mton per product.

### **2.1.2.6 Barrières**

Er werden geen specifieke barrières vermeld, maar er werd wel aangegeven dat een evolutie in het beleidskader met bv. de introductie van een koolstofbelasting aangewezen lijkt om CCU in brede zin vlotter ingang te laten vinden.

### 2.1.3 Katholieke Universiteit Leuven – Procestechnologie voor Duurzame Systemen (<http://www.kuleuven.be/wieiswie/nl/person/00011040>)

De onderzoeksgroep Procestechnologie voor Duurzame Systemen aan het Departement Chemische Ingenieurstechnieken van Prof. Van Gerven bestudeert het permanent vastleggen van CO<sub>2</sub> in basische mineralen, voornamelijk silicaten en oxides zoals bv. calcium- of magnesiumoxide. Het eindproduct is een bouw materiaal, dat als inert materiaal kan gebruikt worden in hetzij cementgebonden toepassingen (zand, grind), hetzij niet-cementgebonden toepassingen zoals geopolymeren met alkali-geactiveerde aluminiumsilicaten (*Topic 1*).

Daarnaast focust de onderzoeksgroep zich op de synthese van geprecipiteerde en gegraneerde calcium- of magnesiumcarbonaten (PCC<sup>8</sup>, PMC<sup>9</sup>, GCC<sup>10</sup> of GMC<sup>11</sup>) (*Topic 2*). Deze hoogwaardige poeders vinden toepassing als vulstoffen of coating agentia in de polymeer-, papier- of verfindustrie, en als supplementair ingrediënt in de farmaceutische, levensmiddelen- en kunstmestindustrie (Van Gerven et al., 2010).

#### 2.1.3.1 Concept

Voor de bouwproducten (*Topic 1*) wordt vertrokken van assen van verbrandingsinstallaties of slakken afkomstig van metallurgische processen. Voor de synthese van geopolymeren (*Topic 1*) is daarnaast een alkalische activator (bv. waterglas of natriumhydroxide) vereist.

Voor de poeders (*Topic 2*) komen naast slakken of afvalstromen, ook zuivere grondstoffen zoals kalk in aanmerking als grondstof. Momenteel wordt onderzocht of de aanwezigheid van een katalysator de synthese van de poeders kan versnellen.

De productie van bouwmaterialen (*Topic 1*) verloopt gelijkaardig aan het proces beschreven bij Carbstone Innovation (Sectie 2.2.4), hoewel in de onderzoeksgroep vooral onderzoek wordt gedaan naar niet-vormgegeven bouwmaterialen (dit is grind of zandfractie). De carbonatie met CO<sub>2</sub> vindt typisch plaats bij drukken tot 20 bar en een temperatuur van 70-80°C. De reactie is exotherm en gebeurt in batch modus. Carbonatie wordt uitgevoerd in 1 stap (onmiddellijke carbonatie van het alkalisch materiaal) of in 2 stappen (uitloging van basische mineralen, en vervolgens carbonatie in de uitloogvloeistof). Door te werken met slakken bij verhoogde temperatuur (600-700°C) in plaats van afgekoeld materiaal kan mogelijk energie bespaard worden. Dit wordt op dit moment onderzocht in een industrieel project.

De synthese van poeders (*Topic 2*) is een ééntrapsproces. Door ultrasoonbehandeling wordt getracht de nucleatie en kristalgroei van deze producten te beïnvloeden. Dit resulteert in een homogene kristalstructuur en uniforme morfologie. Het proces kan zowel in batch als continu plaatsvinden.

#### 2.1.3.2 Status

Beide eindproducten worden momenteel geproduceerd op laboschaal. Voor de bouwmaterialen (*Topic 1*) wordt het proces momenteel opgeschaald van 1 kg per batch (TRL niveau 3-4) tot 50 kg per batch. De tijd tot commercialisatie voor bouwmaterialen wordt ingeschat op 5 à 10 jaar. De technologische uitdagingen zijn o.a.

---

<sup>8</sup> PCC, Precipitated Calcium Carbonate

<sup>9</sup> PMC, Precipitated Magnesium Carbonate

<sup>10</sup> GCC, Granulated Calcium Carbonate

<sup>11</sup> GMC, Granulated Magnesium Carbonate

de optimalisatie van het energieverbruik, de deeltjesgrootteverdeling en condities in functie van productkwaliteit. De minimale schaalgrootte wordt ingeschat op 50 kton/jaar. De fijne poeders (*Topic 2*) worden gesynthetiseerd tot een hoeveelheid van 100 g (TRL niveau 2-3). De synthese van poeders staat verder van commercialisatie. Het sturen van het ultrasoonproces om te komen tot een uniform product met een bepaalde deeltjesgrootte, vorm en dichtheid vormt hierbij de grootste uitdaging.

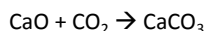
#### 2.1.3.3 Randvoorwaarden

Zowel modelgasstromen als reële afgassen van een verbrandingsinstallatie werden reeds geëvalueerd (*Topic 1*). De aanwezigheid van onzuiverheden in het afgas heeft geen negatief effect op het proces. De enige vereisten die aan de gasstroom worden gesteld, zijn een minimale CO<sub>2</sub> concentratie van 10-20% - hoewel CO<sub>2</sub> inbouw al optreedt vanaf 5% - en het verwijderen van de waterdamp (*Topic 1*). Optimale condities voor verbeterde productkwaliteit zorgen mogelijk voor minder CO<sub>2</sub> opname. De technologie is dan ook niet gericht op maximale CO<sub>2</sub> sequestratie, maar vooral op de verbetering van de kwaliteit van het product.

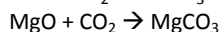
De elektriciteit nodig om de gewenste temperatuur te bereiken tijdens het proces, kan opgewekt worden uit hernieuwbare energiebronnen.

#### 2.1.3.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

Voor de bouwmaterialen (*Topic 1*) wordt 0,25 ton CO<sub>2</sub> vastgelegd per ton afvalmateriaal. Voor de synthese van de fijne poeders, wordt 0,44 en 0,52 ton CO<sub>2</sub> per ton calcium- en magnesiumcarbonaat gefixeerd volgens onderstaande reacties.



(Vergelijking 1)



(Vergelijking 2)

Cijfers voor energieverbruik zijn niet gekend.

#### 2.1.3.5 Markt en kostenaspecten

De eindproducten worden beschouwd als een duurzaam alternatief voor bestaande materialen. De calciumcarbonaatmarkt groeit snel met een geschatte *Compound Annual Growth Rate* van 5,7% van 2015 tot 2020. De wereldmarkt zal naar verwachting oplopen tot 98,7 Mton in 2020, o.a. gedreven door de sterke vraag vanuit de eindsectoren papier en kunststoffen<sup>12,13</sup>.

De markt volumes aan bouwmaterialen bedragen miljoenen tonnen per jaar.

#### 2.1.3.6 Barrières

Carbonatatie is een *quick win* voor CCU, maar krijgt nog te weinig aandacht in deze context. Het is in die zin belangrijk er de juiste nichemarkt voor te vinden. De techniek biedt naast CO<sub>2</sub> sequestratie immers een aantal bijkomende voordelen, zoals de stabilisatie en dus kwaliteitsverbetering van de afvalstromen en verminderde uitloging van zware metalen zoals Cu, Pb en Zn.

<sup>12</sup> <http://www.reportlinker.com/p03509650-summary/Global-Ground-and-Precipitated-Calcium-Carbonate-Market-Trends-Forecast-and-Opportunity-Analysis-September.html>

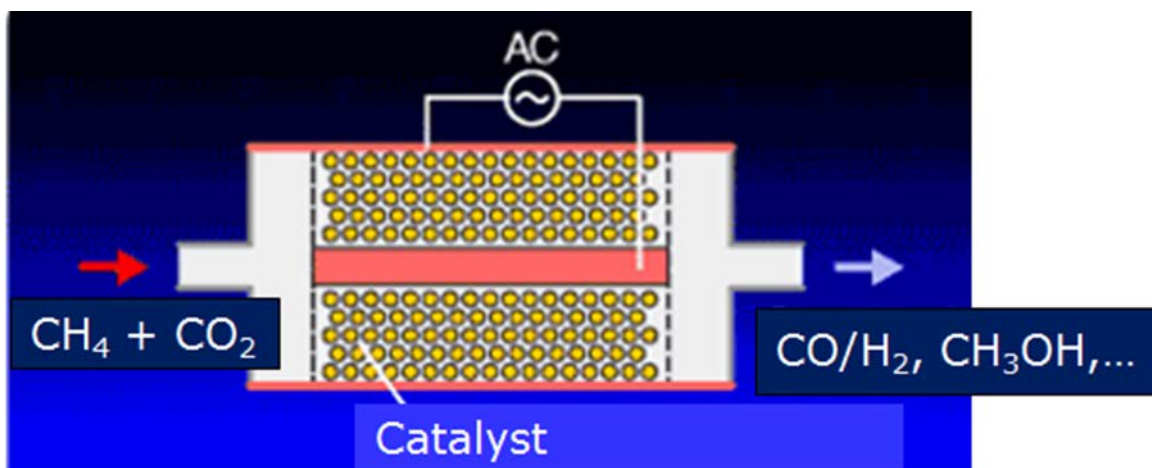
<sup>13</sup> [http://www.strategyr.com/MarketResearch/Calcium\\_Carbonate\\_Market\\_Trends.asp](http://www.strategyr.com/MarketResearch/Calcium_Carbonate_Market_Trends.asp)

**2.1.4 Universiteit Antwerpen - Onderzoeksgroep Plasma, Laser Ablatie en Oppervlakte modellering (PLASMANT - <https://www.uantwerpen.be/en/rg/plasmant/>) en Laboratorium voor Adsorptie en Katalyse (LADCA - <https://www.uantwerpen.be/en/rg/ladca/>)**

De onderzoeksgroep PLASMANT van Prof. Bogaerts aan het Departement Chemie focust zich o.m. op het modelleren en simuleren van plasma's (gasontladingen) en de interactie tussen plasma en een vaste stof oppervlak met als doel de toepassingen van plasma's in materiaaltechnologie, analytische chemie, milieu- en medische toepassingen te optimaliseren. PLASMANT werkt samen met de onderzoeksgroep LADCA (Departement Chemie) van Prof. Meynen die o.a. de structuur-activiteit correlaties bestudeert om de belangrijke eigenschappen van de pakking materialen en katalysatoren welke een invloed hebben op het plasma, de energie-efficiëntie en de gevormde producten te begrijpen om zo nieuwe katalysatoren, gefit op het plasma proces te kunnen ontwikkelen. De synergie tussen plasma en katalyse resulteert namelijk in een verhoogde energie-efficiëntie en selectiviteit.

**2.1.4.1 Concept**

Plasma, ook wel de vierde aggregatietoestand genoemd, is een geïoniseerd gas, en wordt tot stand gebracht door het inbrengen van energie (bv. warmte of elektrische energie) in een gas. Daardoor gaat het gas opsplitsen in ionen en vrije elektronen (Figuur 4). Er ontstaat ook een elektrisch veld waarin vooral de elektronen (door hun lage massa) worden versneld, en door botsingen met de gasmoleculen of -atomen nieuwe deeltjes kunnen vormen. Naast neutrale atomen en/of moleculen, bevat een plasma dus ook vrije elektronen, ionen, alsook geëxciteerde deeltjes, radicalen en fotonen. Al deze verschillende deeltjes kunnen met elkaar reageren, en nieuwe verbindingen vormen. De meeste reacties gaan door bij milde omstandigheden, dit wil zeggen atmosferedruk en min of meer kamertemperatuur. De meest gebruikte plasmabronnen voor CO<sub>2</sub> omzetting zijn de diëlektrische barrière ontlading (*dielectric barrier discharge*, DBD), een microgolfplasma en *gliding arc* plasma.



Figuur 4: Plasmakatalytische omzetting van CO<sub>2</sub> in aanwezigheid van een pakking

Plasma-omzetting van zuiver CO<sub>2</sub> is een ééntrapsproces en resulteert in splitsing tot CO en O<sub>2</sub>. Indien een waterstofbron aan het CO<sub>2</sub> gas (bv. H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> of H<sub>2</sub>O) wordt toegevoegd, kunnen daarnaast geoxygeneerde producten zoals methanol, mierenzuur, formaldehyde, en dimethylether geproduceerd worden. Vermits plasma niet-selectief is, werd tot nu toe vooral gefocust op productie van syngas, omdat dit veruit het meest gevormd wordt in het plasma (in een mengsel van CO<sub>2</sub> met een waterstofbron).

Selectiviteit in de eindproducten kan bereikt worden door het plasma te combineren met een katalysator, in plasmakatalyse. Dit is het makkelijkst te realiseren in een (gepakte bed) DBD reactor waarbij de synergetische effecten tussen plasma en katalyse bekomen worden in (preferentieel) één stap, of in twee stappen (Wang et al., 2009; Gómez-Ramírez et al., 2014).

De energie-efficiëntie van het proces kan bovendien verhoogd worden door het aanbrengen van een (diëlektrische) pakking in een DBD reactor.

#### **2.1.4.2 Status**

De testen worden uitgevoerd op laboschaal. Het gasdebiet bij DBD varieert van 25-100 mL/min, terwijl de schaalgrootte voor het *gliding arc* proces 20 L/min bedraagt. Een DBD reactor heeft echter een zeer eenvoudig en modulair design, dat zeer geschikt is voor opschaling, zoals vele jaren geleden reeds werd aangetoond voor de productie op grote schaal van ozon (Kogelschatz, 2003).

Het huidige TRL niveau voor plasmakatalyse wordt ingeschat op 3 en de tijd tot commercialisatie bedraagt > 15 jaar. Eén van de grootste uitdagingen is het verbeteren van de energie-efficiëntie en selectiviteit van plasmatechnologie en dus de noodzakelijke eigenschappen voor een katalysator werkzaam onder de plasma condities. Daarnaast is de scheiding van de producten mogelijk een uitdaging al naargelang de bekomen selectiviteit, gestuurd door de katalysator.

#### **2.1.4.3 Randvoorwaarden**

Tot op heden werkten PLASMANT en LADCA experimenteel enkel met 100% zuivere CO<sub>2</sub>. Op korte termijn wensen de onderzoeksgroepen over te schakelen op *dry reforming*, dus plasmakatalytische omzetting van CO<sub>2</sub> in aanwezigheid van CH<sub>4</sub>. Daarnaast werden simulaties van verschillende soorten plasma's uitgevoerd voor verschillende gasmengsels (CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>). De simulaties toonden aan dat de aanwezigheid van N<sub>2</sub> tot 50% de CO<sub>2</sub> conversie en energie-efficiëntie niet negatief beïnvloedde (Snoeckx et al., 2016). CO<sub>2</sub> concentraties < 50% zijn procestechnisch mogelijk maar verminderen de CO<sub>2</sub> conversie en energie-efficiëntie. Bij te hoge N<sub>2</sub> concentraties kunnen schadelijke N<sub>2</sub>O en NO<sub>x</sub> componenten gevormd worden aan een concentratie van enkele 100 ppm (Snoeckx et al., 2016). De aanwezigheid van H<sub>2</sub>O is noodzakelijk voor bepaalde omzettingen maar de inbreng ervan vraagt wat technische aanpassingen voor lage temperatuurplasma's. Verwijdering van zwavel kan mogelijk vereist zijn indien dit interfereert met de katalysatorwerking.

Voor CCU toepassingen wordt elektrische energie gebruikt om het plasma op te wekken. De koppeling met hernieuwbare energie is dus mogelijk. Bovendien kunnen de systemen vlot aan- en uitgeschakeld worden.

#### **2.1.4.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing**

Voor de productie van 1 ton koolstofmonoxide (CO), wordt 1,6 ton CO<sub>2</sub> gefixeerd volgens onderstaande reactie:



(Vergelijking 3)

De massabalansen voor plasmakatalytische processen zijn nog niet beschikbaar.  
Ook cijfers voor energieverbruik zijn nog niet gekend.

De kennis die ontwikkeld wordt voor toepassing van plasmakatalyse in CCU is generisch en kan aangewend worden om ook in andere energie-intensieve processen energie te besparen en dus indirect CO<sub>2</sub>-emissies te vermijden.

#### **2.1.4.5 Markt en kostenaspecten**

Met CO als uitgangsmolecule kunnen gasvormige en vloeibare brandstoffen gemaakt worden. Bij toevoeging van een waterstofbron en katalysator kunnen bulkchemicaliën < C<sub>6</sub> gevormd worden.

Het behalen van een hoge volumetrische productiviteit is essentieel voor een economisch proces.

#### **2.1.4.6 Barrières**

Het is momenteel nog niet duidelijk welk type katalysator aanleiding kan geven tot selectieve vorming van bepaalde producten. Er is dus nog veel onderzoek nodig, vooraleer plasma(katalyse) industrieel zal kunnen toegepast worden.

Een techno-economische studie en input uit de industrie zijn nodig om de specificaties van de chemicaliën in termen van zuiverheid en kostprijs te definiëren.

## 2.1.5 Universiteit Antwerpen – Organische synthese (<https://www.uantwerpen.be/en/rg/orsy/>)

De onderzoeksgroep Organische synthese aan het Departement Chemie van Prof. Maes focust zich op homogene katalyse (transitiemetaal-gekatalyseerde reacties) en heterocyclische chemie. De productie van chemicaliën uit hernieuwbare grondstoffen vormt één van de vijf onderzoekslijnen in dit domein. Meer bepaald bestudeert de onderzoeksgroep de katalytische omzetting van CO<sub>2</sub> naar chemicaliën zoals carbonaten en carbamaten.

### 2.1.5.1 Concept

Het concept betreft een tweetrapsproces. CO<sub>2</sub> wordt met behulp van een katalysator (niet-edelmetaal) omgezet tot geactiveerde carbonylderivaten, waarna deze met behulp van een nucleofiel reactant (zoals alcoholen of amines) omgezet worden tot de eindproducten, bv. carbonaten en carbamaten. In deze reacties wordt CO<sub>2</sub> ingebouwd zonder wijziging in oxidatietoestand. De reacties worden uitgevoerd bij verhoogde druk (<50 bar) en temperatuur (bij voorkeur <100°C). De materialen die tussenkomen in de activatiestap kunnen gerecycleerd worden.

### 2.1.5.2 Status

De testen worden uitgevoerd op laboschaal. De eindproducten worden op gram-niveau geproduceerd. Het huidige TRL niveau wordt ingeschat op 1 à 2 en de tijd tot commercialisatie op >10 jaar. Er werd een patent ingediend.

### 2.1.5.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werd enkel 100% zuivere CO<sub>2</sub> getest. Er is weinig informatie bekend over de eisen die aan de CO<sub>2</sub> input stroom worden gesteld. Er wordt *a priori* van uitgegaan dat de katalysator niet gevoelig is voor de concentratie aan CO<sub>2</sub> en dat er procestechnisch geen negatieve effecten te verwachten zijn van de aanwezigheid van onzuiverheden. Deze aspecten dienen wel verder onderzocht te worden.

Energie is nodig om de gewenste temperatuur en druk te bereiken tijdens het proces. Hier kan de link naar groene stroom gemaakt worden. Het proces kan eenvoudig aan- en afgeschakeld worden vermits het een batchproces betreft.

### 2.1.5.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die in het eindproduct geïncorporeerd wordt, is afhankelijk van de eindproducten. Deze is maximaal voor het economisch minst interessante product dimethylcarbonaat (0,49 ton CO<sub>2</sub>/ton product) en ligt veel lager voor polycarbonaten (ongeveer 0,15 ton CO<sub>2</sub>/ton) (Otto et al., 2015).

Indicaties van energieverbruik zijn nog niet beschikbaar.

### 2.1.5.5 Markt en kostenaspecten

Carbonaten (lineair of cyclisch) vinden toepassing als intermediair in de farmaceutische, agrochemische, en polymeerindustrie, of als solvent. Het totale marktvolume bedraagt 1,8 Mton/jaar waarbij polycarbonaten de hoofdmoot uitmaken (> 1,5 Mton/jaar) (Aresta, 2003).

Carbamaten worden gebruikt in de farmaceutische industrie, in de land- en tuinbouw, en in de chemische industrie, o.a. als intermediair voor polyurethaan. Marktvolumes variëren van een paar kt/jaar (fijnchemicaliën) tot een grootte orde van Mton/jaar (polymeerindustrie) (Aresta, 2003).

#### **2.1.5.6 Barrières**

Er moeten geschikte partners gevonden worden om de technologie te commercialiseren.

Bij marktintroductie van de chemicaliën, moet aan de REACH<sup>14</sup> regelgeving worden voldaan. Het is belangrijk op te merken dat bij een aantal van de huidige syntheseroutes gebruik gemaakt wordt van het toxische fosgeen. Het onderzochte alternatief vormt dus een groenere productieroute die ook voordelen biedt op het vlak van veiligheid.

---

<sup>14</sup> REACH: Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, <http://ec.europa.eu/growth/sectors/chemicals/reach/>

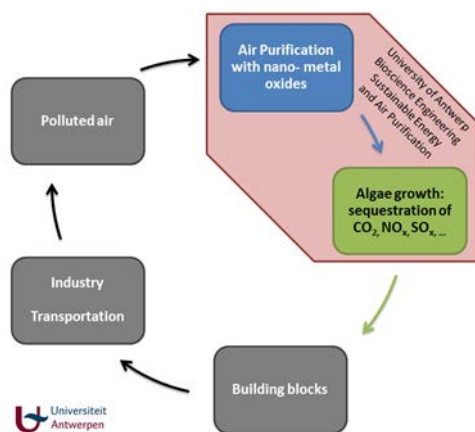
## 2.1.6 Universiteit Antwerpen – Duurzame Energie en Luchtzuivering (DuEL - <https://www.uantwerpen.be/en/rg/sustainable-energy-air-water-tech/>)

De onderzoeksgroep DuEL aan het Departement Bio-ingenieurswetenschappen van Prof. Lenaerts bestudeert o.m. het vastleggen van CO<sub>2</sub> in micro-algen door middel van fotosynthese. De onderzoeks-activiteiten focussen zich enerzijds op de opkweek van de aquatische biomassa uit gasvormige afvalstromen en anderzijds op het gebruik van diatomeeën als biotemplaat voor silica-titania fotokatalysatoren.

### 2.1.6.1 Concept

Micro-algen zijn fotosynthetische organismen en kunnen lichtenergie gebruiken om uit CO<sub>2</sub> organische stoffen te maken, die dienen als bouwstenen voor de cel. Naast licht, water en CO<sub>2</sub> zijn ook een aantal essentiële nutriënten (o.a. P en N) vereist. Diverse afvalwaters met o.m. fosfaten en nitraten en voorgezuiverde afgassen met CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> kunnen hiervoor gebruikt worden. Na raffinage van de algenbiomassa bekomt men verschillende hoogwaardige eindproducten met een brede waaier van toepassingen.

Een voorbeeld daarvan is het onderzoek rond diatomeeën of kiezelwieren. Dit zijn unicellulaire micro-algen die een hiërarchisch gestructureerd silicaskelet vormen, *frustule* genoemd. Naast de organische fractie, kan ook de biosilicastructuur gevaloriseerd worden, bv. als fotokatalysator voor luchtzuiveringstoepassingen (Van Eynde et al., 2013). Fotokatalytische luchtzuivering zet schadelijke luchtpolluenten zoals vluchtige organische stoffen om in CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O met behulp van licht. Deze CO<sub>2</sub> kan worden gebruikt om diatomeeën te cultiveren, waarbij ze een silicumskelet vormen. De geproduceerde mesoporeuze biosilica-titania materialen kunnen op hun beurt weer ingezet worden voor fotokatalytische luchtzuivering. Op deze wijze kan de strategische ambitie van de onderzoeksgroep DuEL, namelijk het creëren van *closed loop* systemen, worden gerealiseerd (Figuur 5).



Figuur 5: Algenproductie op gezuiverde afgasstromen

### 2.1.6.2 Status

Het proces wordt getest op laboschaal in een fotobioreactor met reactorvolumes op literniveau met financiering van FISCH<sup>15</sup> (TRL 4). Opschaling tot op commerciële schaal is voorzien door de industriële partner Tomalgae. Het selecteren van de diatomeeën *species* met het meeste potentieel voor biosilicastructuur-

<sup>15</sup> FISCH: Flanders Innovation Hub for Sustainable Chemistry, BIOCAPPS: Biogenic catalysts for air purification and sustainable materials

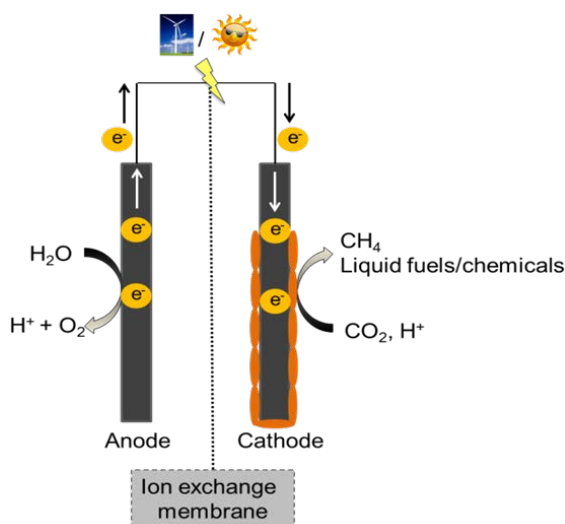


## 2.1.7 Universiteit Gent – Centrum voor Microbiële Ecologie en Technologie (CMET - <http://labmet.ugent.be/>)

CMET aan het Departement Biochemie en Microbiële Technologie is gespecialiseerd in de studie en toepassing van microbiële mengculturen en gemeenschappen. Door een optimaal beheer van deze mengculturen kunnen nieuwe producten en processen ontwikkeld worden die op een duurzame manier kunnen bijdragen aan milieu en gezondheid. Voor deze inventarisatie wordt gefocust op de activiteiten van Prof. Rabaey rond microbiële elektrokatalyse of -synthese. Daarin wordt de microbiële productie van multikoolstofcomponenten rechtstreeks of onrechtstreeks gestimuleerd met elektriciteit.

### 2.1.7.1 Concept

Microbiële elektrosynthese vormt een directe route om elektriciteit te koppelen aan bioproductie. Bacteriën kunnen extracellulair elektronen transporteren naar elektrodes. Omgekeerd kunnen elektrodes ook elektronen doneren aan micro-organismen. Figuur 6 toont hoe CO<sub>2</sub> volgens dit principe aan de kathode gereduceerd kan worden tot waardevolle producten met de tussenkomst van bacteriën.



Figuur 6: Concept van microbiële elektrosynthese ([www.electrotalk.org](http://www.electrotalk.org))

LabMET test bacteriële rein- of mengculturen voor de omzetting van CO<sub>2</sub> tot acetaat. Dit kan gekoppeld worden aan de productie van de C6-C8 vetzuren caproaat en caprylaat via ketenverlenging, of van ethylacetaat via esterificatie. Voor geladen moleculen, kan de bioproductiestap gecombineerd worden met de extractie van het product, wat resulteert in een (gedeeltelijke) opzuivering en opconcentrering. Er wordt ook gewerkt aan de reductie van CO<sub>2</sub> tot methaan om bv. biogas op te waarderen tot biomethaan.

### 2.1.7.2 Status

De testen worden uitgevoerd op laboschaal met reactorvolumes op literniveau. Testen op grotere schaal zijn nodig om configuraties te optimaliseren en een aantal *bottlenecks* te bestuderen. Het huidig TRL niveau wordt

ingeschat op 4 en de tijd tot commercialisatie voor CCU op > 5 jaar. Op welke schaal een economisch gunstig proces wordt bekomen, zal o.a. afhangen van de keuze en dus markt en toegevoegde waarde van het eindproduct.

### 2.1.7.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werd met modelgasstromen gewerkt. Weinig informatie is bekend over de eisen die aan de CO<sub>2</sub> input stroom worden gesteld, behalve dat deze geen zuurstof mag bevatten. Conditionering van het inkomende gas is niet nodig.

Het proces kan rechtstreeks gebruik maken van hernieuwbare elektriciteit. De elektrontransfer van de elektrode naar de bacteriën gebeurt rechtstreeks of onrechtstreeks via de productie van waterstof. De compatibiliteit van het proces met aan- en afschakelen moet nog onderzocht worden.

Een bijkomend voordeel is dat er aan de anode reacties optreden die ook nuttig aangewend kunnen worden, bv. voor de on-site productie van zuren of chloor. Dit vermijdt transport en geassocieerde veiligheidsmaatregelen.

#### 2.1.7.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

De hoeveelheid ingebouwde CO<sub>2</sub> hangt af van het eindproduct. Voor de productie van azijnzuur of capronzuur bv. wordt respectievelijk zo'n 1,5 en 2,3 kg CO<sub>2</sub>/kg product ingebouwd. Hoeveel extra CO<sub>2</sub> er nodig is voor vorming van biomassa, is nog niet exact geweten, maar de hoeveelheden zijn beperkt voor dit type omzettingen.

Energieverbruiken situeren zich tussen 5 en 15 kWh/kg acetaat.

#### 2.1.7.5 Markt en kostenaspecten

Carboxylaten zijn bulkchemicaliën en excellente chemische bouwstenen voor de synthese van afgeleide producten. De wereldproductie van azijnzuur bv. bedroeg 10,7 Mton in 2010 met een marktprijs van 500 à 800 euro/ton. Capronzuur heeft een hogere waarde (2.000 euro/ton) en vindt o.a. toepassing in veevoeding of als intermediair voor esters.

Voor een economisch proces is de beschikbaarheid van goedkope en robuuste membranen en elektrodes essentieel.

#### 2.1.7.6 Barrières

Door de *in-situ* extractie van de carboxylaten, wordt een stroom bekomen die aangerijkt is in het product en vrij is van biomassa. Deze is vrij zuiver maar zal nog verder opgewerkt moeten worden. In die zin is het belangrijk de minimale eisen te kennen waaraan het product moet voldoen. Dit kan medebepalend zijn voor de keuze van producten die het meest geschikt zijn voor de microbiële electrosyntheseroute.

Hieraan gekoppeld is de nood aan een beter zicht op beschikbare puntbronnen en op interesse van sectoren en bedrijven om mee te werken aan dit type onderzoek.

////////////////////////////////////

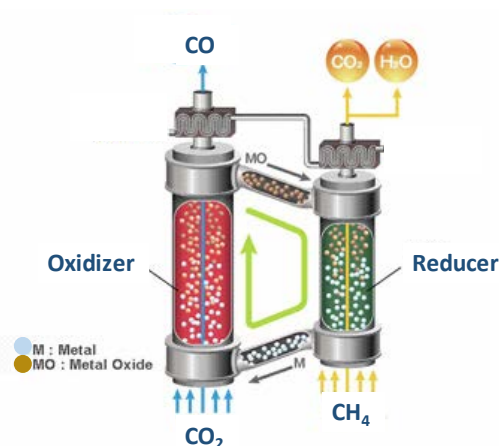
## 2.1.8 Universiteit Gent – Laboratorium voor Chemische Technologie (<http://www.lct.ugent.be/>)

Het onderzoek aan het Laboratorium voor Chemische Technologie is vooral gericht op de optimalisatie van bestaande industriële processen en de ontwikkeling, intensifiëring en opschaling van nieuwe technologieën voor het verminderen van afvalstromen en energieverbruik. Voor deze inventarisatie wordt gefocust op de activiteiten van de Professoren Marin en Saeys rond katalytische CO<sub>2</sub> conversie en *chemical looping reforming* (CLR). Waar de onderzoeksgroep een grote expertise heeft rond syngas en CO omzettingen, werden de activiteiten sinds enkele jaren uitgebreid naar CO<sub>2</sub> en gecombineerde CO/CO<sub>2</sub> conversies.

### 2.1.8.1 Concept

Bij de katalytische processen wordt gewerkt rond de omzetting van CO<sub>2</sub> in aanwezigheid van waterstof naar brandstoffen zoals methaan, methanol of langketige koolwaterstoffen. Deze omzettingen gebeuren bij temperaturen van 200-300°C en drukken > 10 bar. Een andere onderzoeksroutte betreft carboxylatie- of hydroformylatie-reacties voor de productie van bulkchemicaliën. Deze laten toe meer hoogwaardige producten te verkrijgen. In beide gevallen gaat het om ééntrapsprocessen, die eventueel met een *water-gas shift*-reactie gecombineerd kunnen worden. *Chemical looping reforming* is een proces waarbij CO<sub>2</sub> in aanwezigheid van waterstof of methaan of een ander reductans in aanwezigheid van een zuurstofdrager omgezet wordt tot bv. CO (Figuur 7). De reactie gaat door bij omgevingsdruk en bij verhoogde temperatuur. De reacties zijn de volgende:

|                                 |                                                                                     |                  |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Verbranding:                    | $\text{CH}_4 + 4 \text{ MeO} = \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} + 4 \text{ MeO}$ | (Vergelijking 4) |
| Oxidatie van de zuurstofdrager: | $4 \text{ Me} + 4 \text{ CO}_2 = 4 \text{ MeO} + 4 \text{ CO}$                      | (Vergelijking 5) |
| Netto reactie:                  | $\text{CH}_4 + 3 \text{ CO}_2 = 4 \text{ CO} + 2 \text{ H}_2\text{O}$               | (Vergelijking 6) |



Figuur 7: Concept van *chemical looping reforming* (Galvita, 2016)

### 2.1.8.2 Status

De katalytische processen worden uitgevoerd op laboschaal met enkele grammen product. Het onderzoek wordt ondersteund door *state-of-the-art* modelleringswerk zowel op moleculaire als op reactorschaal. Het

huidig TRL niveau wordt ingeschat op 3 à 4 en de tijd tot commercialisatie bedraagt 5 en > 10 jaar voor de katalytische conversie van CO<sub>2</sub> naar respectievelijk brandstoffen en chemicaliën.

Ook de CLR processen bevinden zich op gramschaal. *Chemical looping combustion* processen worden al op grotere schaal gedemonstreerd, maar voor CLR wordt verwacht dat er nog 5 tot 10 jaar nodig is tot commercialisatie. Onderzoek spitst zich o.a. toe op de combinatie van katalysatoren met de zuurstofdragers en op verbeterd reactorontwerp.

### 2.1.8.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werd enkel met modelgasstromen gewerkt. Om redenen van procesefficiëntie wordt CO<sub>2</sub> best opgeconcentreerd tot 80-90%. Er is weinig informatie beschikbaar over de invloed van onzuiverheden, maar het onderzoek is o.a. gericht op de ontwikkeling van meer robuuste katalysatoren die de aanwezigheid van bv. zwavel- en stikstofcomponenten beter tolereren.

Er wordt vanuit gegaan dat de CLR processen robuust zijn met betrekking tot de samenstelling van de afgassen omdat het in essentie om een verbranding gaat. Het belangrijkste voordeel van CLR processen is hun flexibiliteit. Door CO<sub>2</sub> reductie te scheiden van de verbrandingsstap wordt het proces erg flexibel, en kan het gebruik maken van een breed gamma van brandstoffen, zowel fossiel als hernieuwbaar, en eveneens van zeer verdunde CO<sub>2</sub> stromen (tot 10 vol%) zolang de andere componenten in de voeding de activiteit en stabiliteit van de zuurstofdrager niet negatief beïnvloeden.

Bij een aantal processen wordt gebruik gemaakt van waterstof, dat met behulp van hernieuwbare elektriciteit geproduceerd kan worden. De processen kunnen vlot aan- en afgeschakeld worden maar vanuit economisch oogpunt is een gebruikstijd van de apparatuur van minstens 50% gewenst.

#### 2.1.8.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

De hoeveelheid ingebouwde CO<sub>2</sub> hangt af van het proces en het eindproduct. Bij de katalytische omzetting tot methanol wordt 1,38 ton CO<sub>2</sub> omgezet per ton product. Voor de carboxylatie- of hydroformylatie-reacties wordt doorgaans 20-25% CO<sub>2</sub> ingebouwd in het eindproduct.

In het geval van CLR wordt ongeveer 1,6 ton CO<sub>2</sub> omgezet in 1 ton CO.

De omzetting van CO<sub>2</sub> naar methanol is exotherm. De grootste energie-input komt van waterstof (40 kWh/kg H<sub>2</sub>). Ook voor de andere processen is waterstof of een andere brandstof nodig voor de conversie van CO<sub>2</sub>.

#### 2.1.8.5 Markt en kostenaspecten

Voor de beoogde producten is de kostprijs van waterstof vaak doorslaggevend.

Bij de economische evaluatie van verschillende CCU opties is een vergelijking van de productiviteit (kg CO<sub>2</sub> omgezet per m<sup>3</sup> reactor en per dag) essentieel en op dat vlak scoren katalytische omzettingen zeer goed.

### 2.1.8.6 Barrières

De barrières voor de introductie van CO<sub>2</sub> conversietechnologie zijn niet technologisch van aard maar zijn eerder gelinkt aan beleid en de lage energieprijzen.

////////////////////////////////////

### 2.1.9 Thomas More – Campus Geel (<http://www.sunbuilt.be/>)

De onderzoeksgroep Sunbuilt is een samenwerking tussen Thomas More en VITO die de mogelijkheden van de kweek van micro-algen als alternatieve activiteit voor de (glas)tuinbouwsector. De hogeschool staat in voor het kweken van de algen. VITO optimaliseert de oogst en de technieken om waardevolle producten uit de algen te halen.

#### 2.1.9.1 Concept

CO<sub>2</sub> wordt vastgelegd in micro-algen via fotosynthese zoals eerder beschreven in Sectie 2.1.6.1. De eindproducten kunnen de algen zijn, maar ook waardevolle extractieproducten.

#### 2.1.9.2 Status

De micro-algen worden gecultiveerd op pilotschaal van 300 m<sup>2</sup> (TRL 5-6). Het tijdspad voor commercialisatie wordt geschat <3 jaar. Verdere optimalisatie van de kweek alsook het energetisch gunstig verwerken van de algenbiomassa zijn de belangrijkste technologische uitdagingen.

#### 2.1.9.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werd enkel getest met synthetische gassen. Er wordt verondersteld dat CO<sub>2</sub> gebruikt in een tuinbouwbedrijf voor de bemesting van planten, ook in aanmerking komt voor de kweek van algen. Indien andere rookgassen gebruikt worden, zijn reductiemaatregelen voor SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> en stof vereist zijn (Sectie 2.1.6.3). Ook is de verwijdering van ethyleen, een verouderingshormoon van planten, noodzakelijk. Daarnaast mag niet teveel O<sub>2</sub> aanwezig zijn.

Warmte en elektriciteit kunnen tegelijkertijd opgewekt worden met een Warmtekrachtkoppeling (WKK) installatie. Tijdens de cultivatie van de algen kan het proces niet af- en opgezet worden.

#### 2.1.9.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

Maximaal kan 1,83 ton CO<sub>2</sub> per ton droge biomassa omgezet worden (Sectie 2.1.6.4).

#### 2.1.9.5 Markt en kostenaspecten

De eindproducten zijn vooral bedoeld voor de chemische, voeding en veevoeding sector. Voorbeelden van hoogwaardige producten zijn lipiden, eiwitten, vitamines, antioxidanten, enzymen, mono-, oligo- en polysacchariden, binders (alginaten), pigmenten, organisch gebonden sporenelementen, plantenhormonen en natuurlijke toxines.

#### 2.1.9.6 Barrières

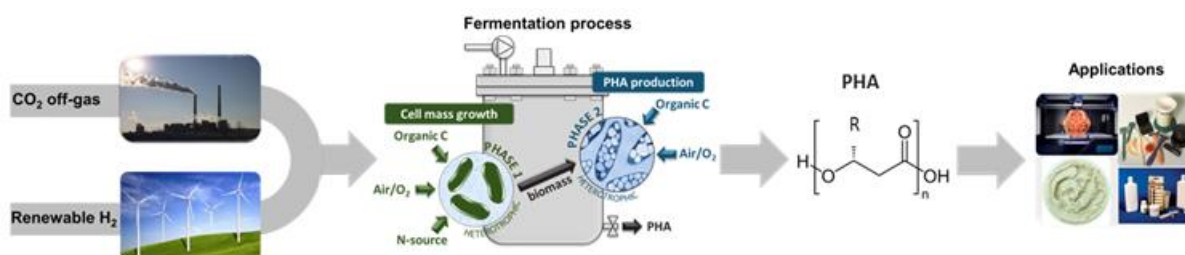
Het op de markt brengen van eindproducten uit afgassen voor toepassing in de voeding en veevoeding en het sensibiliseren van tuinbouwers en bedrijven voor product- en procesinnovatie vormen de belangrijkste barrières. Ook is er nood aan praktijkgerichte cases waarbij het potentieel van deze technologie kan aangetoond worden in reële omstandigheden.

### 2.1.10 VITO – Duurzame chemie (<https://vito.be/nl/chemie>)

De Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) is een onafhankelijke onderzoeksorganisatie op het gebied van cleantech en duurzame ontwikkeling. In het expertisedomein Duurzame Chemie stelt VITO zich op als partner van de chemische industrie in de zoektocht naar verdere verduurzaming. Hierbij gaat de aandacht o.a. uit naar het opzetten van nieuwe waardeketens voor alternatieve grondstoffen, zoals CO<sub>2</sub>. Binnen de *Business Unit* Scheidings- en Conversietechnologie worden innovatieve biotechnologische processen ontwikkeld en geoptimaliseerd voor de valorisatie van CO<sub>2</sub>. Een eerste focusgebied is gasfermentatie voor de omzetting van CO<sub>2</sub> in bv. biopolymeren (*Topic 1*). Daarnaast onderzoekt VITO ook de bio-elektrochemische conversie van CO<sub>2</sub> naar organische moleculen via micro-organismen en redox-actieve enzymen (*Topic 2*).

#### 2.1.10.1 Concept

De productie van biopolymeren uit CO<sub>2</sub> met chemo-autotrofe micro-organismen (*Topic 1*) is een tweetrapsproces (Figuur 8). In de eerste fase wordt biomassa geproduceerd. De tweede fase omvat de productie van de biopolymeren (polyhydroxalkanoaten, PHA) onder nutriënt limiterende condities. De productie van PHA uit CO<sub>2</sub> vindt plaats in aanwezigheid van zuurstof en waterstof. Voorzorgsmaatregelen zijn nodig om veilig met dit potentieel explosieve gasmengsel te kunnen werken.



Figuur 8: PHA productie vanuit CO<sub>2</sub> en hernieuwbare energie

De bio-elektrochemische conversie van CO<sub>2</sub> is een ééntrapsproces (*Topic 2*). In dit geval zetten biokatalysatoren, in aanwezigheid van elektrische stroom, CO<sub>2</sub> om in nuttige chemische producten. VITO ontwikkelt specifieke gasdiffusie-elektroden die in dit proces worden gebruikt. Deze zijn gepatenteerd en worden vermarkt onder de namen VITO CoRE<sup>TM</sup> en VITO CaSE<sup>TM</sup>. Zowel bacteriën als enzymen kunnen de reactie aandrijven. De eindproducten zijn bulkchemicaliën zoals azijnzuur en mierenzuur.

#### 2.1.10.2 Status

De productie van biopolymeren via gasfermentatie (*Topic 1*) wordt uitgevoerd op laboschaal met reactorvolumes op 7 literniveau (TRL 4-5). In het kader van het MIP-project CO<sub>2</sub>MPASS<sup>16</sup>, wil VITO de komende jaren enerzijds de eigenschappen van PHA uit CO<sub>2</sub> aanpassen in functie van verschillende hoogwaardige toepassingen (o.a. 3D printing) en anderzijds enzymatische processen bestuderen voor CO<sub>2</sub>-conversie naar monomeren. De tijd tot commercialisatie voor gasfermentaties bedraagt 5 jaar. De belangrijkste

<sup>16</sup> MIP: Milieu- en energietechnologie Innovatie Platform, CO<sub>2</sub>MPASS: CO<sub>2</sub>-based Monomers and Polymers for Advances in Science and Society

technologische uitdagingen liggen in het verbeteren van de massatransfer van de gassen, reactor design en de productie van andere hoogwaardige eindproducten via genetisch gemodificeerde stammen.

De bio-electrochemische testen (*Topic 2*) worden uitgevoerd op laboschaal met reactorvolumes op 2 liter niveau. Testen op grotere schaal zijn nodig om configuraties te optimaliseren. Daarnaast dient de stabiliteit van de biofilm en het continu proces bestudeerd te worden. Het huidige TRL niveau wordt ingeschat op 3 en de tijd tot commercialisatie voor CCU op >10 jaar.

#### **2.1.10.3 Randvoorwaarden**

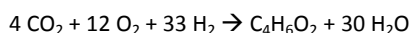
Zowel synthetische gasmengsels als een reëel CO<sub>2</sub>-rijk afgas uit de industrie werden geëvalueerd voor de productie van biopolymeren (*Topic 1*). De aanwezigheid van onzuiverheden in het geteste afgas had geen negatief effect op het proces. Voor andere afgassen, moet dit verder geëvalueerd worden. De minimum vereiste CO<sub>2</sub> concentratie in het gasmengsel is vermoedelijk > 40%. Voor bepaalde stammen treedt celinhibitie op bij een CO concentratie > 5 % (Tanaka et al., 2011).

In het onderzoek naar de bio-elektrochemische conversie van CO<sub>2</sub> (*Topic 2*) werd tot op heden met modelgasstromen gewerkt. De CO<sub>2</sub> concentratie in het gasmengsel is best > 50%. Het is voorlopig onduidelijk of zwavelhoudende componenten en andere onzuiverheden het proces verstoren. Hiervoor zijn extra testen vereist.

In beide processen kan hernieuwbare energie ingezet worden als energiebron. In de productie van PHA (*Topic 1*) kan hernieuwbare energie indirect worden gebruikt voor de elektrolyse van water in H<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>. Beide gassen zijn nodig in dit proces. Een bio-elektrochemisch proces kan daarentegen rechtstreeks gebruik maken van hernieuwbare elektriciteit (Sectie 2.1.7.1). De compatibiliteit van beide processen met aan- en afschakelen moet nog onderzocht worden.

#### **2.1.10.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing**

Voor de synthese van biopolymeren (*Topic 1*) wordt 2,05 ton CO<sub>2</sub> vastgelegd per ton PHA volgens onderstaande reactie. Het energieverbruik voor de electrolysestap bedraagt 41 kWh/kg PHA.



(Vergelijking 7)

De hoeveelheid ingebouwde CO<sub>2</sub> in een bio-electrochemisch systeem (*Topic 2*) hangt af van het eindproduct. Voor de productie van mierenzuur en azijnzuur bv. wordt respectievelijk 1,9 en 1,5 kg CO<sub>2</sub>/kg product ingebouwd. Het energieverbruik voor mierenzuur en azijnzuur bedraagt 1,6 en 4 kWh/kg product respectievelijk.

#### **2.1.10.5 Markt en kostenaspecten**

Mogelijke toepassingen van PHA (*Topic 1*) zijn gezien de eigenschappen van het materiaal legio. De wereldproductie van PHA bedroeg 31 kton in 2012 met een marktprijs van 4 à 12 keuro/ton (European Bioplastics<sup>17</sup>). De markt is momenteel klein maar er wordt verwacht dat de productie van PHA met een factor

---

<sup>17</sup> <http://www.european-bioplastics.org/>

10 zal toenemen tegen 2020<sup>18</sup>. Er wordt volop gezocht naar goedkopere grondstoffen (in plaats van suikers) om PHA productie meer competitief te maken met deze van fossiele plastics.

De markt voor de beoogde basischemicaliën (*Topic 2*) kan oplopen tot Mton schaal. Het marktvolume is het grootst voor azijnzuur en bedroeg 13 Mton in 2014 (APIC, 2015). Azijnzuur wordt gebruikt als grondstof voor vinylacetaat (5,8 Mton), tereftaalzuur (2,6 Mton) en ethylacetaat (1,7 Mton) (APIC, 2015). Mierenzuur vindt toepassing in de textielververij, de leerlooierij en wordt ook gebruikt als conserveringsmiddel. De marktprijs bedraagt 515 euro/ton mierenzuur en 650 euro/ton azijnzuur.

#### **2.1.10.6 Barrières**

Het gebruik van PHA voor medische en farmaceutische toepassingen is onderworpen aan een complexe wet- en regelgeving.

---

<sup>18</sup> <http://bio-based.eu/markets/>

### 2.1.11 Bio Base Europe Pilot Plant (<http://www.bbeu.org/>)

De Bio Base Europe Pilot Plant (BBEPP) is een open innovatiecentrum in de Gentse haven voor de ontwikkeling van biogebaseerde producten en processen. Een van de focusgebieden is gasfermentatie voor de omzetting van CO<sub>2</sub> in chemicaliën. In dit verband voert BBEPP in samenwerking met ArcelorMittal en in het kader van het VALORCO project<sup>19</sup> onderzoek uit naar de biotechnologische valorisatie van CO<sub>2</sub> uit afgassen van de staalindustrie.

#### 2.1.11.1 Concept

Het onderzoek in BBEPP gebruikt *Clostridia* spp. om CO<sub>2</sub> te reduceren via de Wood-Ljungdahl weg. De reducerende equivalenten zijn afkomstig van H<sub>2</sub>. De eindproducten zijn biomassa en azijnzuur.

#### 2.1.11.2 Status

De testen worden uitgevoerd op laboschaal met reactorvolumes op 10 liter niveau. Het huidige TRL niveau wordt ingeschat op 4-5 en de tijd tot commercialisatie voor gasfermentaties op 5 jaar. De belangrijkste technologische uitdagingen liggen in het verhogen van de eindconcentratie van azijnzuur, reactor design en de productie van meer hoogwaardige afgeleiden en eindproducten via genetisch gemodificeerde stammen.

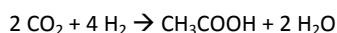
#### 2.1.11.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werd met modelgasstromen gewerkt. De CO<sub>2</sub> concentratie in het gasmengsel is best > 40%. Het fermentatieproces wordt uitgevoerd bij drukken tot 5 bar aangezien dit resulteert in een verhoogde oplosbaarheid van de gassen in de vloeistoffase. Het is voorlopig onduidelijk of parameters zoals SO<sub>x</sub> en H<sub>2</sub>S, HCN, stof en BTX het proces verstoren. Hiervoor zijn extra testen vereist.

De eigenlijke energiebron in het proces is waterstof. Deze kan gegenereerd worden via elektrolyse van water met behulp van hernieuwbare energie. Daarnaast komen ook minder zuivere H<sub>2</sub> stromen in aanmerking. De compatibiliteit van het proces met aan- en afschakelen moet nog onderzocht worden.

#### 2.1.11.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

Voor de productie van 1 ton azijnzuur (CH<sub>3</sub>COOH), wordt 1,47 ton CO<sub>2</sub> gefixeerd volgens onderstaande reactie.



(Vergelijking 8)

De cijfers voor energieverbruik zijn nog niet gekend.

#### 2.1.11.5 Markt en kostenaspecten

De kostprijs van azijnzuur bedraagt 650 euro/ton. Het marktvolume in 2014 bedroeg 13 Mton (APIC, 2015).

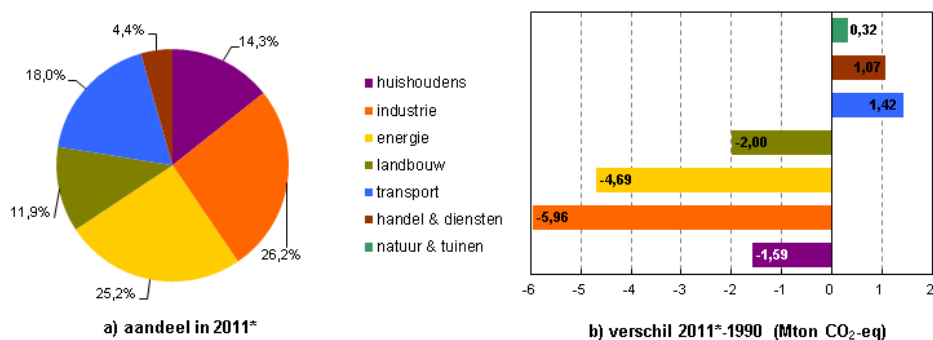
#### 2.1.11.6 Barrières

CO<sub>2</sub>-fixatie via autotrofe organismen resulteert in een beperkte waaier aan eerder laagwaardige eindproducten zoals azijnzuur, en is hierdoor commercieel niet levensvatbaar. Productie van meer hoogwaardige producten is enkel mogelijk mits het genetisch modificeren van micro-organismen. Dit zou de intrede van gasfermentatie in de markt kunnen versnellen.

<sup>19</sup> [http://www.progepi.fr/13P/\\_media/4-s.-bertucci-20150323-presentation-projet-valorco-ensic-26mar15-fr-vf.pdf](http://www.progepi.fr/13P/_media/4-s.-bertucci-20150323-presentation-projet-valorco-ensic-26mar15-fr-vf.pdf)

## 2.2 BESCHRIJVING VAN TOEGEPASTE/GEPLANDE CCU-TECHNIEKEN IN DE INDUSTRIËLE SECTOR IN VLAANDEREN EN IDENTIFICATIE VAN DE MEEST BELOFTEVOLLE TECHNIEKEN

Industriële productie speelt een belangrijke rol in de Vlaamse economie. Dit betekent echter ook dat Vlaanderen met een hoge industriële CO<sub>2</sub>-uitstoot kampt. Hoewel de industrie en de energiesector samen verantwoordelijk zijn voor ruim de helft van de broeikasgasemissies, zijn ze de koplopers voor wat betreft het terugdringen van broeikasgasemissies tot beneden het niveau van 1990 (Figuur 9). De dalingen zijn gedeeltelijk toe te schrijven aan de crisis die de economische activiteit doet dalen, maar ze tonen wel aan dat er werk wordt gemaakt van energie-efficiëntie en de omschakeling naar alternatieve grond- en brandstoffen (Laenen et al., 2013).



\* voorlopige cijfers  
Bij berekening van de aandelen werden  
emissies en sinks in natuur & tuinen niet beschouwd.

Figuur 9: Broeikasgasemissies in Vlaanderen per sector (bron: MIRA op basis van Eil (VMM, 2012)<sup>20</sup>)

Tabel 2 geeft de bedrijven weer die relevante activiteiten ontplooiën voor de inventarisatie van CCU technieken. In wat volgt, wordt per case een samenvatting van het interview gegeven. De fiches werden ter goedkeuring aan de geïnterviewde personen voorgelegd.

<sup>20</sup> <http://www.milieurapport.be/nl/publicaties/mira-indicatorrapport-2012/>

Tabel 2: Overzicht van voornaamste CO<sub>2</sub>-gebruiksonderzoeken bij Vlaamse industrie

| Industrie                        | Proces                                                                                     | Contactpersoon                |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>CO<sub>2</sub>-emitterend</b> |                                                                                            |                               |
| <b>ArcelorMittal</b>             | Omzetting CO/CO <sub>2</sub> naar ethanol                                                  | Dhr. De Coninck               |
| <b>Havenbedrijf Antwerpen</b>    | Omzetting CO <sub>2</sub> naar methanol                                                    | Dhr. Van Osselaer             |
| <b>Technologie-ontwikkeland</b>  |                                                                                            |                               |
| <b>Avecom</b>                    | Omzetting CO <sub>2</sub> naar <i>single cell proteins</i>                                 | Prof. Verstraete              |
| <b>Carbstone Innovation</b>      | Carbonatatie                                                                               | Dhr. Van Mechelen             |
| <b>Organic Waste Systems</b>     | Omzetting CO <sub>2</sub> naar methaan                                                     | Dhr. Daelman                  |
| <b>Proviron</b>                  | Omzetting CO <sub>2</sub> naar algen                                                       | Dhr. De Baerdemaeker          |
| <b>Tomalgae</b>                  | Omzetting CO <sub>2</sub> naar waardevolle producten (o.a.)<br>fotokatalysatoren uit algen | Dhr. Vanderriet <sup>21</sup> |

<sup>21</sup> Binnen het tijdsbestek van de bevragsstap, kon enkel Tomalgae geen tijd vrijmaken voor een interview.

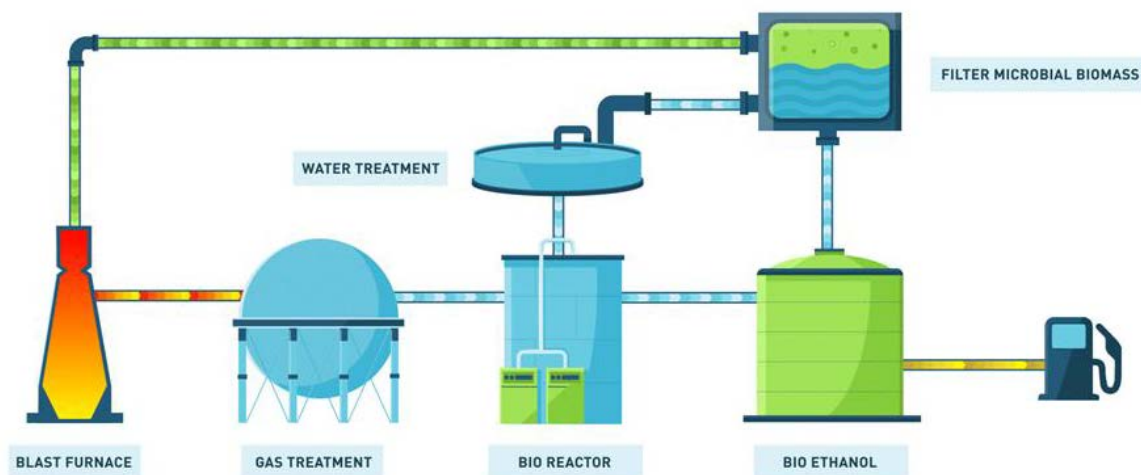
### 2.2.1 ArcelorMittal

ArcelorMittal Gent is een van de meest geïntegreerde staalbedrijven in Europa. Het zet ruwe grondstoffen – vooral ijzererts en kolen - om in staalproducten met een hoge toegevoegde waarde. Het is een zeer energie-efficiënt staalbedrijf en kon de voorbij 20 jaar het energieverbruik met 30% verminderen. Toch blijft het een van de grootste puntbronnen voor CO<sub>2</sub>-uitstoot in Vlaanderen.

Arcelor evalueert dan ook verschillende routes om de uitstoot te reduceren. Eén daarvan is het STEELANOL project<sup>22</sup>. Dat heeft als doel koolstofrijke industriële afgassen via een fermentatieproces om te zetten in bioethanol. De technologie die hiervoor zal gebruikt worden, is ontwikkeld door LanzaTech. Ze laat toe om een groot deel van de koolstof - dat anders als CO<sub>2</sub> in de atmosfeer terecht zou komen - te capteren en te hergebruiken. Een grote fractie van de koolstof die bij staalproductie wordt ingezet, verlaat het proces namelijk onder de vorm van koolstofmonoxide (CO). Dit wordt normaal verbrand tot CO<sub>2</sub> en geëmitteerd in de elektriciteitscentrale van Knippegroen. Met de LanzaTech technologie wordt het CO gerecycleerd en omgezet in ethanol.

#### 2.2.1.1 Concept

De gepatenteerde *Clostridium* bacteriën van LanzaTech zetten CO om in ethanol, al of niet in combinatie met waterstof. Beide gasen komen voor in de uitstoot van hoogovens. Na een voorbehandelingsstap inclusief compressie, wordt het gas in *gas lift* fermentoren omgezet in ethanol. Na opzuivering kan de ethanol gebruikt worden als biobrandstof of verder omgezet worden in andere chemicaliën (zie Figuur 10).



Figuur 10: Steelanol aanpak ([www.steelanol.eu](http://www.steelanol.eu))

<sup>22</sup> <http://www.steelanol.eu/en>

### 2.2.1.2 Status

De technologie is gedemonstreerd tot op een schaal van 400 ton ethanolproductie per jaar bij het Chinese Baosteel en Capital Steel. Het TRL niveau wordt geschat op 7 à 8. De verdere opschaling bij Arcelor zal gefaseerd gebeuren: eerst tot een jaarproductie van 16.000 ton tegen 2017 en dan tot 47.000 ton tegen 2018 (Holmgren, 2013). Belangrijke technologische uitdagingen zijn gelinkt aan de grootte van de opschalingsstap en de robuustheid onder industriële omstandigheden. De huidige inschatting is dat er nog 3 jaar nodig is tot commercialisatie. Als het volle potentieel in Europa wordt bereikt, zou met deze aanpak tot 500 kton ethanol geproduceerd kunnen worden per jaar.

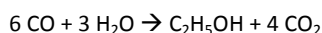
### 2.2.1.3 Randvoorwaarden

De technologie werd al getest op industriële afgassen, vooral uit de staalindustrie, maar komt ook in aanmerking voor andere gasstromen die CO, CO/H<sub>2</sub> of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> bevatten. De gehalten aan CO en H<sub>2</sub> zijn best zo hoog mogelijk. Een brede range van CO/H<sub>2</sub> verhoudingen kan in het proces gebruikt worden. Storende parameters zijn zwavelhoudende componenten zoals SO<sub>x</sub> en H<sub>2</sub>S, HCN, stof en BTX. Deze zullen dus via een juiste voorbehandeling verwijderd moeten worden.

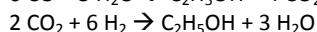
Cijfers over energieverbruik zijn niet beschikbaar. In een algemene presentatie van LanzaTech wordt enkel melding gemaakt van een energievraag die overeenkomt met 0,75 ton CO<sub>2</sub>-emissies per ton ethanol (Holmgren, 2013). Een belangrijke factor is de destillatie van ethanol uit een waterig milieu. Hierbij dient opgemerkt dat de staalindustrie over veel (gratis) afvalwarmte beschikt, die hier eventueel gebruikt kan worden. Hernieuwbare energie kan enkel ingezet worden voor gascompressie (tot 7 bar) of indien (extra) waterstof geproduceerd moet worden. Aan- of afschakelen in functie van een surplus aan hernieuwbare energie is hier dus minder relevant.

### 2.2.1.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

In dit proces wordt vooral CO omgezet en in mindere mate CO<sub>2</sub>. De conversies die plaatsvinden, zijn de volgende:



(Vergelijking 9)



(Vergelijking 10)

Bij relatief lage H<sub>2</sub> concentraties in de afgassen, zal vooral de eerste reactie doorgaan.

Dit betekent dus dat ongeveer 3,6 ton CO omgezet wordt naar 1 ton ethanol. Daarbij wordt ook bijna 3,8 ton CO<sub>2</sub> vrijgezet. Aangezien CO normaal verbrand wordt tot CO<sub>2</sub>, moet men ook rekening houden met 5,7 ton vermeden CO<sub>2</sub>. Netto komt dit neer op ongeveer 1,9 ton minder CO<sub>2</sub>-emissies. Dit komt overeen met algemene info van LanzaTech (Holmgren, 2013).

De Steelanol website vermeldt dat per ton geproduceerde bioethanol 2,3 ton CO<sub>2</sub>-emissies door Arcelor worden vermeden<sup>22</sup>. Bovendien vervangt elke ton bioethanol 620 L fossiele brandstoffen. Onder bepaalde aannames toonde een LCA uitgevoerd door E4tech een 77% reductie in broeikasgasemissies aan t.o.v. fossiele brandstoffen (Smith, 2014).

Een bijkomend voordeel is dat het gebruik van ethanol of andere niet-fossiele brandstoffen leidt tot een vermindering van andere emissies, zoals SO<sub>x</sub>.

#### **2.2.1.5 Markt en kostenaspecten**

De ethanolmarkt bedraagt > 50 Mton/jaar wereldwijd. De kostprijs van het voorbehandelde gas zou best <35 euro/ton CO<sub>2</sub> liggen. Afhankelijk van de vereiste voorbehandeling en de beschikbaarheid van gratis afvalenergie is dit soms moeilijk haalbaar. Zonder premium voor “groene” ethanol *versus* het fossiele alternatief is het proces niet rendabel.

#### **2.2.1.6 Barrières**

Staalgassen zijn geen intentioneel product bij de staalproductie. Het zijn eerder bijproducten waarmee men niets anders kan aanvangen dan ze te verbranden. In die zin kunnen ze als afval beschouwd worden. Verder zorgt het LanzaTech proces voor een biochemische omzetting van een fractie van deze gassen in ethanol. Het is voorlopig niet duidelijk of de resulterende ethanol als biobrandstof erkend kan worden volgens de *Renewable Energy Directive* (RED). De discussies met de bevoegde Europese instanties lopen.

Om nieuwe technologieën sneller ingang te doen vinden, kan de overheid een stimulerende rol spelen in het financieren van onderzoeks- en demonstratieprojecten. Daarnaast vergen opschaling en realisatie grote investeringen. Zowel de overheid als financiële instellingen hebben hier hun rol te spelen om hiervoor het juiste investeringsklimaat te creëren.

## 2.2.2 Havenbedrijf Antwerpen

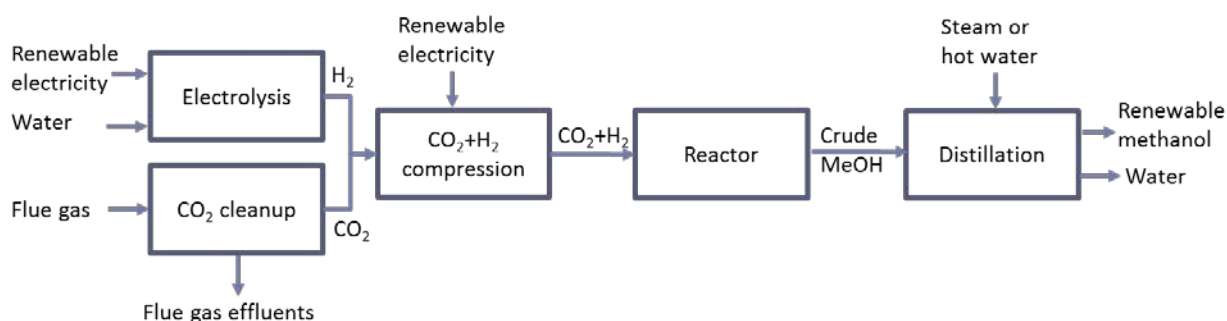
Het aandeel groene stroom in de totale elektriciteitsproductie neemt gestaag toe, maar de wisselende beschikbaarheid van zon en wind zorgt voor fluctuaties in het elektriciteitsnet. Als een overaanbod van duurzame elektriciteit op windrijke en/of zonnige dagen samenvalt met een geringe vraag, kan de prijs zeer laag zijn. Op die momenten is het voor de procesindustrie interessant om de overtollige stroom op te slaan in chemische producten. Deze *Power-to-liquids* aanpak zou een bijdrage kunnen leveren aan netstabiliteit maar veronderstelt een flexibilisering van de elektriciteitsvraag bij de procesindustrie in functie van de prijs en/of het aanbod.

In zijn ambitie om van Antwerpen een energiehaven te maken, bekijkt het Antwerps Havenbedrijf het potentieel van een aantal *Power-to-liquid* routes. Hier is het uitgangspunt niet enkel een betere afstemming tussen stroomaanbod en -vraag. Bedoeling is in eerste instantie om invulling te geven aan de nood aan zogenaamde geavanceerde biobrandstoffen<sup>23</sup>. Op langere termijn is het doel ook minder importafhankelijk te worden door voor een *feedstock* molecule kiezen dat in grote hoeveelheden in de Haven van Antwerpen verbruikt wordt maar er niet geproduceerd wordt. Na een grondige voorstudie, werd geopteerd voor *Power-to-methanol*. In het gekozen proces wordt methanol gemaakt uit CO<sub>2</sub> met behulp van hernieuwbare energie. Plannen voor een eerste demonstratie op 6 MW schaal met industriële CO<sub>2</sub> zijn in voorbereiding.

### 2.2.2.1 Concept

Het IJslandse bedrijf CRI (Carbon Recycling International) maakt methanol met input van CO<sub>2</sub> en waterstof. CO<sub>2</sub> is afkomstig van puntbronnen. Waterstof wordt gegenereerd door elektrolyse van water met hernieuwbare elektriciteit. Na compressie van de gassen tot ongeveer 50 bar en 225°C, vindt de katalytische omzetting plaats naar methanol (zie Figuur 11). De hernieuwbare methanol wordt vermarkt onder de naam Vulcanol. Deze kan gebruikt worden als brandstof of als chemische bouwsteen. Het enige bijproduct is zuurstof, deels afkomstig van de elektrolysestap.

Het Antwerps Havenbedrijf focus in eerste instantie op het gebruik van CO<sub>2</sub> uit industriële processen, en pas in tweede orde op rookgassen. Zoals aangegeven in Figuur 11, bestaat de energie input uit elektriciteit, stoom of warm water.



Figuur 11: Principe van methanolproductie uit CO<sub>2</sub> en hernieuwbare energie (Van Osselaer, 2016; Stefansson, 2015)

<sup>23</sup> Advanced Biofuels, i.c. hernieuwbare vloeibare en gasvormige transportbrandstoffen van niet-biologische origine, ILUC-amendement RED 2009/28 en FQD 2009/30

#### 2.2.2.2 Status

CRI heeft in 2012 een eerste industriële plant in gebruik genomen (*George Olah Renewable Methanol Plant*) met een jaarproductie van 4.000 ton methanol (TRL niveau 8). Daarbij wordt 5.500 ton CO<sub>2</sub> per jaar verbruikt, afkomstig van gasemissies van een geothermische energiecentrale. Bedoeling is operationele ervaring op te doen en het kostenplaatje te verbeteren voor verdere opschaling<sup>24</sup>. Er zouden plannen zijn voor uitrol tot een basiseenheid van 50 kton product/jaar.

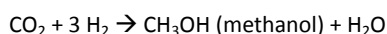
#### 2.2.2.3 Randvoorwaarden

Er is weinig informatie bekend over de eisen die aan de CO<sub>2</sub> input stroom worden gesteld. Stefansson (2015) vermeldt rookgassen met >15% CO<sub>2</sub>. Verwijdering van zwavel is minstens vereist (zie ook Figuur 11). In de Haven van Antwerpen wordt gedacht aan een eerste demonstratie met gebruik van zuivere CO<sub>2</sub>-stromen in hoeveelheden van 6 kton CO<sub>2</sub>/jaar.

Het basisconcept is een *Power-to-product* schema, wat impliceert dat het proces eenvoudig aan- en afgeschakeld kan worden in functie van het aanbod en de prijs van hernieuwbare energie.

#### 2.2.2.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

De basisreactie is de volgende:



(Vergelijking 11)

Dit betekent dat 1,38 ton CO<sub>2</sub> nodig is per ton methanol. Daarbij komen nog de vermeden emissies die gekoppeld zijn aan de huidige methanolproductieprocessen.

Cijfers voor energieverbruik variëren. Als waterstof geproduceerd wordt via elektrolyse, zou er 9,5 MWh elektrische energie/ton methanol nodig zijn met een energetische efficiëntie van 60% (Stefansson, 2015).

De reductie in koolstofemissies voor de hele levenscyclus van extractie en productie tot eindgebruik zou 90% lager zijn dan voor fossiele brandstoffen bij toepassing van het CRI proces in een geothermie-context<sup>24</sup> (Stefansson, 2015).

#### 2.2.2.5 Markt en kostenaspecten

Momenteel wordt 300 kton fossiele methanol ingevoerd en verwerkt in de Haven van Antwerpen. De wereldmarkt bedraagt zo'n 70 Mton en de vraag stijgt. In 2015 werd 1/3 van de wereldmarkt gebruikt voor energie- en brandstofdoeleinden (Dekker, 2016).

De prijs van "grijze" methanol is zeer volatiel. Het Antwerps Havenbedrijf gaat er momenteel van uit dat een prijspremium voor "groene" methanol nodig is voor een rendabel proces. Er wordt momenteel uitgegaan van een methanolprijs van 600 euro/ton, een aanname die gebaseerd is op het thans voor bioethanol geboden premium.

---

<sup>24</sup> <http://www.carbonrecycling.is/>

De focus ligt in eerste instantie op het gebruik als hernieuwbare brandstof, omdat daar een door de EU opgelegde vraagmarkt voor bestaat. De methanol wordt erkend als hernieuwbare brandstof volgens de RED van de Europese Unie<sup>24</sup>, omdat hernieuwbare energie wordt gebruikt in het productieproces. Weliswaar dient de Belgische wetgeving nog te worden aangepast op dit vlak want geavanceerde biobrandstoffen zijn er momenteel nog niet in gekend.

Het is juridisch echter onmogelijk om aan te tonen dat 100% groene energie zal gebruikt worden. Enkel wanneer men de hernieuwbare energie netonafhankelijk produceert en inzet voor elektrolyse, kan momenteel worden bewezen dat voor 100% met hernieuwbare elektriciteit wordt gewerkt.

#### **2.2.2.6 Barrières**

Demonstratieprojecten vragen een grote investering. In het licht van de huidige lage CO<sub>2</sub> prijzen, zijn subsidies of andere stimuli nodig om tot een succesvolle demonstratie te komen, zowel voor het *Power-to-methanol* luik als het later te integreren CCU-luik.

### 2.2.3 Avecom

Er wordt verwacht dat de vraag naar hoogwaardige proteïnen in het komende decennium sterk zal toenemen. In de conventionele voedingsketen gaat het veelal om dierlijke proteïnen, waarvan de productie gepaard gaat met een hoog waterverbruik en sterke uitstoot van broeikasgassen. Bovendien is de aanmaak van de benodigde meststoffen uit ammoniak zeer energie-intensief.

Huishoudelijk afvalwater bevat ammoniumstikstof. Om aan de lozingsvoorwaarden te voldoen, wordt deze conventioneel uit het water verwijderd onder de vorm van stikstofgas. Niet alleen vraagt dit proces veel energie. De stikstof wordt ook niet benut.

De *Power-to-protein* aanpak probeert de stikstofcyclus te sluiten door de ammoniumstikstof te opwaarderen tot microbiële proteïnen<sup>25</sup>. De aanmaak van deze eiwitten heeft als bijkomend voordeel dat Vlaanderen minder importafhankelijk wordt voor soja en viseiwitten.

Het concept van *Single Cell Proteins* (SCP) bestaat al lang en is gebaseerd op het feit dat bepaalde micro-organismen rijk zijn aan proteïnen met de juiste samenstelling voor toepassing in vee- of visvoer of voor menselijke voeding. De productie van SCP komt nu opnieuw onder de aandacht omwille van het meer duurzame karakter en de stijgende prijzen van conventionele proteïnebronnen. Onder de benaming ProMic wil Avecom diverse uitgangsstromen opwaarderen tot hoogwaardige **Proteïnen** uit **Microben**. Van de verschillende mogelijke SCP productieroutes werd in *Power-to-protein* gekozen voor een mengcultuur van bacteriën die eiwitten kunnen maken uit CO<sub>2</sub>, waterstof, zuurstof en ammoniumstikstof<sup>26</sup>.

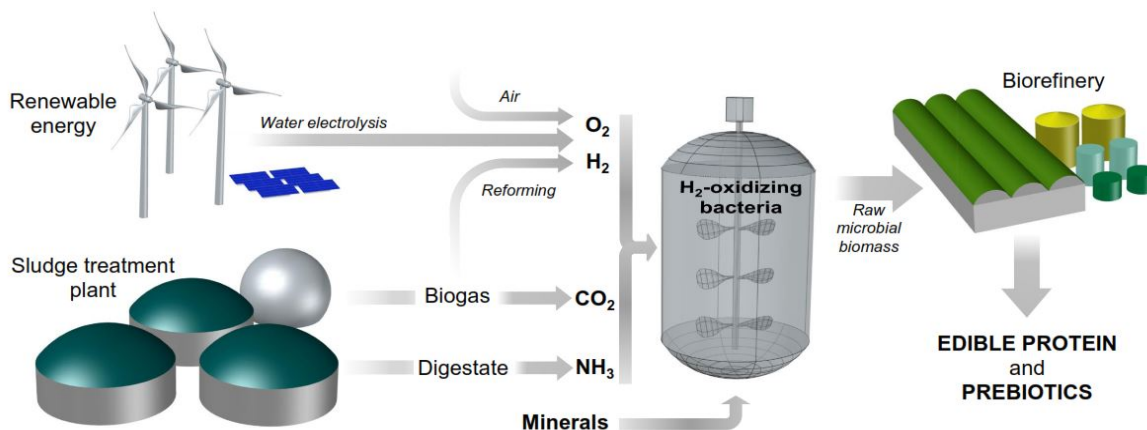
#### 2.2.3.1 Concept

Het *Power-to-protein* concept heeft als bedoeling microbiële eiwitten te maken uit reststromen die bv. op een huishoudelijke waterzuiveringsinstallatie aanwezig zijn (Figuur 12). Anaerobe digestie resulteert in een waterstroom rijk aan nutriënten (ammoniumstikstof) en een gasstroom bestaande uit methaan en CO<sub>2</sub>. Waterstof en zuurstof worden bekomen via elektrolyse van water met hernieuwbare energie. In eerste instantie wordt beoogd de SCP toe te passen als diervoeder, maar in een latere fase kan het concept ook uitgebreid worden naar andere microbiële producten zoals vetstoffen, biopolymeren, enz.

---

<sup>25</sup> [http://www.kwrwater.nl/tki/Power\\_to\\_Protein/](http://www.kwrwater.nl/tki/Power_to_Protein/)

<sup>26</sup> <http://www.powertoprotein.eu/programme/>



Figuur 12: Power-to-protein concept (<http://www.powertoprotein.eu/programme/>, Verstraete, 2016)

### 2.2.3.2 Status

Avecom heeft het proces getest op 100 L schaal (TRL niveau 5-6). Voor een verdere opschaling werd in een samenwerking met o.a. KWR in Nederland cofinanciering bekomen in het kader van het TKI watertechnologieprogramma. Het is de bedoeling een 500 L pilootreactor te bouwen die 1 kg eiwit per dag moet gaan produceren<sup>26</sup>. Een belangrijke uitdaging is een perfect veilig reactorconcept te ontwerpen voor het potentieel explosieve waterstof-zuurstofmengsel. Het consortium hoopt het concept binnen 2 jaar tot commercialisatie te brengen.

### 2.2.3.3 Randvoorwaarden

Aangezien de affiniteit van de micro-organismen voor CO<sub>2</sub> hoog is, kunnen lage CO<sub>2</sub> concentraties (tot ppmv niveau) volstaan, maar voor een efficiënt en economisch proces, zijn hogere CO<sub>2</sub> concentraties te verkiezen. Voorlopig ligt de focus op de koppeling met de nutriëntenstroom afkomstig van de waterzuivering en worden enkel synthetische gasmengsels getest. Er wordt verwacht dat het proces geen negatieve effecten zal ondervinden van de aanwezigheid van sulfides, cyanides of thiocyanides in de gasstroom, zolang deze geen al te hoge waarden aannemen. Omdat de geproduceerde eiwitten bedoeld zijn voor voedingstoepassingen, moet de ingaande gasstroom uiteraard wel vrij zijn van alle componenten die niet toegelaten zijn in voeding. In vele gevallen zal dus een voorbehandeling nodig zijn, maar het is op dit moment niet duidelijk welke zuiverheid de levensmiddelenindustrie op basis van regelgeving zal eisen (Oesterholt et al., 2015).

De microbiële cellen moeten geoogst worden uit de waterfase en opgewerkt worden tot een stabiel eindproduct.

De eigenlijke energiebron in het proces is waterstof. Deze wordt gegenereerd via elektrolyse van water met behulp van hernieuwbare energie. Het aan- en afzetten van het proces wordt momenteel getest maar lijkt te werken.



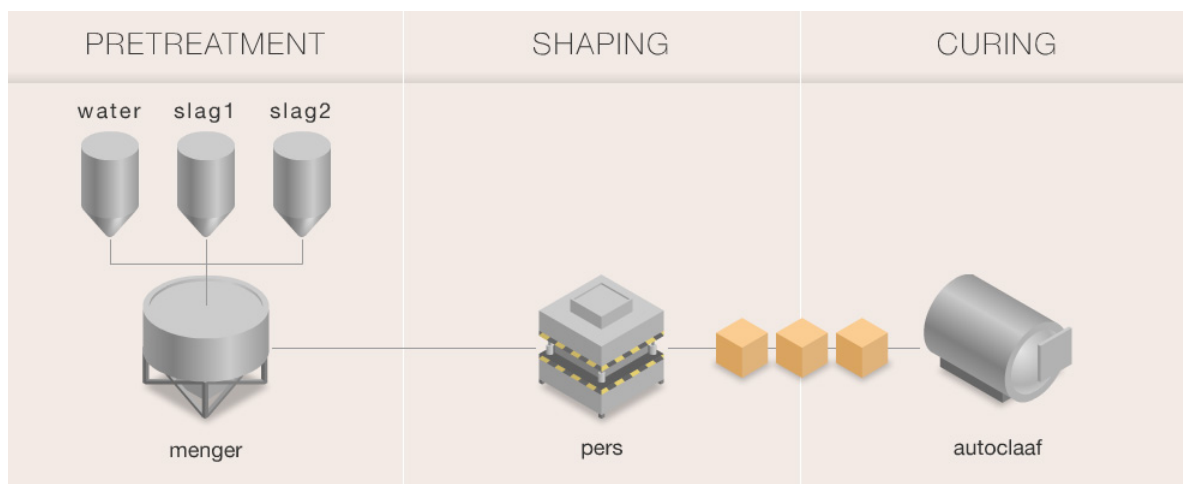
## 2.2.4 Carbstone Innovation

Met het oog op een meer duurzaam gebruik van materialen, ontwikkelt Carbstone Innovation NV<sup>27</sup> technologieën voor de opwaardering van secundaire grondstoffen. Een eerste realisatie is de verwerking van (metaal)slakken tot hoogwaardige bouwmaterialen.

Slakken zijn een afvalstof/bijproduct van de staalproductie en vormen een in hoofdzaak anorganische reststroom. Na recuperatie van het recycleerbaar metaal en de waardevolle grind, blijft een restfractie over die rijk is aan CaO en MgO. In een natuurlijk carbonatatieproces reageren Ca-houdende mineralen met CO<sub>2</sub> tot calciumcarbonaat, dat ook bekend staat als kalksteen en in de bouw wordt gebruikt. In samenwerking met VITO werd dit proces verder ontwikkeld tot een milieuvriendelijke oplossing voor omvorming van fijne restfracties van slakken tot kunstmatige kalksteen.

### 2.2.4.1 Concept

Met een innovatieve maalmolen worden de ruwe slakken verwerkt tot een geschikte fijne fractie. Daarna wordt deze gemengd met diverse slakkenzanden en water. Vervolgens gebeurt de vormgeving in een hydraulische pers. Tot slot wordt het groene product voor de eigenlijke carbonatatie onder verhoogde CO<sub>2</sub> gebracht, afhankelijk van de beoogde sterkteontwikkeling in een klimaatkamer of bij een verhoogde temperatuur en druk in een autoclaaf, waar het materiaal uithardt (Figuur 13).



Figuur 13: Principe van Carbstone carbonatatieproces (<http://www.carbstoneinnovation.be/>)

<sup>27</sup> <http://www.carbstoneinnovation.be/nl/>

Twee afvalstromen worden dus tegelijk gevaloriseerd. CO<sub>2</sub> is afkomstig van puntbronnen. Als Ca- en/of Mg-rijke uitgangsmateriaal komen niet alleen staalslakken in aanmerking, maar ook non-ferroslakken of bodemassen van huisvuilverbranding. Het gevormde calciumcarbonaat fungeert als bindmiddel (in plaats van cement). Het eindproduct is een hoogwaardig bouw materiaal met een waaier van toepassingen, gaande van klinkers tot industriële bouwblokken.

#### **2.2.4.2 Status**

In 2014 werd een pilootinstallatie ingehuldigd bij Recoval Belgium BVBA in de buurt van het Waalse Farciennes. Deze plant zal zowel dienen voor verder onderzoek en ontwikkeling als voor kleinere industriële producties van bouwmaterialen uit diverse grondstoffen. Bij continue procesvoering zouden 15 à 20 kton slakken per jaar verwerkt kunnen worden. Het huidige TRL niveau wordt ingeschat op 7 en de tijd tot commercialisatie op 2 tot 3 jaar.

De optimale schaalgrootte voor het Carbstone proces wordt momenteel ingeschat op verwerking van 50 tot 100 kton CO<sub>2</sub>/jaar per productie-eenheid.

#### **2.2.4.3 Randvoorwaarden**

Tot op heden werden de grootschalige testen enkel uitgevoerd met zuiver CO<sub>2</sub>. Op laboschaal werden echter wel testen uitgevoerd met modelgasstromen met een lager CO<sub>2</sub> gehalte. Er werden echter tot op heden nog geen reële afgassen getest. Wel is geweten dat de CO<sub>2</sub> concentraties best >20% liggen voor een efficiënt proces. Ook gasstromen met bv. 15% CO<sub>2</sub> komen in aanmerking, door gebruik te maken van zeolieten die CO<sub>2</sub> absorberen.

Verdere eisen die aan de gasstroom worden gesteld hebben enkel te maken met het vermijden van corrosie bij eventueel transport (bv. verwijdering van water). Er worden procestechnisch geen negatieve effecten verwacht van de aanwezigheid van onzuiverheden, omdat het een zeer robuust proces betreft. Maar dit aspect dient wel verder onderzocht te worden.

Visuele kenmerken van de eindproducten en veiligheid zijn wel doorslaggevend voor de toepassing van het product.

Het energieverbruik wordt geschat op 70 à 100 kWh/ton product. Hernieuwbare energie is enkel inzetbaar voor het drogen van de grondstoffen.

#### **2.2.4.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing**

De massabalans komt grosso modo hierop neer:

1 ton slak + 0,15 ton CO<sub>2</sub> → 1,1 ton product + 0,05 ton H<sub>2</sub>O

(Vergelijking 13)

Dit betekent dus dat 0,15 ton CO<sub>2</sub> vastgelegd wordt per ton slak of dat er 0,14 ton CO<sub>2</sub> nodig is per ton product. Er moet rekening gehouden met het feit dat het proces niet geoptimaliseerd is om maximale hoeveelheden CO<sub>2</sub> vast te leggen, wel op materialen van geschikte kwaliteit te produceren.

Aan het energieverbruik van ongeveer 50-100 kWh/ton product zijn uiteraard CO<sub>2</sub>-emissies verbonden (0,035-0,07 ton/ton product voor een gemiddelde brandstofmix). Maar omdat in het Carbstone proces geen cement wordt gebruikt, worden ook CO<sub>2</sub>-emissies vermeden. De totale CO<sub>2</sub>-balans is daarom veel gunstiger dan voor de conventionele betonproductie (0,2 ton CO<sub>2</sub>/ton product bespaard) (Quaghebeur et al., 2015).

Het is belangrijk aan te stippen dat de bouwmaterialen (in tegenstelling tot chemicaliën) resulteren in een permanente opslag van CO<sub>2</sub>.

#### **2.2.4.5 Markt en kostenaspecten**

Als men rekent dat in een Vlaams huis gemiddeld 100 ton beton en 25 ton bakstenen verwerkt wordt, is het duidelijk dat het marktpotentieel enorm groot is en kan oplopen tot enkele miljoenen tonnen per jaar. De grote commerciële doorbraak wordt verwacht wanneer een eerste betonfabriek een substantieel deel van de productie omvormt. Het aantal betonfabrieken dat gevormd kan worden in een regio zal eerder bepaald worden door de beschikbare hoeveelheid slakken dan de afzetmarkt van de bouwmaterialen. De beschikbare hoeveelheid slakken is dus eerder een beperkende factor dan de afzetmarkt van de bouwmaterialen.

Het product mag niet duurder zijn dan de bestaande cementgebaseerde bouwmaterialen want de eindgebruiker wenst geen hogere prijs te betalen voor het groene imago van het product. De kostprijs van CO<sub>2</sub> heeft een belangrijke impact op de finale productiekost. Voorlopig wordt CO<sub>2</sub> van voedselkwaliteit gebruikt, maar men hoopt op verdere ontwikkelingen op het vlak van CO<sub>2</sub> captatie om tot een lagere prijs te komen.

#### **2.2.4.6 Barrières**

De introductie van nieuwe materialen is niet eenvoudig in de conservatieve bouwsectoren en is onderhevig aan normering. Daarom worden in eerste instantie vooral toepassingen beoogd met minder strenge normen op het vlak van veiligheid (bv. geen dragende constructies).

Tot op heden zijn er weinig incentives om CO<sub>2</sub> om te zetten of vast te leggen in producten. Een manier om de betere CO<sub>2</sub>-balans van materialen toch in rekening te brengen, zou kunnen zijn om bij openbare aanbestedingen niet enkel rekening te houden met de prijs maar ook met de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de gebruikte bouwmaterialen. Dit is in Nederland bv. al het geval<sup>28</sup>.

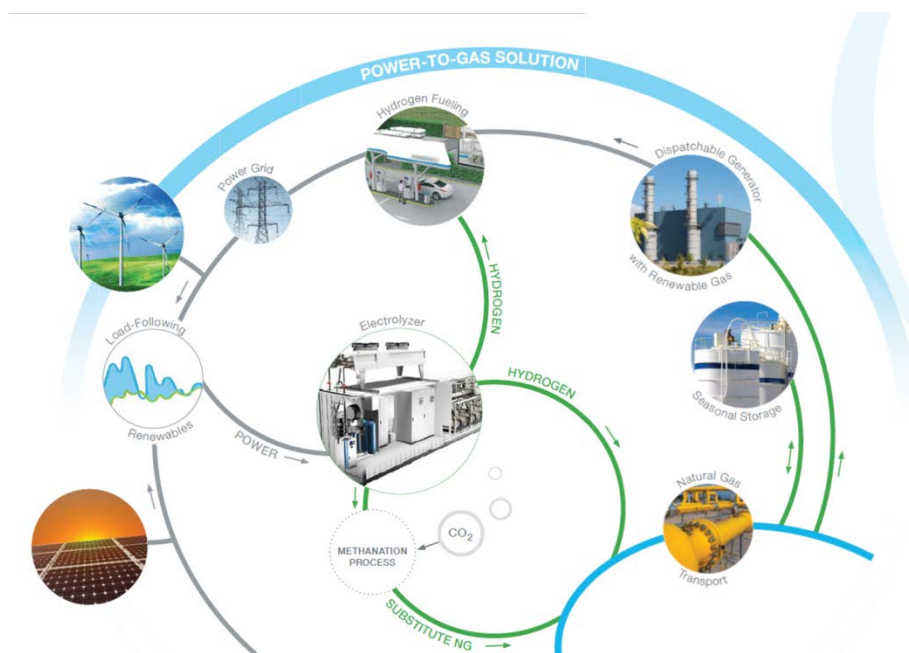
---

<sup>28</sup> <http://www.skao.nl/>

### 2.2.5 Organic Waste Systems (OWS)

Een beloftevolle technologie die vaak genoemd wordt om de wisselende hernieuwbare energieproductie te balanceren, is *Power-to-gas*. Hierbij wordt het overaanbod groene stroom via elektrolyse van water omgezet in waterstof. Dit waterstof mag slechts in beperkte mate ( $< 0,1 \text{ mol\% H}_2$ ) rechtstreeks worden toegevoegd in het aardgasnetwerk<sup>29</sup>. De verdere omzetting van waterstof in combinatie met  $\text{CO}_2$  tot methaan ( $\text{CH}_4$ ) laat toe het overaanbod van hernieuwbare energie op te slaan in het aardgasnetwerk of te gebruiken als voertuigbrandstof.

Een mogelijke bron van  $\text{CO}_2$  is biogas. Bij anaerobe vergisting wordt organisch materiaal door een mix van micro-organismen omgezet tot biogas dat gemiddeld uit 55%  $\text{CH}_4$  en 45%  $\text{CO}_2$  bestaat. Dit biogas kan aangewend worden voor productie van groene stroom en warmte via warmtekrachtkoppeling. In het door OWS onderzochte alternatief wordt de  $\text{CO}_2$  fractie met extra waterstof (geproduceerd uit het overaanbod aan groene stroom) bijkomend omgezet naar methaan. Door de verhoging van het methaangehalte in het finale gas, kan het in het aardgasnet geïnjecteerd worden (Figuur 14).



Figuur 14: *Power-to-gas* concept (Hydrogenics, 2012)

<sup>29</sup> [http://www.synerggrid.be/download.cfm?fileId=G5\\_42\\_NL\\_v201603\\_AanbevelingInjectieBiomethaan.pdf](http://www.synerggrid.be/download.cfm?fileId=G5_42_NL_v201603_AanbevelingInjectieBiomethaan.pdf)

#### 2.2.5.1 Concept

In anaerobe digestie wordt een deel van het methaan door een groep van hydrogenotrofe micro-organismen geproduceerd uit  $H_2$  en  $CO_2$  die vrijgesteld worden tijdens de afbraak van het organisch materiaal. Hetzelfde type micro-organismen kan in een onafhankelijk proces gebruikt worden om  $CO_2$  om te zetten in methaan. Voorlopig wordt vooral gemikt op de  $CO_2$ -fractie van ruw of opgewerkt biogas. Bij uitbreiding kan het concept ook ingezet worden voor de valorisatie van andere  $CO_2$ -bronnen, zoals rookgassen. Na opzuivering van het gas wordt als eindproduct biomethaan bekomen, dat in het aardgasnet geïnjecteerd of als transportbrandstof toegepast kan worden.

#### 2.2.5.2 Status

Het proces wordt momenteel getest op laboschaal met financiering van MIP<sup>30</sup> en IWT<sup>31</sup> (TRL 5-6). Een verdere opschaling is voorzien binnen de twee jaar mits Europese cofinanciering via Horizon 2020 wordt toegekend. De optimalisatie van de volumetrische reactiesnelheid vormt hierbij de belangrijkste technologische uitdaging.

#### 2.2.5.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werden enkel modelgasstromen getest.  $CO_2$  dient in voldoende hoge concentratie (> 20%) aanwezig te zijn voor een economisch efficiënt proces. De aanwezigheid van waterstofsulfide kan het proces verstoren. Voor andere onzuiverheden is dit nog niet bestudeerd. Deze inzichten zullen bepalen welke voorbehandeling nodig is. Verdere conditioneringseisen zijn er niet.

Het basisconcept is gelinkt aan gebruik van hernieuwbare energie. Testen hebben aangetoond dat het proces eenvoudig aan- en afgeschakeld kan worden en snel terug op gang komt na stilstand.

#### 2.2.5.4 Potentieel voor $CO_2$ besparing

De basisreactie is de volgende:



Dit betekent dat maximaal 2,75 ton  $CO_2$  per ton methaan gefixeerd wordt.

De elektrolyse heeft het grootste aandeel in het energieverbruik, dat wordt geschat op 1 MWh (elektrisch) voor 55 m<sup>3</sup> methaan. Dit komt overeen met 25 MWh/ton  $CH_4$ .

#### 2.2.5.5 Markt en kostenaspecten

Biomethaan concurreert met fossiel aardgas dat momenteel een kostprijs heeft van grosso modo 20 euro/MWh. Subsidie van de overheid is nodig omdat de productiekosten van duurzame energie (zoals groen gas) hoger liggen dan die van fossiele brandstoffen. Hoewel in Vlaanderen investeringssteun voor een installatie voor de productie en injectie van biomethaan aangevraagd kan worden, ontbreekt alsnog een exploitatiesteun (Biogas-E vzw, 2014). Specifieke subsidiemechanismen voor de ondersteuning van groen gas zijn reeds beschikbaar in o.a. Nederland, Frankrijk en Denemarken, maar nog niet in Vlaanderen. De regeling Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE+) in Nederland bv. subsidieert alleen de zogenaamde

<sup>30</sup> MIP MIP2G: microbiële omzetting van  $H_2$  en  $CO_2$  tot biomethaan voor injectie in het aardgasnet

<sup>31</sup> IWT BioConversie: Biologische omzetting van CO en/of  $CO_2$  naar  $CH_4$

“onrendabele top” van duurzaam geproduceerd gas. Dit houdt in dat meer subsidie ontvangen wordt wanneer de prijs van fossiele energie daalt en minder subsidie wanneer deze stijgt. De regeling verleent subsidie per hoeveelheid geleverde energie (Zuijlen en Lensink, 2015).

De CO<sub>2</sub> kostprijs wordt niet als een kost beschouwd omdat het aanwezig is in het biogas.

### 2.2.5.6 Barrières

Een stap voor het creëren van een Vlaamse markt voor biomethaan, is het beleidsmatig-juridisch erkennen van groen gas. Hiervoor is een onafhankelijke instantie nodig die aan de producent van biomethaan een label/certificaat/Garantie van Oorsprong kan geven per eenheid biomethaan. Deze erkenning is een noodzakelijke basis om officieel te kunnen handelen met biomethaan, zowel in het binnenland als met het buitenland.

In verschillende Europese landen wordt al volop biogas opgewaardeerd om te mengen in het net. België en Portugal zijn de enige West-Europese landen die nog geen duidelijk wetgevend kader ontworpen hebben en die bijgevolg nog niet aan netinjectie doen.

In november 2010 heeft de EU het Mandaat M/475 (i.e. Mandaat aan *European Committee for Standardization* (CEN)) voor opstellen van de normen voor biomethaan voor gebruik in transporttoepassingen en injectie in aardgasleidingen) uitgegeven. Via dit mandaat wordt de CEN belast met de ontwikkeling van een Europese Norm (EN) die de kwaliteit van biomethaan dient vast te leggen voor zowel het gebruik als transportbrandstof als voor de injectie in het aardgasnet. Het doel van dit mandaat is een harmonisatie te bewerkstelligen van bestaande regelgevingen in de verschillende Europese lidstaten en deze op elkaar af te stemmen. Deze harmonisatie zal een vlottere expansie van de Europese biomethaanmarkt ten goede komen (Biogas-E vzw, 2014).

In afwachting van een Europese harmonisatie, heeft Synergrid aanbevelingen opgesteld die tot doel hebben de voorwaarden te scheppen die een veilige injectie van biomethaan in de Belgische distributie- en transportnetten mogelijk maken (Synergrid, 2016). De aanbevelingen van Synergrid worden continu aangepast in functie van de gepubliceerde versies van de Europese normen, van de technologische evoluties en van de noden voortvloeiend uit nieuwe aanvragen. De aanbeveling focust momenteel voornamelijk op technische aspecten gerelateerd aan de injectie van biomethaan en beschrijft de parameters en limietwaarden om na behandeling de kwaliteit van aardgas te verkrijgen.

Het opzetten van een niet-discriminerend ondersteuningsmechanisme dat biomethaan op een equivalente basis ondersteunt naast de productie van groene stroom (ondersteund via groene stroom certificaten) zou projectontwikkelaars kunnen stimuleren om de meest efficiënte technologie te implementeren.

## 2.2.6 Proviron

Proviron ontwerpt, produceert en verkoopt chemicaliën aan vooral nichemarkten. Het heeft 22 productie-eenheden in 3 fabrieken in België en de VS. Voor het merendeel van de eigen producten zijn ze marktleider. De productie van micro-algen past in Proviron's strategie om duurzame producten op de markt te brengen die een oplossing brengen voor de klant.

### 2.2.6.1 Concept

CO<sub>2</sub> wordt vastgelegd in micro-algen via fotosynthese zoals eerder beschreven in Sectie 2.1.6.1. Het eindproduct is de micro-alg zelf.

De productie van de micro-algen vindt plaats in een gesloten fotoreactor en onder gecontroleerde omstandigheden. Proviron heeft met de steun van IWT<sup>32</sup> hiervoor een gepatenteerd reactorconcept ontwikkeld. De ProviAPT (*Proviron Advanced Photobioreactor Technology*) is een vlakkeplaatreactor omgeven door een waterbuffer, vervaardigd uit dunne plasticfolie (Figuur 15). Dit systeem is ruim 8 meter lang, en kan uitgerold worden als een luchtmatras. De hele structuur wordt rechtop gehouden door de omringende waterbuffer. Het water zorgt er tevens voor dat bij felle zon de temperatuur niet te hoog wordt, waardoor de algen zouden afsterven.



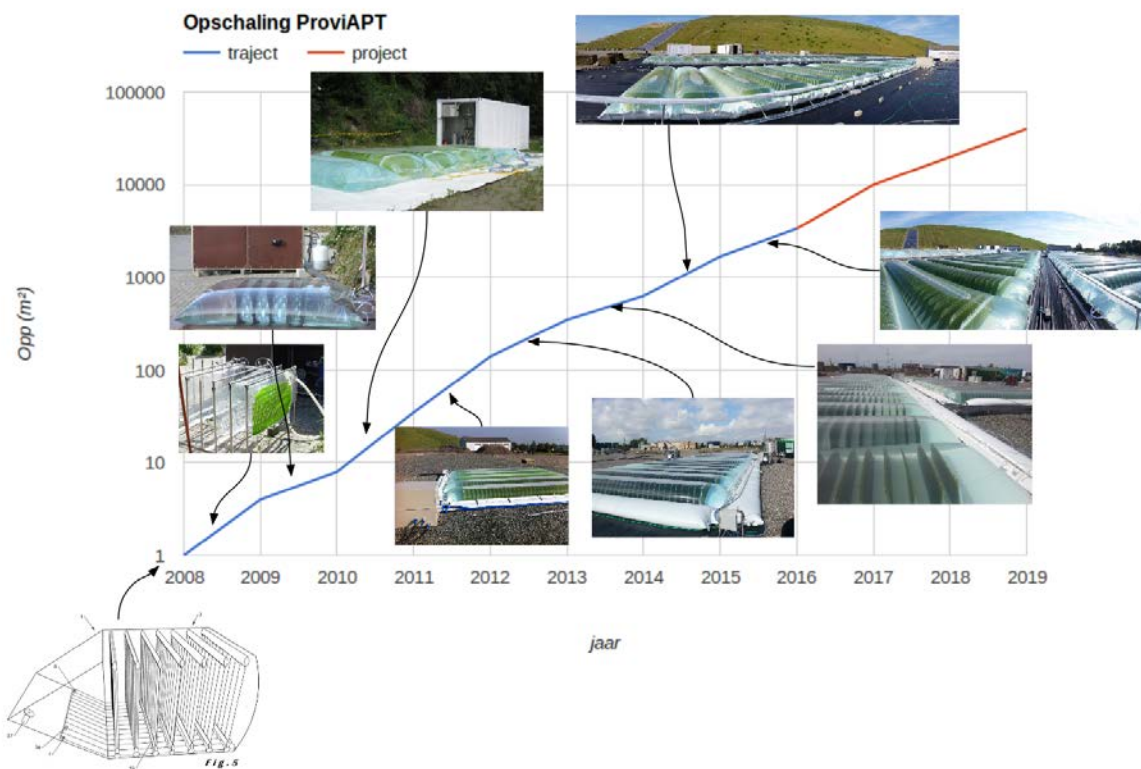
Figuur 15: Algenplantage in ProviAPT systeem op Hooge Maey (Antwerpen)

### 2.2.6.2 Status

De algenplantage bevindt zich op de Hooge Maey in Antwerpen (TRL 7). Alle elementen die algen nodig hebben om te groeien, zijn er beschikbaar: nutriënten (aanwezig in het te zuiveren percolaat), CO<sub>2</sub> (uit de gasmotoren voor de verbranding van biogas voor de productie van groene stroom), warmte (restwarmte die vrijkomt ter hoogte van de gasmotoren) en ruimte. De algenplantage bestrijkt op dit moment een oppervlakte van 3800 m<sup>2</sup>. Proviron plant een opschaling tot 4 hectare met productie van 120 ton droge stof in 2020 (Figuur 16) en bekijkt of het mogelijk is om deze demo plant verder op te schalen met behulp van IWT. Zorgen dat de productie op alle systemen steeds optimaal is, vormt de belangrijkste uitdaging. Andere belangrijke aandachtspunten zijn mechanische en biologische stabiliteit van de reactoren, waarbij de vlotte reinigbaarheid van de bioreactor een doorslaggevende rol speelt. Het vermijden van contaminatie is een ander

<sup>32</sup> IWT project "Haalbaarheidsstudie van een low cost fotobioreactor voor de kweek van micro-algen"

aandachtspunt. Er wordt immers gemikt op hoogwaardige, specifieke algen. Het modulair concept van Proviron is hiervoor veelbelovend.



Figuur 16: Opschalingstraject ProviAPT

### 2.2.6.3 Randvoorwaarden

Tot op heden werd enkel getest met synthetische gassen. De criteria waaraan het CO<sub>2</sub> gas dient te voldoen, zijn beschreven in Sectie 2.1.6.3 en 2.1.9.3.

Restwarmte van de motoren wordt gebruikt om de gewenste temperatuur te behouden tijdens de algengroei. Alternatief kan hernieuwbare energie aangewend worden in het proces. Een continue procesvoering geniet de voorkeur.

### 2.2.6.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

Er wordt 1,83 ton CO<sub>2</sub> per ton droge biomassa ingebouwd (Sectie 2.1.6.4). Het energieverbruik is niet gekend.

#### **2.2.6.5 Markt en kostenaspecten**

De totale huidige wereldproductie van micro-algen bedraagt 30 kton. De biomassa wordt gebruikt als voedingssupplement of voor aquacultuur (inclusief larvale ontwikkeling). De prijs varieert tussen 5 euro (voedingssupplement) en 100-350 euro (larvaal voedsel) per kilogram biomassa. Algen zijn ook de primaire producenten van omega-3 vetzuren en antioxidanten die een hoge voedingswaarde hebben. De prijzen van deze producten bedragen 250 euro/kg product. De door Proviron geproduceerde micro-algen worden hoofdzakelijk geëxporteerd naar Eurazië en Azië waar ze verwerkt worden in larvale voeders voor vis- en garnaalkwekerijen.

#### **2.2.6.6 Barrières**

De wetgevende beperkingen liggen voornamelijk in de export van de micro-algen zelf. De regelgeving is onduidelijk en bovendien sterk afhankelijk van het land waarnaar geëxporteerd wordt.

Hoewel de micro-algen *Spirulina* en *Chlorella* een GRAS (**G**enerally **R**ecognized **A**s **S**afe) statuut hebben en ook toegelaten zijn door de Europese *Novel Food* wetgeving, zijn de “nieuwe” micro-algen zoals *Nannochloropsis* in Europa nog niet erkend voor toepassing als voedingssupplement. Daarnaast valt het op de markt brengen van micro-algen - geproduceerd uit emissies - als menselijke voedingsbron onder de complexe wet- en regelgeving voor toelating van een *novel food*.

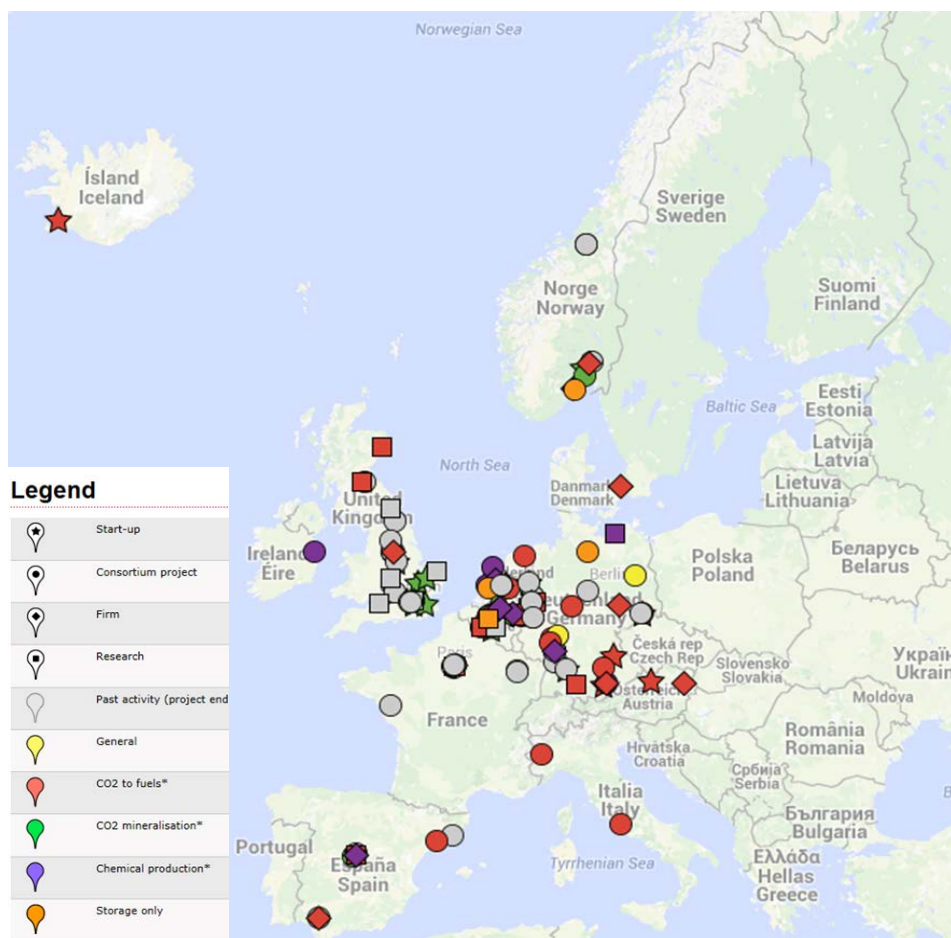
In dierlijke voeding mogen algen momenteel zonder beperking gebruikt worden. Proviron werkt daarbij met een GMP (*Good Manufacturing Practices*) label. Daarbij geldt uiteraard dat het hele proces volgens GMP principes uitgevoerd wordt. Het gebruik in voeders van micro-algen geproduceerd op emissies van de Hooge Maey houdt volgens Proviron's HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points*) criteria te veel risico's in (voornamelijk naar contaminatie met toxische stoffen, zware metalen, ...).

## 2.3 SUCCESVOLLE INTERNATIONALE TOEPASSINGEN

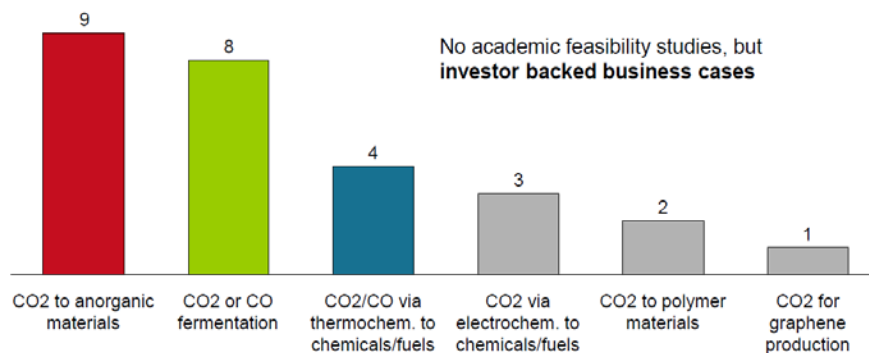
Uit de rondvraag bij bedrijven bleek dat slechts een beperkt aantal bedrijven in Vlaanderen momenteel investeren in het gebruik van CO<sub>2</sub> als grondstof voor de productie van bulk- en fijnchemicaliën, synthetische brandstoffen en bouwmaterialen (Sectie 2.2). Om deze reden werd ook onderzocht welke succesvolle internationale toepassingen relevant zijn voor Vlaanderen rekening houdend met de Vlaamse actoren/markt.

### 2.3.1 Meest beloftevolle technologieën

In het kader van het *Enabling CO<sub>2</sub> Re-Use* (EnCO<sub>2</sub>re) project worden momenteel alle CCU initiatieven in kaart gebracht. Een visueel overzicht voor de activiteiten in Europa is weergegeven in Figuur 17. Uit de globale inventarisatie blijkt dat de meeste CCU start-ups rond anorganisch producten werken (Figuur 18).



Figuur 17: Overzicht van CCU initiatieven in Europa (<http://www.entrepreneurship.tu-berlin.de/CCU/>, geconsulteerd in maart 2016)



Figuur 18: Ranking van CCU start-ups (Stute, 2015)

De laatste 5 jaren zijn daarnaast ook een aantal rapporten gepubliceerd waarbij verschillende CCU-technologieën geëvalueerd werden op basis van verschillende criteria met als doel de meest beloftevolle technologieën te identificeren. Er dient opgemerkt te worden dat CO<sub>2</sub> omzettingen via fermentatie niet opgenomen waren in deze studies. Een overzicht van de CCU opties die het meest beantwoorden aan de vooropgestelde selectiecriteria zijn voor de verschillende studies weergegeven in Tabel 3. Productie van methanol of mierenzuur, mineralisatie, polymerisatie kwamen het meest naar voren als beloftevolle CCU-technologie. Deze werden bv. ook besproken in een recente uitgave van het SETIS Magazine gewijd aan CCUS (SETIS magazine, 2016).

Een vergelijking van deze overzichten met de inventarisatie van industriële activiteiten in Vlaanderen leert het volgende. Methanolproductie en mineralisatie komen al voor in de inventarisatie met respectievelijk de *Power-to-methanol* en *Carbstone case*. De productie van ureum wordt al lang industrieel toegepast, en valt daarom buiten de scope van deze studie. Vermits de productie van mierenzuur als minder beloftevol ingeschat wordt t.o.v. de overige technieken (Tabel 4), werd enkel polymerisatie extra weerhouden als succesvolle internationale toepassing.

Tabel 3: Overzicht van de meest beloftevolle CCU omzettingen gerapporteerd in verschillende studies

| Global CCS<br>Institute en<br>Parsons<br>Brinckerhoff (2011) | Hendriks et al.<br>(2013)              | Bocin-Dumitriu et<br>al. (2013) | ADEME (2014)  | Otto et al. (2015)         |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| Methanol                                                     | Methanol                               | Methanol                        | Methanol      | Methanol                   |
| Mierenzuur                                                   | Mierenzuur                             | Mierenzuur                      | Mierenzuur    | Mierenzuur                 |
| Polymerisatie                                                | Polymerisatie                          | Polymerisatie                   | Mineralisatie | Oxaalzuur                  |
| Uitharden van CO <sub>2</sub><br>beton                       | Uitharden van CO <sub>2</sub><br>beton | Ureum                           |               | Ureum                      |
| Mineralisatie                                                | Mineralisatie                          | Mineralisatie                   |               | Formaldehyde               |
| Ureum                                                        | Algen                                  |                                 |               | Dimethylether              |
|                                                              |                                        |                                 |               | Methylurethaan             |
|                                                              |                                        |                                 |               | 3-Oxo-pentanedioic<br>zuur |
|                                                              |                                        |                                 |               | 2-Imidazolidinon           |
|                                                              |                                        |                                 |               | Ethylurethaan              |
|                                                              |                                        |                                 |               | 2-Oxazolidon               |
|                                                              |                                        |                                 |               | Isopropyl<br>isocyanaat    |

Tabel 4: Status van de meest beloftevolle technologieën door Joint Research Centre - DG JRC. Evaluatiecriteria zijn gebaseerd op Global CCS Institute en Parsons Brinckerhoff (2011) (Bocin-Dumitriu et al., 2013)

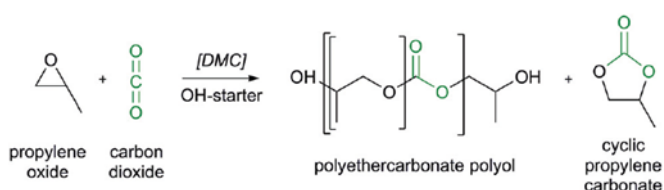
| Criterion               | Methanol production | (Carbonate) mineralisation | Polymerisation | Formic acid | Urea |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|----------------|-------------|------|
| Technology maturity     | 😐                   | 😊                          | 😐              | 😐           | 😊    |
| Scale-up potential      | 😐                   | 😊                          | 😊              | 😊           | 😐    |
| Commercial viability    | 😐                   | 😊                          | 😐              | 😞           | 😐    |
| CO2 abatement potential | 😞                   | 😊                          | 😊              | 😞           | 😞    |

### 2.3.2 Covestro

Polymeerfabrikant Covestro (de vroegere kunststofdivisie van Bayer) heeft een technologie ontwikkeld voor de productie van polymeren uit CO<sub>2</sub>. Voor dit zogeheten *Dream* proces, werkt Covestro nauw samen met CAT Catalytic Center, een onderzoeksinstituut aan de universiteit van Aken.

#### 2.3.2.1 Concept

Het polymeer polyethercarbonaat polyol wordt gesynthetiseerd door copolymerisatie van propyleenoxide en CO<sub>2</sub> in de aanwezigheid van een katalysator (dubbel metaalcyanide) en een alcohol als starter (Figuur 19). De identificatie van het juiste type katalysator zorgde voor de grote doorbraak in dit onderzoek.



Figuur 19: Copolymerisatie van propyleenoxide en CO<sub>2</sub> naar polyethercarbonaat polyol (Langake et al., 2014). DMC, dubbel metaalcyanide

#### 2.3.2.2 Status

Na een succesvolle testfase op pilotschaal in de fabriek te Leverkusen en veelbelovende marktanalyse, investeerde Covestro 15 Meuro in de bouw van een productielijn in de fabriek te Dormagen. De lijn zal een jaarlijkse productiecapaciteit van 5000 ton hebben. Het chemieconcern streeft ernaar dit product vanaf 2016 in productie te brengen<sup>33</sup>.

De belangrijkste technologische uitdagingen in de productie van polyethercarbonaat polyolen zijn gelinkt aan een set van sterk van elkaar afhankelijke parameters zoals het verhogen van de CO<sub>2</sub> inhoud in het polymeer, reduceren van bijproducten, verhogen van de activiteit en inbrengen van terminale functionele groepen. Daarnaast is reactor- en procesdesign belangrijk. Het controleren van de temperatuur is cruciaal aangezien het om een zeer exotherm proces gaat. Ook de productie van polyurethaan uit polyethercarbonaat polyol vormt een belangrijke technologische uitdaging in termen van verwerkbaarheid en eigenschappen. De verwerkbaarheid van polyurethaan wordt bv. bepaald door de viscositeit en dus indirect door de CO<sub>2</sub> inhoud van de polyolen (Langake et al., 2014).

Ook werkt Covestro aan een innovatief project waarbij CO<sub>2</sub> wordt gebruikt als grondstof voor de productie van elastomeren op commerciële schaal. Dit onderzoek gebeurt in samenwerking met de universiteiten van Aken en Berlijn. Het Duitse Ministerie van Onderwijs en Onderzoek heeft voor het project een som van 1,5 Meuro beschikbaar gesteld.

#### 2.3.2.3 Randvoorwaarden

De technologie werd al getest op industriële afgassen uit een bruinkoolgestookte elektriciteitscentrale (von der Assen en Bardow, 2014). Deze gassen werden echter voorbehandeld en opgezuiverd tot *food grade* kwaliteit.

<sup>33</sup> <http://press.covestro.com/news.nsf/id/co2-a-convincing-new-building-block-for-polyurethanes>

Er is weinig informatie bekend over de minimale eisen die aan de CO<sub>2</sub> input stroom worden gesteld. CO<sub>2</sub> dient in voldoende hoge concentratie aanwezig te zijn. Voorbehandeling van de inputstroom is nodig om onzuiverheden te verwijderen (Hendriks et al., 2013).

#### **2.3.2.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing**

Hoewel de productie van polyolen met hogere CO<sub>2</sub> inhoud technisch mogelijk is, bevatten de polymeren momenteel 20% CO<sub>2</sub> op gewichtsbasis. Dus 0,2 ton CO<sub>2</sub> kan vastgelegd voor 1 ton polymeer.

Het energieverbruik bedraagt 0,36 kWh per kg polyol (Stute, 2015). Een uitgebreide LCA studie toonde aan dat de productie van polyolen met 20% CO<sub>2</sub> gepaard gaat een broeikasgasemissiereductie van 11-19% in vergelijking met de conventionele methode (von der Assen en Bardow, 2014).

#### **2.3.2.5 Markt en kostenaspecten**

Polyethercarbonaat polyol kan verder verwerkt worden tot polyurethaanschuim, dat in veel alledaagse voorwerpen, zoals gestoffeerde meubels, schoenen en auto-onderdelen gebruikt wordt. Daarnaast kan het polymeer ook dienen als isolatiemateriaal. Covestro voorziet de productie van matrassen als eerste grote toepassingsgebied. Polyethercarbonaat polyolen kunnen dus de huidige markt van conventionele polyether polyolen substitueren. De marktgrootte bedroeg 8 Mton in 2012 (von der Assen en Bardow, 2014). De kostprijs bedraagt 1.900 euro/ton product (von der Assen en Bardow, 2014).

#### **2.3.2.6 Barrières**

Er werden geen barrières geïdentificeerd voor het in de markt zetten van de technologie (Hendriks et al., 2013).

De CO<sub>2</sub>-gebaseerde polyolen moeten concurreren met fossiel-gebaseerde polyolen op een kosteneffectieve wijze om marktaandeel te winnen (Hendriks et al., 2013).

## 2.4 IDENTIFICATIE VAN DE MEEST BELOFTEVOLLE TECHNIEKEN

De geïnventariseerde industriële CCU activiteiten werden kwalitatief geëvalueerd volgens een aantal thermodynamische, economische en milieucriteria zoals:

- Verbrandingswarmte (kJ/mol): dit is een maat voor de energie-inhoud van het product en dus de hoeveelheid energie die nodig is om het product uit CO<sub>2</sub> te maken;
- Mogelijkheid tot gebruik van hernieuwbare energie: omdat CO<sub>2</sub> een stabiel molecule is, zijn de omzettingsprocessen vaak energie-intensief. Het is belangrijk niet meer CO<sub>2</sub>-emissies te genereren door het gebruik van fossiele energie dan de CO<sub>2</sub>-vastlegging in het product. Daarom lijkt het gebruik van hernieuwbare energie in CO<sub>2</sub>-chemie aangewezen;
- Vastlegging van CO<sub>2</sub> in het product (ton CO<sub>2</sub>/ton product);
- Duur van de CO<sub>2</sub>-vastlegging: de duur van de vastlegging neemt toe in de volgorde brandstoffen-chemicaliën/producten-(constructie)materialen;
- Waarde van het product (euro/ton): op basis hiervan kan het onderscheid gemaakt worden tussen laag- en hoogwaardige producten. Het economisch potentieel hangt uiteraard tevens af van het marktvolume;
- Toegevoegde waarde van het product (%): deze wordt berekend als het relatieve verschil in waarde tussen het eindproduct (output) en de startmaterialen (input);
- Marktvolume (wereldwijd);
- *Technology Readiness Level* (TRL): dit geeft de status van de technologische ontwikkeling weer. Hier werd de TRL schaal vereenvoudigd tot een onderscheid laboschaal – pilotschaal – semi-commercieel.

Vervolgens werd een inschatting gemaakt van de voorliggende *cases* voor de verschillende criteria (Tabel 5). Daarbij was het niet de bedoeling om een technologische aanpak in het algemeen te beoordelen maar wel om een beter inzicht te bekomen in de specifieke *cases* (combinatie van technologie – producttoepassing – randvoorwaarden) die in Vlaanderen voorliggen en de mogelijkheden en beperkingen van de verschillende *cases* in die context naast elkaar te zetten.

Voor elk criterium werden 3 niveaus gedefinieerd. De opdeling in 3 niveaus is eerder arbitrair gebeurd om een zekere differentiatie tussen de *cases* te bekomen en is dus in grote mate bepaald door de voorliggende *cases* zelf. Voor een andere groep van *cases* zouden de niveaus en dus ook de evaluatie er anders kunnen uitzien.

Met betrekking tot milieuparameters (Tabel 5), zijn de drie *Power-to-product cases* (methanol, methaan, proteïnen) uiteraard degene die het meest gebruik maken van hernieuwbare energie. Methaan is het product met de hoogste CO<sub>2</sub>-sequestratie maar de duur van de vastlegging is beperkt. Voor de constructiematerialen is de duur van de vastlegging dan weer gunstiger ondanks de lagere CO<sub>2</sub>-sequestratie. In geen van de gevallen is de vastlegging echter permanent zoals bij CCS.

Ook voor de economische parameters is de situatie divers. Zoals visueel voorgesteld in Figuur 20, is de relatieve toegevoegde waarde hoog voor processen waarin reststromen worden gebruikt (ethanol, constructiematerialen) en gevaloriseerd. In de *Power-to-product cases* is ze lager omdat de kost van hernieuwbare waterstof (uit elektrolyse) momenteel nog hoog is. Het gebruik van andere waterstofbronnen

voor CCU toepassingen is daarom te overwegen. De productwaarde en relatieve toegevoegde waarde (Figuur 21) is het hoogst voor de micro-algen, die ook op het vlak van verbrandingswarmte goed scoren.

De meeste industriële *cases* in Vlaanderen bevinden zich al in een semi-commercieel stadium. Het is belangrijk op te merken dat de processen in 4 van de 7 gevallen ook in Vlaanderen ontwikkeld worden (constructiematerialen, methaan, micro-algen, *Power-to-protein*). De status in Vlaanderen t.o.v. de rest van de wereld wordt dan ook minstens als gelijk ingeschat. Als men kijkt naar de densiteit van initiatieven volgens het overzicht in Figuur 17, mag zelfs gesteld worden dat Vlaanderen mee voorop loopt.

Omdat het doel van de studie erin bestaat om bestaande Vlaamse CCU toepassingen te analyseren en het gebruik ervan te promoten én om aanbevelingen te geven voor ondersteunend beleid, is in samenspraak met de stuurgroep geopteerd om:

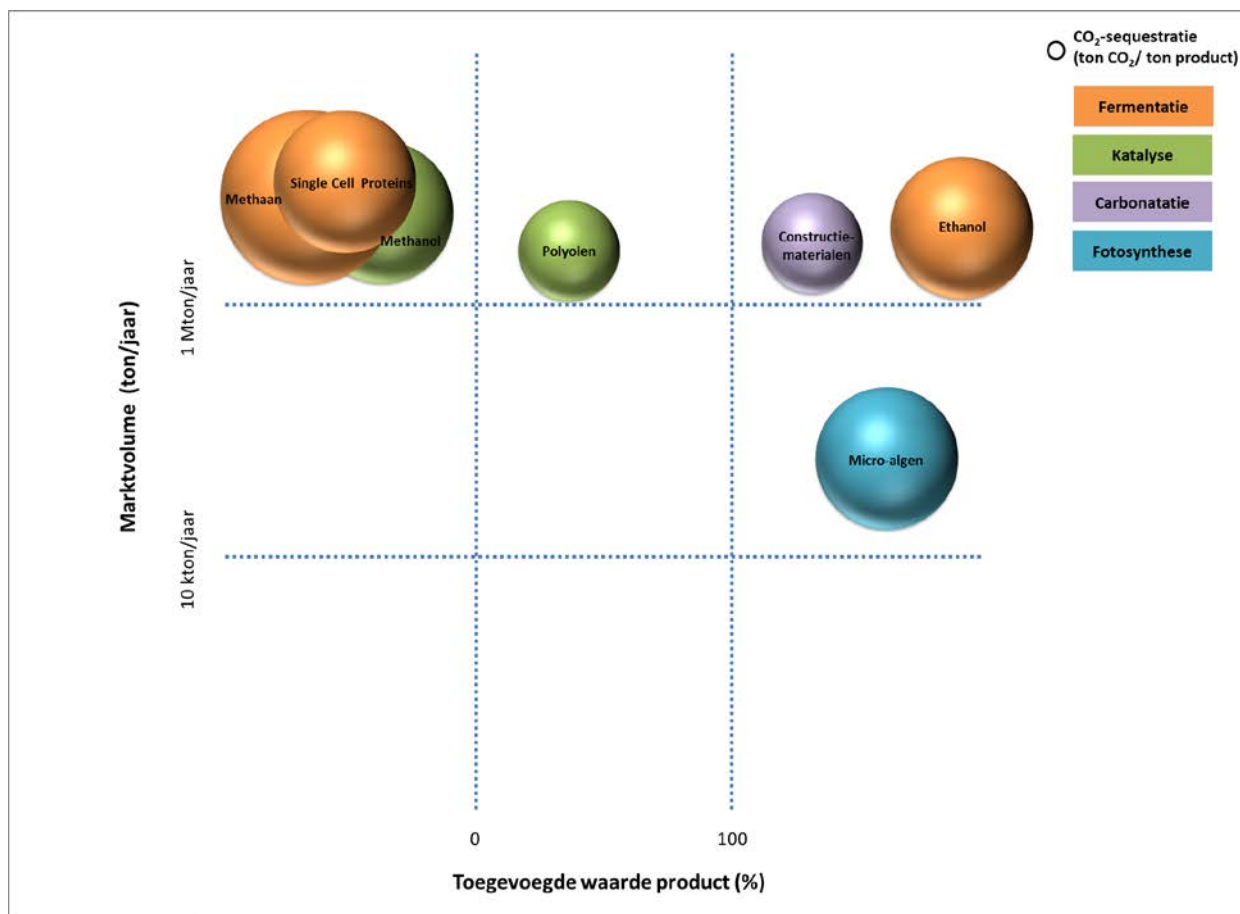
- in Vlaanderen ontwikkelde technologieën te selecteren (aspect innovatie);
- *cases* mee te nemen waarin brandstoffen worden geproduceerd (aspect wetgeving);
- een diversiteit van technologieën mee te nemen en slechts 1 *Power-to-product* proces te weerhouden;
- processen te selecteren die producten met hoge (toegevoegde) waarde genereren.

Uiteindelijk werden de volgende 4 *cases* weerhouden voor verdere evaluatie:

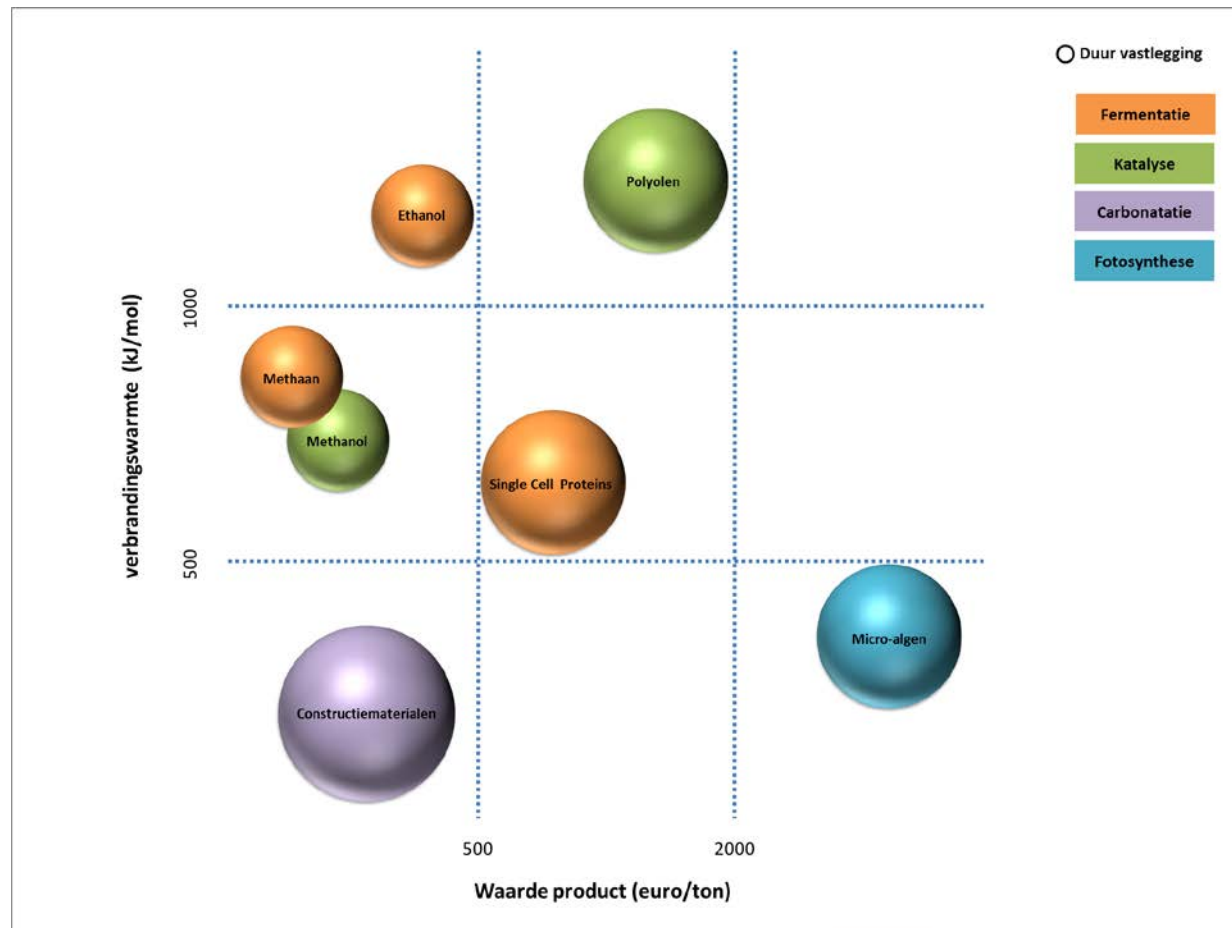
- ethanol uit afgassen van de staalindustrie (ArcelorMittal);
- *Power-to-methanol* (Havenbedrijf Antwerpen);
- productie van algenbiomassa (Proviron);
- constructiematerialen (Carbstone Innovation).

////////////////////////////////////





Figuur 20: Positionering van verschillende CCU cases volgens de relatieve toegevoegde waarde en het marktvolume. De grootte van de bollen staat in verhouding tot de CO<sub>2</sub>-vastlegging per ton product



Figuur 21: Positionering van verschillende CCU cases volgens de productwaarde en verbrandingswarmte. De grootte van de bollen staat in verhouding tot de duur van de CO<sub>2</sub>-vastlegging in het eindproduct. Waarde product is gebaseerd op fossiele brandstoffen (prijs maart 2016). De prijs voor geavanceerde biobrandstoffen is hoger

### 3 GLOBALE EVALUATIE

Tabel 6 geeft aan welk ontwikkelingsstadium de geïnventariseerde CCU technieken in Vlaanderen al hebben bereikt. De activiteiten bij de kennisinstellingen situeren zich logischerwijze in de onderzoeksfase, terwijl de hoofdmoot van de processen die bij bedrijven ontwikkeld of toegepast worden, zich al in de demonstratiefase bevinden en onder bepaalde omstandigheden economisch haalbaar kunnen zijn.

De tijdslijn om tot commercialisatie komt daar mee overeen (Tabel 7). Die wordt voor de bedrijfsgebonden activiteiten ingeschat op 2 à 3 jaar. Voor de activiteiten bij de kennisinstellingen zijn er enerzijds een groep processen die binnen 5 jaar doorontwikkeld zouden zijn en anderzijds een aantal embryonale ontwikkelingen waarvoor nog minstens 10 tot 15 jaar nodig is tot commercialisatie. In bepaalde gevallen wordt éénzelfde CCU activiteit door verschillende entiteiten onderzocht. Dit is bv. het geval voor de productie van bouwmaterialen door Carbstone Innovation en de onderzoeksgroep Procestechnologie voor Duurzame Systemen. Doordat beide technologieën zich in verschillende fasen bevinden, zijn meerdere tijdslijnen tot commercialisatie mogelijk. Alle schattingen gebeurden door de betrokkenen zelf en zijn in bepaalde gevallen mogelijk te optimistisch wanneer men rekening houdt met het huidige TRL niveau.

Een aantal barrières remmen de introductie van CCU-technologieën af. Een eerste groep beperkingen is technologisch van aard. De processen die zich nog op een laag TRL niveau bevinden dienen verder gekarakteriseerd en geoptimaliseerd te worden voor een correcte inschatting van hun potentieel. Gezien de lagere TRL niveaus, zijn voor de academische activiteiten doorgaans geen energieverbruiken bekend en werden nog geen kostenschattingen gemaakt. Dit is meestal trouwens pas mogelijk wanneer de technologie verder doorontwikkeld is en in representatieve omstandigheden kan worden getest. Voor bepaalde technologieën kan een uitbreiding van de productrange – bv. door genetische modificatie van micro-organismen, door ontwikkeling van nieuwe katalysatoren, enz. – marktintroductie waarschijnlijk versnellen. Meer interactie tussen bedrijven en onderzoeksinstituten lijkt niet alleen aangewezen om een beter zicht te krijgen op beschikbare puntbronnen en op de vereiste productspecificaties in termen van zuiverheid en kostprijs. Dit kan immers mee bepalen welke combinatie technologie - product het meeste potentieel heeft. De onderzoekswereld zou ook graag een beter beeld hebben van de interesse van sectoren en bedrijven om mee te werken aan CCU onderzoek en om CCU-technologie eventueel te commercialiseren. Regelgeving kan op verschillende vlakken de commercialisatie van een CCU-proces bemoeilijken. Afhankelijk van het eindproduct moet aan complexe wetgeving (bv. voeding, farma) of normering (bv. biomethaan, constructiematerialen) worden voldaan. Vooral wanneer producten gemaakt uit emissies bedoeld zijn voor toepassing in (vee)voeding of farma, kan dit een struikelblok vormen. Anderzijds zijn er uitdagingen bij het verkrijgen van beleidsmatige erkenningen, bv. van ethanol gemaakt uit staalgassen als bioethanol.

////////////////////////////////////



Tabel 7: Geschatte tijdslijn tot commercialisatie voor geïnventariseerde CCU activiteiten in Vlaanderen

| CCU categorie          | CCU-technologie             | Product                         | 2020 | 2025 | 2030 |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------|------|------|
| Organische producten   | Katalyse                    | Methanol                        |      |      |      |
|                        | Katalyse                    | Brandstoffen, chemicaliën       |      |      |      |
|                        | Katalyse                    | Carbonaten, carbamaten          |      |      |      |
|                        | Katalyse                    | Polyolen → polyurethanen        |      |      |      |
|                        | Chemical looping reforming  | Syngas                          |      |      |      |
|                        | Plasma-omzetting            | Syngas                          |      |      |      |
|                        | Plasmakatalyse              | C1-C5 geoxygeneerde producten   |      |      |      |
|                        | Electrokatalyse             | Carboxylaten                    |      |      |      |
|                        | Fotosynthese mbv algen      | Biomassa, biosilica, andere     |      |      |      |
|                        | Foto-electrochemie          | Methaan, methanol, mierenzuur   |      |      |      |
|                        | Fermentatie (eerder uit CO) | Ethanol                         |      |      |      |
|                        | Fermentatie                 | Acetaat                         |      |      |      |
|                        | Fermentatie                 | Methaan                         |      |      |      |
|                        | Fermentatie                 | Polyhydroxyalkanoaten           |      |      |      |
|                        | Fermentatie                 | Single Cell Proteins            |      |      |      |
|                        | Bioelectrosynthese          | Acetaat, Ethylacetaat, Caproaat |      |      |      |
| Anorganische producten | Carbonatatie                | Constructiematerialen           |      |      |      |
|                        | Carbonatatie                | Constructiematerialen           |      |      |      |
|                        | Carbonatatie                | Hoogwaardige poeders            |      |      |      |

Bedrijven

Geschatte tijd tot commercialisatie

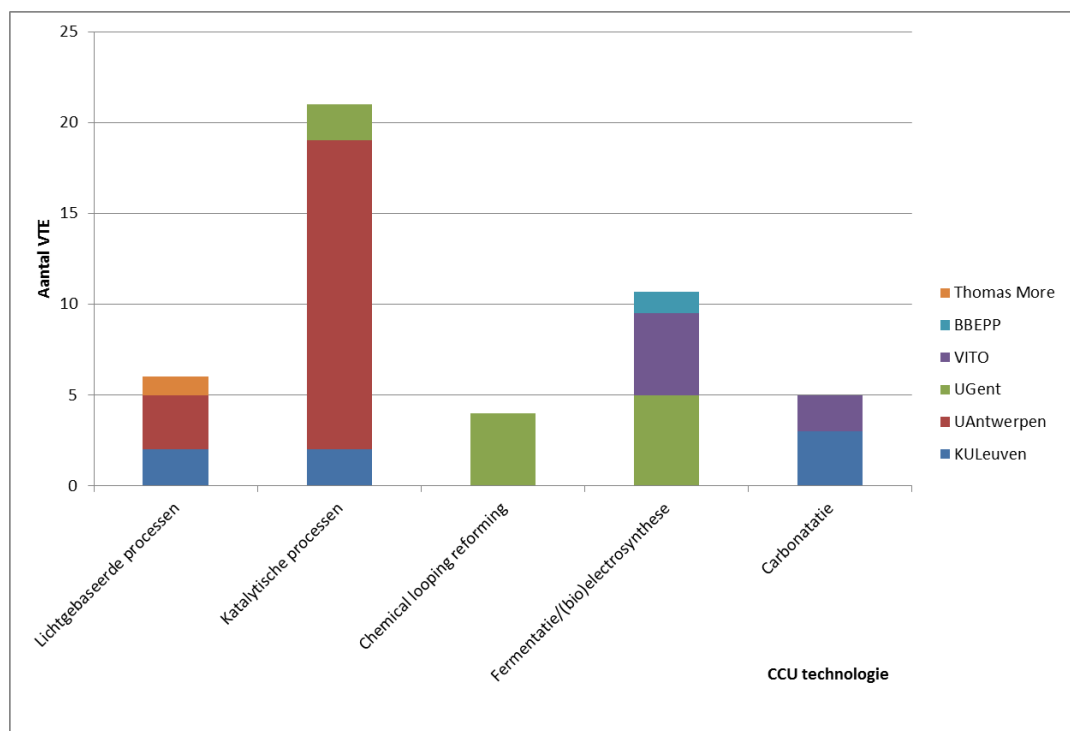
Minimale tijdslijn tot commercialisatie

////////////////////////////////////

Het belang van opschalings- en demonstratieprojecten die het potentieel van een CCU-technologie aantonen in reële omstandigheden, wordt erkend maar financiering ervan is moeilijk gezien de hoge investeringskosten. Tot slot hebben de huidige lage energie- en CO<sub>2</sub>-prijzen een negatieve invloed op de commerciële levensvatbaarheid van vele CCU-routes.

Het is interessant om vast te stellen dat bedrijven en kennisinstellingen al diverse financieringskanalen hebben aangeboord voor onderzoek en ontwikkeling. Bij de diverse *cases* wordt verwezen naar financiering door IWT, FiSCH, MIP, Horizon2020 en zelfs Nederlandse en Franse bronnen. In een aantal gevallen is er een samenwerking tussen bedrijven en kennisinstellingen via publieke financiering zoals bv. in VALORCO en BIOCAPPs, of op een bilaterale manier.

Voor de onderzoeksactiviteiten geeft Figuur 22 aan hoeveel onderzoekers actief zijn op het vlak van CCU in de verschillende kennisinstellingen en waarvoor kritische massa aanwezig is. In totaal werken er zo'n 47 doctorandi en postdoctoraal onderzoekers rond dit topic. Het grootste aantal voltijdse equivalenten (VTE) focust op katalyse. Hier valt de grote bijdrage vanuit de Universiteit Antwerpen op, waar de activiteiten zich vooral situeren op het vlak van het modelleren van plasmakatalytische omzettingen. Een tweede grotere cluster van activiteiten betreft fermentatie- en (bio)electrochemische processen. Het is belangrijk op te merken dat het werk ook breder is ingebed. De toepassing van (bio)electrochemie voor CCU kan bv. voordeel halen uit parallelle activiteiten rond optimalisatie van elektroden, processturing, procesintegratie, enz. voor andere applicaties.



Figuur 22: Aantal voltijdse equivalenten (VTE) actief op het vlak van CCU in Vlaamse kennisinstellingen (minstens op niveau van doctoraatsonderzoek). De lichtgebaseerde processen omvatten fotosynthese en foto-electrochemie

## 4 ANALYSE VAN DE MEEST BELOFTEVOLLE TECHNIKEN

Vier *cases* werden in sectie 2.4 weerhouden als beloftevolle CCU-technieken. Deze worden nu geanalyseerd op basis van de volgende criteria: 1) behaalde emissiereducties, 2) potentiële winsten, 3) technologisch maturiteitsniveau, 4) schaalgrootte, en 5) systeemanalyse waarop de techniek kan toegepast worden in het Vlaams Gewest.

De analyse houdt rekening met de specifieke randvoorwaarden van de individuele *cases* en mag dus niet gezien worden als een globale evaluatie van de gebruikte technologie. Bovendien kon in het kader van deze studie slechts een eerste benaderende inschatting voor de diverse criteria gebeuren. Een meer doorgedreven en gedetailleerde analyse kan het onderwerp zijn van een vervolgtraject.

Alle aannames zijn weergegeven in de tekst. Assumpties zijn gebaseerd op publiek beschikbare literatuur voor zover er informatie beschikbaar was. De bekomen resultaten werden vergeleken met literatuurgegevens en eventuele discrepanties werden aangegeven. In bepaalde gevallen werd door de betrokken bedrijven extra input gegeven zodat de analyse een meer correcte weergave is van de case. In sommige gevallen was dit omwille van het vertrouwelijke karakter van de (proces)gegevens niet mogelijk. Daarom willen we benadrukken dat de effectieve situatie voor een case kan afwijken van de voorliggende evaluatie.

Tot slot dient opgemerkt dat de analyse vooral bedoeld is om *cases* onderling te kunnen vergelijken. De eigenheid en diversiteit van de gekozen *cases* laat namelijk toe om uiteenlopende sterktes in beeld te brengen en na te gaan hoe aan eventuele zwaktes verholpen kan worden.

In wat volgt worden de *cases* *Power-to-methanol*, ethanol, micro-algen en constructiemateriaal per criterium geëvalueerd.

## 4.1 BEHAALDE EMISSIEREDUCTIES

Het eigenlijke milieu effect van een CCU-techniek ligt in de impact op de emissiereductie. Emissiereducties kunnen bekomen worden op verschillende manieren. Enerzijds wordt de uitstoot rechtstreeks verminderd door de vastlegging van de CO<sub>2</sub> in het product of materiaal. Anderzijds kan CO<sub>2</sub> ook tot indirecte emissiereducties leiden. Zo kan de toevoeging van CO<sub>2</sub> tot een hogere procesefficiëntie leiden of kan CO<sub>2</sub> als vervangproduct dienen van fossiele brandstoffen. Langs de andere kant zal de activatie van de CO<sub>2</sub>-molecule ook energie kosten, die dient meegenomen te worden in een gebalanceerde totaalanalyse. Om het effectieve aandeel van de CCU-technologie aan emissie-mitigatie te bepalen in een industrieel proces, dienen dus alle stromen die (on)rechtstreeks bijdragen aan CO<sub>2</sub>-emissies bepaald te worden en vergeleken te worden met een realistisch referentiescenario.

Voor de geselecteerde cases werd een eenvoudig blokkenschema van de CO<sub>2</sub>-waardeketen en het referentiescenario opgesteld. Vervolgens werden alle relevante in- en uitgaande massa- en energiestromen en hun grootte in kaart gebracht. Voor de ruwe analyse die hier beoogd werd, werd - tenzij anders vermeld - nog geen rekening gehouden met interne recirculatie van stromen (water, gassen, enz.), recuperatie van warmte met warmtewisselaars en de productie van nevenstromen (zoals de productie van O<sub>2</sub> door elektrolyse van water). Verder werd verondersteld dat een 100% zuivere CO<sub>2</sub> stroom in het proces gebruikt wordt. CO<sub>2</sub> afvang, transport en verdere opzuivering werden dus niet in de analyse opgenomen. Ook werden in de mate van het mogelijke dezelfde veronderstellingen in elk scenario gemaakt. Een gedetailleerd procesontwerp kan in een vervolgstadium uitgevoerd worden om de analyse verder te verfijnen.

Aan de hand van de massa- en energiebalans werd vervolgens de netto CO<sub>2</sub>-emissies van elk scenario berekend per eenheid van product. De netto CO<sub>2</sub>-emissie (Vergelijking 15) is de som van de CO<sub>2</sub> vastgelegd in het product (uitgedrukt als negatief getal) en de directe CO<sub>2</sub>-emissies en indirecte CO<sub>2</sub>-emissies geassocieerd met het gebruik van elektriciteit en warmte. De indirecte CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan de productie van nutriënten, (afval)water, infrastructuur en landgebruik werden in deze vereenvoudigde analyse niet mee opgenomen. Een gedetailleerde LCA studie kan in een vervolgstadium uitgevoerd worden om de CO<sub>2</sub>-voetafdruk te verfijnen.

CO<sub>2</sub>-emissie = vastgelegde CO<sub>2</sub> +  $\sum$  (in)directe CO<sub>2</sub>-emissies

(Vergelijking 15)

Tenzij anders vermeld werd in deze studie voor de berekening van de indirecte thermische CO<sub>2</sub>-emissies uitgegaan van aardgas als brandstof met 0,202 ton CO<sub>2</sub>/MWh<sub>th</sub> als standaard emissiefactor en 0,237 ton CO<sub>2</sub>/MWh<sub>th</sub> als LCA emissiefactor. De emissies gerelateerd met elektriciteitsverbruik werden berekend met 3 emissiefactoren: 0 ton CO<sub>2</sub>/MWh<sub>el</sub> (in de assumptie van volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie), 0,285 ton CO<sub>2</sub>/MWh<sub>el</sub> (standaard emissiefactor van de Belgische elektriciteitsproductie), en 0,4 ton CO<sub>2</sub>/MWh<sub>el</sub> (LCA emissiefactor van de Belgische elektriciteitsproductie). Een positieve netto CO<sub>2</sub>-emissie waarde impliceert dat CO<sub>2</sub> tijdens het proces geëmitteerd wordt.

Tot slot werd het verschil berekend tussen de netto emissies van referentiescenario en CCU scenario (Vergelijking 16). Een positieve waarde betekent dat het gebruik van CO<sub>2</sub> resulteert in een daling van de netto CO<sub>2</sub>-uitstoot in vergelijking met het referentiescenario en *vice versa*.

Verschil in CO<sub>2</sub>-emissies = Netto CO<sub>2</sub>-emissie (referentie – CCU-scenario)

(Vergelijking 16)

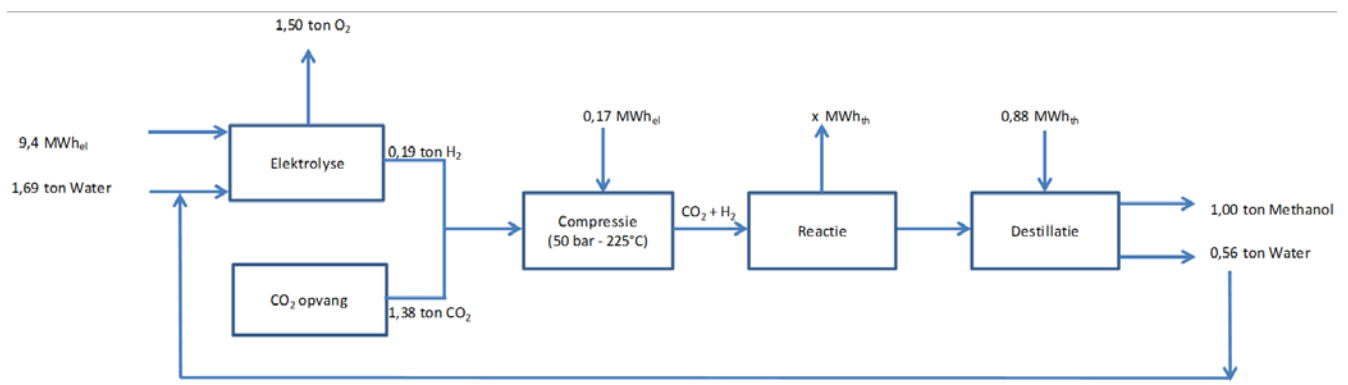
#### 4.1.1 Power-to-methanol

##### 4.1.1.1 CCU-scenario

Er bestaan twee katalytische processen om methanol uit CO<sub>2</sub> te synthetiseren: directe hydrogenatie van CO<sub>2</sub> met H<sub>2</sub> of CO<sub>2</sub> conversie naar CO dat vervolgens gehydrogeneerd wordt tot methanol (Van-Dal en Bouallou, 2013). Vermits het Havenbedrijf Antwerpen het CRI proces zal implementeren, werd het ééntrapsproces geselecteerd.

##### Blokschema

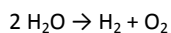
Het blokschema voor de synthese van methanol is weergegeven in Figuur 23. CO<sub>2</sub> is afkomstig van puntbronnen. Waterstof wordt gegenereerd door elektrolyse van water. Na compressie van de gassen tot ongeveer 50 bar en 225°C, vindt de katalytische omzetting plaats naar methanol. De ontstane ruwe methanol wordt via destillatie gescheiden van water (Figuur 23).



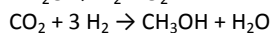
Figuur 23: Blokschema voor de synthese van methanol uit CO<sub>2</sub>. De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton methanol geproduceerd) worden in de tekst toegelicht

##### Massabalansen

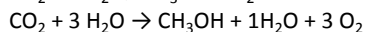
Vergelijking 17 en Vergelijking 18 geven respectievelijk de reacties weer voor de productie van waterstof en de omzetting van de gassen tot methanol. Netto resulteert dit in Vergelijking 19 en in de massabalansen van Tabel 8.



(Vergelijking 17)



(Vergelijking 18)



(Vergelijking 19)

Tabel 8: Massabalans voor de synthese van methanol uit CO<sub>2</sub>

| Component          | In (ton) | Uit (ton) |
|--------------------|----------|-----------|
| CO <sub>2</sub>    | 1,38     | 0         |
| CH <sub>3</sub> OH | 0        | 1,00      |
| H <sub>2</sub> O   | 1,69     | 0,56      |
| O <sub>2</sub>     | 0        | 1,50      |
| H <sub>2</sub>     | 0        | 0         |

### Energiebalansen

#### Elektrolyse van water

Het netto energieverbruik voor de productie van waterstof via elektrolyse van water bedraagt 9,4 MWh<sub>el</sub>/ton methanol (communicatie CRI). Dit ligt in de lijn van de gerapporteerde waarde van 4,8 kWh<sub>el</sub>/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (Van-Dal en Bouallou, 2013).

#### Compressie van gassen

Voor de compressie van CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> werd gerekend met het gebruik van nieuwe inlaatgassen. Een combinatie met gerecycleerde gassen laat toe om een hoog omzettingsrendement te bekomen (Singh et al., 2012), maar werd in de berekeningen niet in rekening gebracht. Er wordt van uitgegaan dat CO<sub>2</sub> op 1 bar en 25°C en H<sub>2</sub> op 30 bar en 25°C samengedrukt worden tot 50 bar. Verder wordt een polytrope compressie met een rendement van 75% (Kauw, 2012; Pérez-Fortes et al., 2014) verondersteld. Het samendrukken van H<sub>2</sub> wordt uitgevoerd met één compressor, terwijl voor de compressie van CO<sub>2</sub> een meertrapscompressie met tussenkoeling aangeraden is. Het opdrukken van CO<sub>2</sub> van 1 naar 50 bar resulteert namelijk in een grote temperatuurstijging. In deze berekening wordt een viertrapscompressie aangenomen.

Het totale energieverbruik voor de compressie van H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> bedraagt 0,17 MWh<sub>el</sub>/ton methanol. Dit is een factor 2 lager t.o.v. het totale energieverbruik voor compressie gerapporteerd in Pérez-Fortes et al. (2016) en Van-Dal en Bouallou (2013). Het lagere energieverbruik is te wijten aan de lagere druk (50 bar). Voor eenzelfde uitgangsdruk van 78 bar wordt inderdaad hetzelfde energieverbruik (0,33 MWh<sub>el</sub>/ton methanol) bekomen.

#### Reactie

Vergelijking 18 is exotherm. Deze thermische energie werd in deze analyse niet gerecupereerd of gevaloriseerd.

#### Destillatie

Het totale energieverbruik van de destillatiekolom bedraagt op 0,88 MWh<sub>th</sub>/ton methanol (communicatie Methanex).

### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 9. In overeenstemming met ADEME (2014), Kauw (2012), Pérez-Fortes et al. (2016) en Van-Dal en Bouallou (2013) vormt de elektrolyse van water (98%) de hoofdmoot van het totale energieverbruik.

Tabel 9: Energiebalans voor de synthese van methanol uit CO<sub>2</sub>

| Unit                                    | Proces                                           | Waarde | Eenheid                         |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|--------|---------------------------------|
| <b>Elektrolyse</b>                      | Vermogen voor elektrolyse                        | 9,04   | MWh <sub>el</sub> /ton methanol |
| <b>Compressie</b>                       | Compressie van H <sub>2</sub> en CO <sub>2</sub> | 0,17   | MWh <sub>el</sub> /ton methanol |
| <b>Destillatie</b>                      | Stoom voor methanoldestillatie                   | 0,88   | MWh <sub>th</sub> /ton methanol |
| <b>Totaal elektriciteitsverbruik</b>    |                                                  | 9,57   | MWh <sub>el</sub> /ton methanol |
| <b>Totaal thermisch energieverbruik</b> |                                                  | 0,88   | MWh <sub>th</sub> /ton methanol |

### CO<sub>2</sub>-emissies

De CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van methanol uit CO<sub>2</sub> werden berekend met de emissiefactoren beschreven in Sectie 4.1. Een overzicht van de emissies is weergegeven in Tabel 10. De hoofdmoot van de CO<sub>2</sub>-emissies is afkomstig uit de elektrolyse van water. Wanneer enkel hernieuwbare elektriciteit wordt aangewend, wordt er netto CO<sub>2</sub> vastgelegd in methanol. In het geval er gebruik gemaakt wordt van de Belgische elektriciteitsmix, wordt er tijdens het proces CO<sub>2</sub> geëmitteerd.

Tabel 10: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de synthese van methanol uit CO<sub>2</sub>

| CCU-scenario                                         | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Elektriciteit<br>Hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                             |
|------------------------------------------------------|------------------------|------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Vastgelegde CO<sub>2</sub></b>                    | -1,38                  | -1,38            | -1,38                                      | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| <b>Directe CO<sub>2</sub>-emissie</b>                | 0,00                   | 0,00             | 0,00                                       | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| <b>Indirecte CO<sub>2</sub>-emissie (elektrisch)</b> | 2,73                   | 3,85             | 0,00                                       | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| <b>Indirecte CO<sub>2</sub>-emissie (thermisch)</b>  | 0,18                   | 0,21             | 0,18                                       | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| <b>Netto</b>                                         | 1,53                   | 2,68             | -1,20                                      | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,237 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

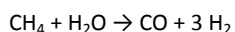
<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

#### 4.1.1.2 Referentiescenario

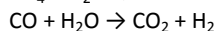
##### **Blokschema**

Methanol wordt op industriële schaal hoofdzakelijk geproduceerd uit aardgas (Figuur 24). In de eerste stap van het productieproces reageert methaan met stoom over een nikkel-katalysator bij 800-900°C tot een mengsel van CO en H<sub>2</sub> (synthesegas). Deze endotherme reactie wordt weergegeven in Vergelijking 20. Parallel aan de stoom *reforming* reactie treedt de *water-gas-shift* reactie in beperkte mate op. In dit exotherme proces wordt de in het syngas aanwezige CO omgezet in H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> (Vergelijking 21). In een volgende stap wordt het synthesegas gecomprimeerd tot 81 bar. Vervolgens wordt het gas in de synthesesreactor in aanwezigheid van een koper-zink-katalysator omgezet tot ruwe methanol (bestaande uit 18% v/v water en 82% v/v methanol) en warmte (Vergelijking 22). Tijdens de synthese van methanol vindt ook de omgekeerde *water-gas-shift* reactie plaats met CO als product (Vergelijking 23), dat opnieuw omgezet kan worden naar methanol (Vergelijking 24). Vergelijking 24 is in feite de combinatie van Vergelijking 22 en Vergelijking 23. Vermits deze drie reacties exotherm zijn, is koeling vereist. In de laatste stap wordt ruwe methanol na afkoelen gezuiverd. Water en andere onzuiverheden (zoals hogere alcoholen en alkanen) worden verwijderd in destillatiekolommen. Dit resulteert in 99,85% zuivere methanol.

De *reforming* reacties zijn:

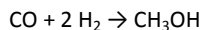


(Vergelijking 20)

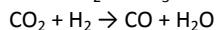


(Vergelijking 21)

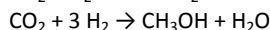
De reacties voor synthese zijn:



(Vergelijking 22)



(Vergelijking 23)

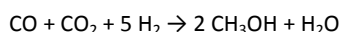


(Vergelijking 24)



### Massabalansen

De netto reactie voor de vorming van methanol uit syngas wordt weergegeven in Vergelijking 25. De finale massabalans is samengevat in Tabel 11 (communicatie Methanex).



(Vergelijking 25)

Tabel 11: Massabalans voor de synthese van methanol uit syngas

| Component          | In (ton) | Uit (ton) |
|--------------------|----------|-----------|
| CO                 | 0,595    | 0         |
| CO <sub>2</sub>    | 0,447    | 0         |
| H <sub>2</sub>     | 0,146    | 0         |
| CH <sub>3</sub> OH | 0        | 1,00      |
| H <sub>2</sub> O   | 0        | 0,186     |

Aangezien syngas gevormd wordt uit methaan (Vergelijking 20 en Vergelijking 21) en uitgegaan wordt van een volledige omzetting naar methanol, wordt er netto geen CO of CO<sub>2</sub> vastgelegd of vrijgezet.

### Energiebalansen

#### Reforming van CH<sub>4</sub> naar syngas

Reforming van aardgas is een endotherme reactie en verbruikt 4,8 MWh<sub>th</sub>/ton methanol (communicatie Methanex).

#### Compressie van syngas

Het totale energieverbruik voor de compressie van syngas bedraagt 0,28 MWh<sub>el</sub>/ton methanol (communicatie Methanex).

#### Reactie

De reacties weergegeven in Vergelijking 22, Vergelijking 23 en Vergelijking 24 zijn exotherm. Deze thermische energie werd in deze analyse niet gerecupereerd of gevaloriseerd.

#### Destillatie

Het totale energieverbruik van de destillatiekolom bedraagt 0,88 MWh<sub>th</sub>/ton methanol (communicatie Methanex).

#### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 12. Reforming van methaan vormt de hoofdmoot van het totale energieverbruik.

Tabel 12: Energiebalans voor de synthese van methanol uit syngas

| Unit                                    | Proces                                                | Waarde | Eenheid                         |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|---------------------------------|
| <i>Reforming</i>                        | Productie van syngas                                  | 4,79   | MWh <sub>th</sub> /ton methanol |
| <b>Compressie</b>                       | Compressie van H <sub>2</sub> , CO en CO <sub>2</sub> | 0,28   | MWh <sub>el</sub> /ton methanol |
| <b>Destillatie</b>                      | Stoom voor methanoldestillatie                        | 0,88   | MWh <sub>th</sub> /ton methanol |
|                                         |                                                       |        |                                 |
| <b>Totaal elektriciteitsverbruik</b>    |                                                       | 0,28   | MWh <sub>el</sub> /ton methanol |
| <b>Totaal thermisch energieverbruik</b> |                                                       | 5,67   | MWh <sub>th</sub> /ton methanol |

## CO<sub>2</sub>-emissions

De netto CO<sub>2</sub>-emissie in het referentiescenario werd op dezelfde manier berekend als voor het CCU-scenario. Hoewel geen methanol in België wordt geproduceerd, gebeurde de analyse voor de Belgische elektriciteitsmix. De hoeveelheid vermeden CO<sub>2</sub> per eenheid product zal namelijk berekend worden als het verschil in de netto emissies van beide scenario's. De CO<sub>2</sub>-emissiefactoren van de Belgische elektriciteitsmix verschillen van de Europese omwille van het grote aandeel nucleaire energie. De CO<sub>2</sub>-voetafdruk van het aandeel aardgas en steenkool wegen in de Europese elektriciteitsmix zwaar door waardoor de gemiddelde Europese standaard (0,460 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en LCA emissiefactor (0,578 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) groter zijn dan die van België (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub> en 0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>, respectievelijk).

Rekening houdend met de randvoorwaarden in deze analyse, gaat de productie van methanol uit aardgas in België steeds gepaard met een CO<sub>2</sub>-emissie (Tabel 13). Deze emissies zijn indirect en toe te schrijven aan het thermisch energieverbruik. De geschatte CO<sub>2</sub>-voetafdruk is groter dan de gerapporteerde waarden in de literatuur, die gemiddeld 0,76 ton CO<sub>2</sub> eq/ton methanol in Europa (Pérez-Fortes et al., 2016) en wereldwijd 0,69 CO<sub>2</sub> equivalenten/ton methanol bedragen (ecoinvent). Dit verschil kan mogelijks verklaard worden door de gebruikte emissiefactor voor indirecte thermische CO<sub>2</sub>-emissie en/of lager thermisch energieverbruik door interne stromen in rekening te brengen.

////////////////////////////////////

Tabel 13: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de synthese van methanol uit aardgas

| Referentiescenario                              | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Elektriciteit hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                             |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | 0,00                   | 0,00             | 0,00                                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 0,00                   | 0,00             | 0,00                                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 0,08                   | 0,11             | 0,00                                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 1,14                   | 1,34             | 1,14                                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
|                                                 |                        |                  |                                         |                                     |
| Netto                                           | 1,23                   | 1,46             | 1,14                                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,237 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

#### 4.1.1.3 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

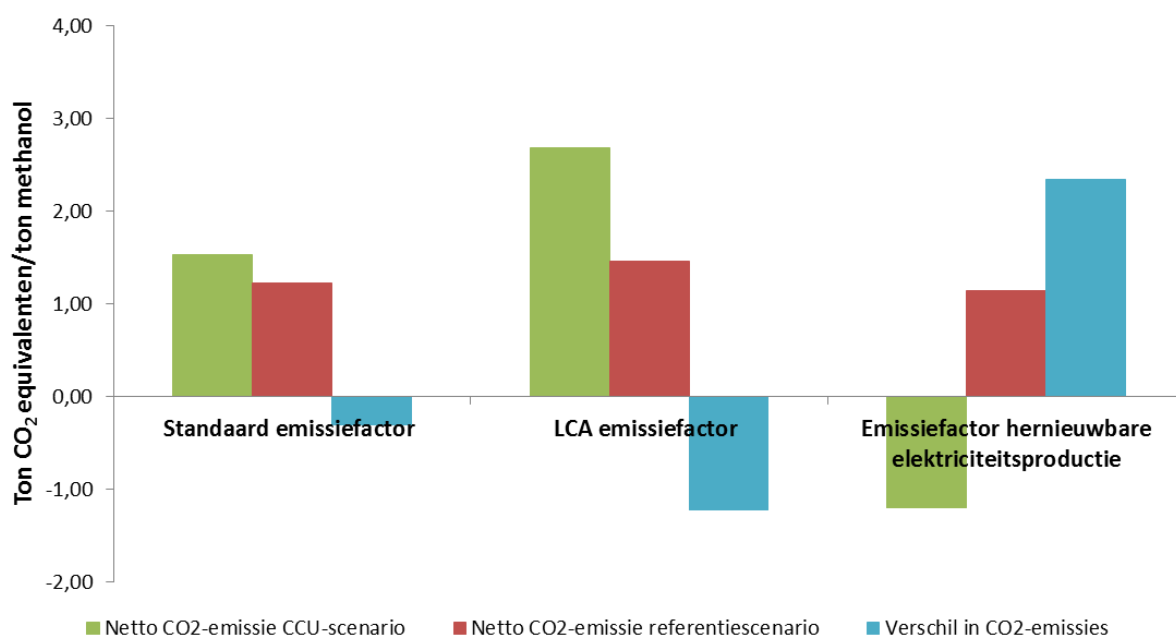
##### Massa- en energiebalansen

Enkel in het CCU-scenario wordt extern toegevoegde CO<sub>2</sub> vastgelegd in methanol (Figuur 25). Het verschil in CO<sub>2</sub>-balans t.o.v. het referentiescenario is echter sterk afhankelijk van de gebruikte emissiefactor. Dit is te wijten aan de indirecte CO<sub>2</sub>-emissie die in het CCU-scenario hoofdzakelijk toe te schrijven is aan elektriciteitsconsumptie voor de productie van H<sub>2</sub>, terwijl *reforming* van aardgas gepaard gaat met een thermisch energieverbruik. De LCA emissiefactoren voor elektrische energieproductie (0,402 ton CO<sub>2</sub> equivalenten/MWh<sub>el</sub>) wegen bv. zwaarder door in vergelijking met die van de thermische energie uit aardgas (0,237 ton CO<sub>2</sub> equivalenten/MWh<sub>el</sub>). Dit verklaart de grotere CO<sub>2</sub> milieu impact van het CCU-scenario. Wanneer 100% hernieuwbare energie gebruikt wordt, gaat de productie van methanol uit CO<sub>2</sub> gepaard met een positieve voetafdruk en is er effectief sprake van een netto vastlegging van CO<sub>2</sub>.

De *case* toont aan hoe sterk de eindevaluatie beïnvloed wordt door de keuze van de emissiefactoren en hoe belangrijk het is om voor CCU-technologieën en projecten gedetailleerde LCA analyses uit te voeren op een uniforme manier en met gestandaardiseerde factoren en criteria.

Tabel 14: Vergelijking van de massa- en energiebalans voor de synthese van methanol uit CO<sub>2</sub> (CCU-scenario) en aardgas (referentiescenario)

|                                  | CCU-scenario | Referentiescenario | Eenheid                             |
|----------------------------------|--------------|--------------------|-------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>      | -1,38        | 0,00               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie | 0,00         | 0,00               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton methanol |
| Totaal elektriciteitsverbruik    | 9,57         | 0,28               | MWh <sub>el</sub> /ton methanol     |
| Totaal thermisch energieverbruik | 0,88         | 5,67               | MWh <sub>th</sub> /ton methanol     |



Figuur 25: Netto CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van methanol uit CO<sub>2</sub> (CCU-scenario) en aardgas (referentiescenario) en het verschil in CO<sub>2</sub>-emissies van beide scenario's

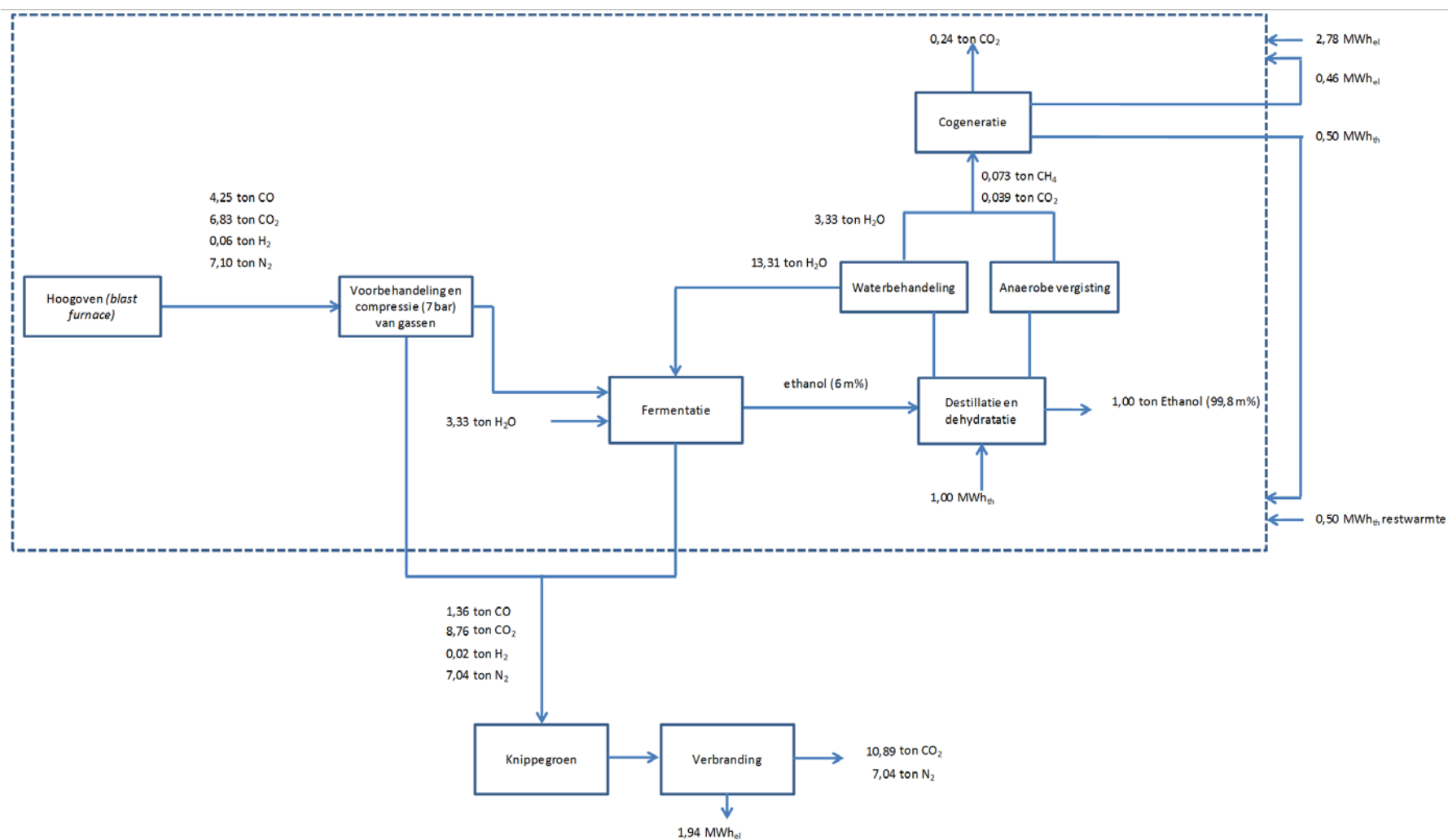
## 4.1.2 Ethanol

### 4.1.2.1 CCU-scenario

#### **Blokschema**

De voornaamste processtappen voor de synthese van ethanol via het LanzaTech proces zijn gas conditionering, fermentatie en productrecuperatie. Het processtroombiagram en de massa- en energiebalansen per ton ethanol geproduceerd worden weergegeven in Figuur 26. Het CO-rijke gasmengsel aanwezig in de uitstoot van de hoogovens wordt eerst voorbehandeld en gecomprimeerd tot 7 bar. Een voorbehandeling van het gas is belangrijk om een efficiënte fermentatie te verkrijgen. In deze analyse wordt verondersteld dat een rookgasreiniging reeds aanwezig is op de site, waardoor deze niet in rekening gebracht wordt. Vervolgens wordt het gas aan een bioreactor gevoed waarin door LanzaTech gepatenteerde micro-organismen gesuspendeerd in een vloeibaar medium CO als koolstof- en energiebron gebruiken. Ook H<sub>2</sub> aanwezig in het gasmengsel wordt aangewend als additionele energiebron. De micro-organismen secreteren in hoofdzaak ethanol en ook kleine hoeveelheden 2-3 butaandiol en azijnzuur in het fermentatiemedium. In deze analyse wordt de productie en dus ook de recuperatie van de nevenproducten verwaarloosd. Vermits de titers aan ethanol uit syngasfermentatie variëren tussen 2 en 6 m% ethanol (Molitor et al., 2016), werd voor deze analyse een gemiddelde ethanolconcentratie van 6 m% verondersteld. Het LanzaTech proces is een continue fermentatie waarbij medium voortdurend toegevoegd wordt aan de bioreactor en fermentatiemedium aan dezelfde snelheid onttrokken wordt. Dit medium wordt op de conventionele manier gedestilleerd tot een azeotroop mengsel met 92 m% ethanol en 8 m% water. Vervolgens is een dehydratatiestap vereist om 99,8 m% zuivere ethanol te bekomen.

De afvalstromen worden geminimaliseerd en zo veel mogelijk gerecycleerd in het productieproces. Het water dat verwijderd wordt tijdens de destillatie, wordt hergebruikt voor de fermentatie. Het organisch materiaal wordt na anaerobe vergisting omgezet in biogas dat verbrand wordt voor elektriciteits- en stoomgeneratie (cogeneratie). Het water afkomstig uit de anaerobe vergisting wordt voor het grootste deel terug in het proces gebracht nadat het door een waterbehandelingsinstallatie is gegaan. De restgassen van de bioreactor worden terug gestuurd naar de elektriciteitscentrale Knippegroen waar ze verbrand worden voor elektriciteitsgeneratie.



Figuur 26: Blokschema voor de synthese van ethanol uit CO en CO<sub>2</sub>. De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton ethanol geproduceerd) worden in de tekst toegelicht

## Fermentatie

$$\begin{aligned} 6 \text{ CO} + 3 \text{ H}_2\text{O} &\rightarrow 1 \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH} + 4 \text{ CO}_2 \\ 2 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2 &\rightarrow 1 \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3 \text{ H}_2\text{O} \end{aligned}$$

(Vergelijking 26)  
(Vergelijking 27)

| Gas             | % vol | Referentie (Molitor et al., 2016) |
|-----------------|-------|-----------------------------------|
| CO <sub>2</sub> | 26,2  | 20-30%                            |
| CO              | 25,6  | 20-35%                            |
| N <sub>2</sub>  | 42,8  | 50-60%                            |
| H <sub>2</sub>  | 5,4   | 2-4%                              |

Zowel het organisch materiaal dat hoofdzakelijk uit microbiële biomassa bestaat, als de fractie van water dat niet rechtstreeks hergebruikt kan worden in het proces, wordt naar de aerobe vergisters gestuurd. De totale hoeveelheid geproduceerd biogas bedraagt 122 Nm<sup>3</sup>/ton ethanol.

Het biogas afkomstig van de anaerobe digestie van organisch materiaal wordt verbrand samen met het biogas afkomstig van de anaerobe digestie van het water in een cogeneratiegroep volgens Vergelijking 28. De gassen afkomstig van de uitlaat van de fermentor worden teruggestuurd naar de elektriciteitscentrale en verbrand met vrijstelling van CO<sub>2</sub> volgens Vergelijking 28, Vergelijking 29 en Vergelijking 30.



pagina 96 van 205

### Totale massabalans

De finale massabalans voor de productie van 1 ton ethanol wordt weergegeven in Tabel 16.

Tabel 16: Finale massabalans voor de omzetting van CO en CO<sub>2</sub> aanwezig in de uitstoot van de hoogovens naar ethanol

| Component                                  | In (ton) | Uit (ton) |
|--------------------------------------------|----------|-----------|
| CO                                         | 4,25     | 0         |
| CO <sub>2</sub> *                          | 0,55     | 4,85      |
| H <sub>2</sub>                             | 0,06     | 0         |
| N <sub>2</sub>                             | 7,1      | 7,04      |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (m 99,8%) | 0,00     | 1,00      |

\*De reeds aanwezige directe CO<sub>2</sub>-emissies in de inputstroom die niet omgezet kunnen worden tot ethanol o.w.v. H<sub>2</sub>-limitatie, zijn niet mee in beschouwing genomen.

### Energiebalansen

#### Gasconditionering

In deze stap worden gassen voorbehandeld om onzuiverheden te verwijderen en wordt het gasmengsel samengedrukt tot 7 bar alvorens het naar de fermentatie eenheid te pompen. Het energieverbruik voor de voorbehandeling van het gasmengsel werd niet in rekening gebracht aangezien deze waarde verwaarloosbaar is. Het energieverbruik voor de compressie van het gasmengsel werd berekend conform de methanol case. Er wordt van uitgegaan dat het gasmengsel op 1 bar en 25°C samengedrukt wordt tot 7 bar. Verder wordt een polytrope tweetrapscompressie met een drukverhouding van 2,66 en rendement van 75% verondersteld. Het energieverbruik voor de compressie van het gasmengsel bedraagt 1,18 MWh<sub>el</sub>/ton ethanol.

#### Destillatie en dehydratatie

Om het energieverbruik voor het destilleren te berekenen, werd een inputstroom met 6 m% ethanol verondersteld. Verder wordt van een 90% stoomrendement uitgegaan. Verschillende dehydratatietechnieken zijn ter beschikking voor de productie van watervrij ethanol (Kumar et al., 2010). In deze studie wordt uitgegaan van dehydratatie met membranen. Het totale energieverbruik voor de destillatie en dehydratatie wordt geschat op 1 MWh<sub>th</sub>/ton ethanol (Vane, 2008). Vermits ArcelorMittal voldoende restwarmte ter beschikking heeft, wordt aangenomen dat restwarmte voor 50% van het thermisch energieverbruik ingezet wordt.

#### Verbranding van gassen

Het biogas afkomstig van de anaerobe digestie van organisch materiaal en water wordt verbrand voor elektriciteits- en stoomgeneratie (cogeneratie) en wordt terug in het proces benut. Rekening houdend met de calorische waarde van methaan, het beschikbare volume, en een elektrisch en thermisch rendement van respectievelijk 41% en 45%, wordt de opgewekte energie geschat op 0,46 MWh<sub>el</sub> en 0,50 MWh<sub>th</sub>.

De gassen afkomstig van de uitlaat van de fermentor worden verbrand voor elektriciteitsproductie in de elektriciteitscentrale. Rekening houdend met een elektrisch rendement van 43%, de verbrandingswarmte en het beschikbare volume van CO en H<sub>2</sub> bedraagt de elektriciteitsproductie 1,94 MWh<sub>el</sub>.

#### Rest van de site

Het energieverbruik voor de omzetting van syngas naar ethanol, waterbehandeling, enz. wordt geschat op 1,60 MWh<sub>el</sub>.

#### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 17.

Tabel 17: Energiebalans voor de productie van ethanol uit gassen afkomstig van hoogovens

| Unit                                   | Proces                           | Waarde | Eenheid                        |
|----------------------------------------|----------------------------------|--------|--------------------------------|
| Gas conditionering                     | Compressie                       | 1,18   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
| Recuperatie                            | Destillatie en dehydratatie      | 1,00   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |
| Co-generatie                           | Elektriciteit                    | 0,46   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
|                                        | Warmte                           | 0,50   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |
| Rest van de site                       | Fermentatie, waterbehandeling... | 1,60   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
| Restwarmte                             |                                  | 0,50   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |
| Totaal netto elektriciteitsverbruik    |                                  | 2,32   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
| Totaal netto thermisch energieverbruik |                                  | 0,00   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |

#### CO<sub>2</sub>-emissies

Een overzicht van de CO<sub>2</sub>-emissies is weergegeven in Tabel 18. Het proces zet CO om naar ethanol. Daarom is de vastgelegde CO<sub>2</sub> verwaarloosbaar en gaat het proces gepaard met emissies. Deze directe emissies van CO<sub>2</sub> vormen de hoofdmoot van de totale CO<sub>2</sub>-emissies. De CO<sub>2</sub>-emissies afkomstig van het energieverbruik liggen in dezelfde grootte orde als gerapporteerd door LanzaTech (Sectie 2.2.1.3, 0,75 ton CO<sub>2</sub>-emissies/ton ethanol) (Holmgren, 2013).

Tabel 18: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de synthese van ethanol uit CO<sub>2</sub>. Er werd verondersteld dat 50% restwarmte gebruikt wordt waarbij de CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan de productie van restwarmte verwaarloosd wordt

| CCU-scenario                                    | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Volledig hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                            |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | -0,44                  | -0,44            | -0,44                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 4,85                   | 4,85             | 4,85                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 0,66                   | 0,93             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
|                                                 |                        |                  |                                    |                                    |
| Netto                                           | 5,07                   | 5,34             | 4,41                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met laagwaardige restwarmte (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met laagwaardige restwarmte (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met laagwaardige restwarmte (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).



## Energiebalans

### Verbranding van gas

Het energieverbruik voor de verbrandingsstap werd berekend conform het CCU scenario. Rekening houdend met een elektrisch rendement van 43%, wordt de totale productie van elektriciteit op 6,22 MWh<sub>el</sub> geschat.

### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 20.

Tabel 20: Energiebalans voor de productie van elektriciteit door de verbranding van gas afkomstig uit uitstoot van hoogovens

| Unit                                  | Proces                      | Waarde | Eenheid                                    |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------|--------------------------------------------|
| <b>Verbranding</b>                    | Productie van elektriciteit | 6,22   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol-equivalent* |
| <b>Totaal elektriciteitsproductie</b> |                             | 6,22   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol-equivalent* |

\*De berekeningen in dit referentiescenario werden uitgevoerd voor dezelfde hoeveelheid gas die in het CCU-scenario resulteren in 1 ton ethanol.

## CO<sub>2</sub>-emissies

De CO<sub>2</sub>-emissie is volledig te wijten aan de verbranding van gas afkomstig uit de uitstoot van hoogovens.

Tabel 21: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de synthese van ethanol uit CO<sub>2</sub>

| Referentiescenario 1                                 | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Volledig hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                            |
|------------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Vastgelegde CO<sub>2</sub></b>                    | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| <b>Directe CO<sub>2</sub>-emissie</b>                | 6,68                   | 6,68             | 6,68                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| <b>Indirecte CO<sub>2</sub>-emissie (elektrisch)</b> | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| <b>Indirecte CO<sub>2</sub>-emissie (thermisch)</b>  | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| <b>Netto</b>                                         | 6,68                   | 6,68             | 6,68                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,237 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).





## Massabalans

De omzetting van etheen en stoom naar ethanol gebeurt volgens Vergelijking 31. Hoewel de stoechiometrische verhouding water:etheen 1 bedraagt, wordt in de reactor een molaire ratio water:etheen van 0,6:1 gehanteerd om het uitwassen van katalysator te voorkomen. Rekening houdend met een omzettingsrendement van 4% per passage en totaal rendement van 95% en molaire ratio water:etheen 0,6:1 is dan 0,65 ton etheen en 9,27 ton stoom nodig voor 1 ton ethanol (Asinger, 1968; Del Borghi et al., 1998).



De massabalans voor het kraken van nafta tot etheen wordt geschat op 2,90 ton nafta/ton etheen (Joosten, 1998). Naast etheen wordt ook o.a. propyleen, CH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub> gevormd (Figuur 28).

De finale massabalans voor de productie van 1 ton ethanol uit nafta wordt weergegeven in Tabel 22.

Tabel 22: Finale massabalans voor de productie van ethanol uit nafta. De co-producten uitstoomkraken zijn niet vermeld in de tabel

| Component                        | In (ton) | Uit (ton) |
|----------------------------------|----------|-----------|
| Nafta                            | 1,88     | 0,00      |
| Water                            | 9,27     | 0,00      |
| Etheen                           | 0,00     | 0,04      |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   | 0,00067  | 0,00      |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 0,00     | 1,00      |

## Energiebalans

Del Borghi et al. (1998) gaven aan dat etheen productie en concentratie, fosforzuur productie, NaOH productie, verwarmen en comprimeren van etheen, verpompen van gassen, en destillatie van ethanol de belangrijkste processtappen zijn betreffende het energieverbruik. In deze analyse werd om deze reden een vereenvoudigde berekening uitgevoerd van de meest energie-intensieve stappen.

## Stoomkraken

Energie is nodig voor de verwarming van nafta (65%), compressie na reactie (15%) en product scheiding (20%) (Heijningen et al., 1992). Het thermisch energieverbruik voor 1 ton etheen wordt geschat op 20,1 GJ/ton etheen of 3,63 MWh<sub>th</sub>/ton ethanol (Patel, 1996). Het elektriciteitsverbruik is veel lager en bedraagt 0,08 MWh<sub>el</sub>/ton etheen of 0,05 MWh<sub>el</sub>/ton ethanol (Patel, 1996).

## Compressie

Het totale energieverbruik voor de compressie van etheen tot 70 bar werd berekend conform de methanol case (Sectie 4.1.1.1) en bedraagt 0,07 MWh<sub>el</sub>/ton ethanol.

[illegible]

### Reactie

De synthese van ethanol door een additie van stoom aan etheen is een exotherme reactie (Vergelijking 31). Deze thermische energie werd in deze analyse niet gerecupereerd of gevaloriseerd.

### Destillatie

Het totale energieverbruik voor de destillatie van een 9,5 m% ethanol-water mengsel tot de azeotroop met een stoomrendement van 90% wordt geschat op 0,88 MWh<sub>th</sub>/ton ethanol (Vane, 2008).

### Dehydratatie

Dehydratatie van het azeotroop mengsel naar 99,8 m% ethanol wordt geschat op 0,48 MWh<sub>th</sub>/ton ethanol (Dias et al., 2012).

### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 23. De productie van etheen uit nafta is de meest energie-intensieve processtap. Doordat enkel de meest energie-intensieve processtappen in rekening werden gebracht, is het geschatte energieverbruik lager vergeleken met Del Borghi et al. (1998) (7,22 MWh/ton ethanol).

Tabel 23: Energiebalans voor de productie van ethanol uit nafta

| Unit                             | Proces                | Waarde | Eenheid                        |
|----------------------------------|-----------------------|--------|--------------------------------|
| Stoomkraken                      | Productie van etheen  | 3,63   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |
|                                  | Productie van etheen  | 0,05   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
| Compressie                       | Compressie van etheen | 0,07   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
| Scheiding                        | Destillatie           | 0,88   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |
|                                  | Dehydratatie          | 0,48   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |
| Totaal elektriciteitsverbruik    |                       | 0,12   | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol |
| Totaal thermisch energieverbruik |                       | 4,99   | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol |

### CO<sub>2</sub>-emissies

Stoomkraken van nafta vormt de hoofdmoot van het totale energieverbruik (Tabel 24). De geschatte CO<sub>2</sub> voetafdruk ligt in de lijn met de CO<sub>2</sub>-emissie bekomen uit de ecoinvent database die 1,17 CO<sub>2</sub> equivalenten/ton ethanol in West-Europa bedraagt.

Tabel 24: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de synthese van ethanol uit nafta

| Referentiescenario 2                            | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Volledig hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                            |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 0,04                   | 0,05             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 1,01                   | 1,18             | 1,01                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |
|                                                 |                        |                  |                                    |                                    |
| Netto                                           | 1,04                   | 1,23             | 1,01                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton ethanol |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,237 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

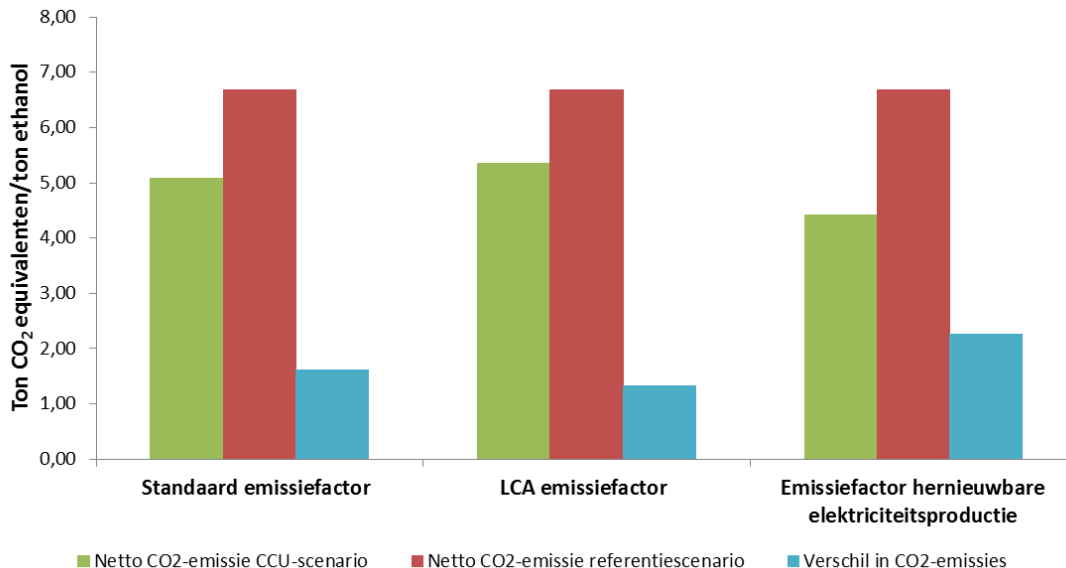
#### 4.1.2.3 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing met als referentieproces de productie van elektriciteit uit CO (referentiescenario 1)

##### Massa- en energiebalansen

De productie van ethanol uit CO/CO<sub>2</sub> draagt bij tot een CO<sub>2</sub>-besparing van gemiddeld een 1,73 ton CO<sub>2</sub>-emissie/ton ethanol in vergelijking met elektriciteitsproductie (Tabel 14 en Figuur 29). Dit komt overeen met de algemene info van LanzaTech (Sectie 2.2.1.4, Holmgren, 2013). Er werd wel verondersteld dat het verlies aan opgewekte energie in Knippegroen door de productie van ethanol (4,28 MWh<sub>el</sub>/ton ethanol) volledig vervangen wordt door hernieuwbare energie om deze CO<sub>2</sub> besparing te garanderen.

Tabel 25: Vergelijking van de massa- en energiebalans voor de synthese van ethanol uit CO/CO<sub>2</sub> (CCU-scenario) en de productie van elektriciteit uit CO (referentiescenario 1). Er werd verondersteld dat in het CCU-scenario 50% restwarmte gebruikt wordt waarbij de CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan de productie van restwarmte verwaarloosd wordt

|                                              | CCU-scenario | Referentiescenario 1 | Eenheid                          |
|----------------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                  | -0,44        | 0,00                 | ton CO <sub>2</sub> /ton ethanol |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie             | 4,85         | 6,68                 | ton CO <sub>2</sub> /ton ethanol |
| Totaal netto elektriciteitsverbruik          | 2,32         | 0,00                 | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol   |
| Totaal thermisch energieverbruik             | 0,00         | 0,00                 | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol   |
| Totaal elektriciteitsproductie (Knippegroen) | 1,94         | 6,22                 | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol   |



Figuur 29: Netto CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van ethanol (CCU-scenario) en elektriciteit (referentiescenario 1) uit CO en het verschil in CO<sub>2</sub>-emissies van beide scenario's

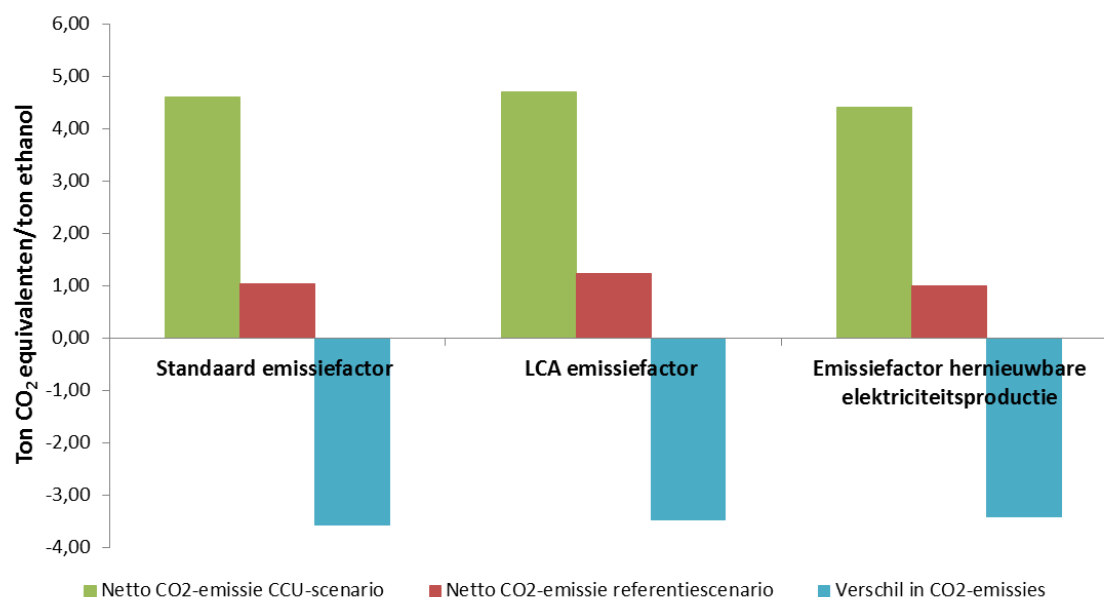
#### 4.1.2.4 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing met als referentieproces de productie van ethanol uit etheen (referentiescenario 2)

##### Massa- en energiebalansen

De productie van ethanol uit CO/CO<sub>2</sub> heeft een grotere milieu-impact in termen van CO<sub>2</sub> als gevolg van directe CO<sub>2</sub>-emissies in vergelijking met de klassieke ethanol productie. Zelfs indien een groter energieverbruik toegekend wordt aan het referentieproces conform de studie van Del Borghi et al. (1998), blijft de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van het CCU-scenario groter. Er dient wel opgemerkt te worden dat bij productie van ethanol via referentiescenario 2 het hoogovengas nog altijd verbrand moet worden, wat resulteert in extra CO<sub>2</sub>-emissies. Dit aspect wordt verder toegelicht in Sectie 4.2.5.

Tabel 26: Vergelijking van de massa- en energiebalans voor de synthese van ethanol uit CO/CO<sub>2</sub> (CCU-scenario) en etheen (referentiescenario 2). Er werd verondersteld dat in het CCU-scenario 50% restwarmte gebruikt wordt waarbij de CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan de productie van restwarmte verwaarloosd wordt

|                                              | CCU-scenario | Referentiescenario 2 | Eenheid                          |
|----------------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                  | -0,44        | 0,00                 | ton CO <sub>2</sub> /ton ethanol |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie             | 4,85         | 0,00                 | ton CO <sub>2</sub> /ton ethanol |
| Totaal netto elektriciteitsverbruik          | 2,32         | 0,12                 | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol   |
| Totaal thermisch energieverbruik             | 0,00         | 4,99                 | MWh <sub>th</sub> /ton ethanol   |
| Totaal elektriciteitsproductie (Knippegroen) | 1,94         | 0,00                 | MWh <sub>el</sub> /ton ethanol   |



Figuur 30: Netto CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van ethanol uit CO/CO<sub>2</sub> (CCU-scenario) en nafta (referentiescenario 2) en het verschil in CO<sub>2</sub>-emissies van beide scenario's

### 4.1.3 Micro-algen

#### 4.1.3.1 CCU-scenario

##### Blokschema

Het blokschema voor de productie van micro-algen is weergegeven in Figuur 31. Het cultivatieproces is gebaseerd op de studie van Taelman et al. (2013) waar *Nannochloropsis* sp. voor aquacultuur geproduceerd werden in de ProviAPT fotobioreactor onder gecontroleerde omstandigheden in aanwezigheid van CO<sub>2</sub>, licht, (zout)water en nutriënten (Sectie 2.2.6.1). De gebruikte procesparameters voor cultivatie van *Nannochloropsis* sp. zijn weergegeven in Tabel 27. Na cultivatie worden de micro-algen centrifugaal gescheiden van het groeimedum. De algenoogst verhoogt de biomassaconcentratie van 2,1 g/L droge biomassa naar 120 g/L droge biomassa (Molina Grima et al., 2003). In deze studie werd aangenomen dat het (zout)water voor 90% gerecycleerd wordt. In de laatste stap wordt de algenpasta gedroogd tot een finale droge biomassa concentratie van 94,72% (Leach et al., 1998). Verschillende technieken zijn ter beschikking voor het drogen van biomassa. In deze studie wordt uitgegaan van sproeidrogen.

Tabel 27: Procesparameters voor de cultivatie van *Nannochloropsis* sp. in gesloten fotobioreactor (ProviAPT)

| Parameters                                                         | Waarden                  | Referenties                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Locatie                                                            | België                   |                                                                                                                                                       |
| Initiële (droge) biomassaconcentratie                              | 1 g/L                    | Quinn et al. (2012)                                                                                                                                   |
| Finale (droge) biomassaconcentratie                                | 2,1 g/L                  | Taelman et al. (2013)                                                                                                                                 |
| Volumetrische productiviteit                                       | 0,53 g/L/d               | Taelman et al. (2013)                                                                                                                                 |
| CO <sub>2</sub> opname efficiëntie                                 | 75%                      | Acién et al. (2012)                                                                                                                                   |
| Areaal productiviteit                                              | 4,59 g/m <sup>2</sup> /d | Taelman et al. (2013)                                                                                                                                 |
| Cultivatieperiode                                                  | maart t.e.m. oktober     |                                                                                                                                                       |
| Operationele tewerkstellingsgraad<br>(uitgedrukt per kalenderjaar) | 67%                      |                                                                                                                                                       |
| Gemiddelde temperatuur                                             | 13,6°C                   | <a href="http://www.meteo.be/meteo/view/nl/360955-Maandelijkse+normalen.html">http://www.meteo.be/meteo/view/nl/360955-Maandelijkse+normalen.html</a> |



## Massabalans

Als optimale zoutconcentratie voor *Nannochloropsis* werd 22 g/kg verondersteld (Bartley et al., 2013). De samenstelling van het groeimedium is gebaseerd op Tafreshi en Shariati (2006) en San Pedro et al. (2015) (Tabel 28). Naast de aanwezigheid van 2 mM NaHCO<sub>3</sub> als koolstofbron (García-González et al., 2003), werd ook CO<sub>2</sub> toegevoegd. Hierbij werd aangenomen dat 1,83 ton CO<sub>2</sub> per ton droge biomassa ingebouwd wordt (Buehner et al., 2009) met een CO<sub>2</sub> opname efficiëntie van 75% (Acién et al., 2012). De fractie van CO<sub>2</sub> die niet verbruikt wordt door de micro-algen, wordt uitgestoten.

De finale massabalans voor de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (ProviAPT) is weergegeven Tabel 29. De nutriënten omvatten naast de componenten van het groeimedium ook  $\text{NaHCO}_3$ .

Tabel 28: Samenstelling van het groeimedum voor *Nannochloropsis* sp

| Component                            | Hoeveelheid (mM) |
|--------------------------------------|------------------|
| KNO <sub>3</sub>                     | 10,5             |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>      | 0,80             |
| MgSO <sub>4</sub>                    | 2,00             |
| FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O | 0,01             |

Tabel 29: Massabalans voor productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (ProviAPT)

| Component        | In     | Uit           | Eenheid        |
|------------------|--------|---------------|----------------|
| Zout             | 1,30   | In afvalwater | ton            |
| H <sub>2</sub> O | 52,53  | In afvalwater | m <sup>3</sup> |
| CO <sub>2</sub>  | 2,67   | 0,68          | ton            |
| Nutriënten       | 784,88 | Niet bepaald  | kg             |
| Droge biomassa   | 0,00   | 1,00          | ton            |
| Afvalwater       | 0,00   | 101,32        | m <sup>3</sup> |
| O <sub>2</sub>   | 0,00   | 1,16          | ton            |
| NH <sub>3</sub>  | 0,00   | 3,04          | kg             |
| N <sub>2</sub> O | 0,00   | 0,47          | kg             |

## Energiebalans

## Cultivatie

Het energieverbruik voor de ProviAPT bioreactor bedraagt 5 W/m<sup>2</sup> (Michiels, 2013) of 28,37 MWh<sub>el</sub>/ton droge biomassa.

## Oogsten

De centrifuge heeft een biomassarendement van 97% en de energieconsumptie bedraagt 1,4 kWh/m<sup>3</sup> cultuurmedium (Milledge en Heaven 2011). De algenooft verbruikt 0,73 MWh<sub>e</sub>/ton droge biomassa.

////////////////////////////////////

### Drogen

De energie nodig om de biomassafractie te drogen tot 94,72% (Leach et al., 1998) via sproeidrogen bedraagt 1,4 MWh/kg verwijderd water (Thomassen et al., 2016) of 10,9 MWh<sub>el</sub>/ton droge biomassa.

### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 30. De opkweek van de micro-algen vormt de hoofdmoot van het totale energieverbruik.

Tabel 30: Energiebalans voor de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (ProviAPT)

| Unit                             | Proces                         | Waarde | Eenheid                               |
|----------------------------------|--------------------------------|--------|---------------------------------------|
| Cultivatie                       | Opkweek van micro-algen        | 28,37  | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Oogsten                          | Opconcentreren van micro-algen | 0,73   | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Drogen                           | Sproeidrogen                   | 10,92  | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Totaal elektriciteitsverbruik    |                                | 40,03  | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Totaal thermisch energieverbruik |                                | 0,00   | MWh <sub>th</sub> /ton droge biomassa |

### CO<sub>2</sub>-emissies

Hoewel de micro-alg tijdens de cultivatie een grote hoeveelheid CO<sub>2</sub> fixeert, gaat het productieproces gepaard met een CO<sub>2</sub>-emissie omwille van het grote energieverbruik (Tabel 31). De vaststelling is conform de studie van Taelman et al. (2013).

Tabel 31: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (ProviAPT)

| CCU-scenario                                    | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Volledig hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                                   |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | -1,99                  | -1,99            | -1,99                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 0,68                   | 0,68             | 0,68                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 11,41                  | 16,09            | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Netto                                           | 10,10                  | 14,78            | -1,31                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en thermische energie met aardgas als brandstof (0,237 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

#### 4.1.3.2 Referentiescenario

##### Blokschema

Als referentiescenario werd gekozen voor de productie van micro-algen in een open vijversysteem (Figuur 32). Dit zijn ondiepe kanalen die aan de kopse kanten met elkaar verbonden zijn en waarbij het water voortdurend wordt rondgepompt. Het rondpompen van het water is nodig om te voorkomen dat de algen in de vijver bezinken en om een gelijkmatige blootstelling aan licht te creëren. Vermits de natuurlijke CO<sub>2</sub> concentratie in de lucht (0,03%-0,06%) dikwijls niet voldoende is voor de algenkweek, is verrijking van CO<sub>2</sub> in de algenvijvers nodig.

De processtappen in een open systeem zijn gelijkaardig aan de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (Sectie 4.1.3.1). De groeifase is gebaseerd op een studie van Crowe et al. (2012). De gebruikte procesparameters zijn weergegeven in Tabel 32. Na cultivatie worden de micro-algen centrifugaal gescheiden van groeimedium. De algenoogst verhoogt de biomassaconcentratie van 0,38 g/L droge biomassa naar 120 g/L droge biomassa (Molina Grima et al., 2003). In deze studie werd aangenomen dat het (zout)water voor 90% gerecycleerd wordt. In de laatste stap wordt de algenpasta met behulp van een sproeidroger gedroogd tot een finale droge biomassaconcentratie van 94,72% (Leach et al., 1998).

Tabel 32: Procesparameters voor de cultivatie van *Nannochloropsis* sp. in open vijversysteem

| Parameters                            | Waarden              | Referenties                                                                                                                                           |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Locatie                               | België               |                                                                                                                                                       |
| Initiële (droge) biomassaconcentratie | 0,2 g/L              | Crowe et al. (2012)                                                                                                                                   |
| Finale (droge) biomassaconcentratie   | 0,38 g/L             | Norsker et al. (2011)                                                                                                                                 |
| Volumetrische productiviteit          | 0,013 g/L/d          | Crowe et al. (2012)                                                                                                                                   |
| CO <sub>2</sub> opname efficiëntie    | 45%                  | Pires et al. (2012)                                                                                                                                   |
| Cultivatieperiode                     | maart t.e.m. oktober |                                                                                                                                                       |
| Operationele tewerkstellingsgraad     | 67 %                 |                                                                                                                                                       |
| Gemiddelde temperatuur                | 13,6°C               | <a href="http://www.meteo.be/meteo/view/nl/360955-Maandelijkse+normalen.html">http://www.meteo.be/meteo/view/nl/360955-Maandelijkse+normalen.html</a> |



## Massabalans

De samenstelling van het groeimedium (Tabel 28) en zoutconcentraties zijn identiek aan het CCU-scenario. Naast de aanwezigheid van 2 mM NaHCO<sub>3</sub> als koolstofbron, werd ook CO<sub>2</sub> toegevoegd met een CO<sub>2</sub> opname efficiëntie van 45% (Pires et al., 2012). Identiek aan het CCU-scenario wordt de fractie aan niet verbruikte CO<sub>2</sub> uitgestoten.

De finale massabalans voor de productie van micro-algen in een open systeem is weergegeven in Tabel 35. De nutriënten omvatten naast de componenten van het groeimedium ook  $\text{NaHCO}_3$ .

Tabel 33: Massabalans voor productie van micro-algen in een open viiversysteem

| Component        | In     | Uit           | Eenheid        |
|------------------|--------|---------------|----------------|
| Zout             | 7,11   | In afvalwater | ton            |
| H <sub>2</sub> O | 316,59 | In afvalwater | m <sup>3</sup> |
| CO <sub>2</sub>  | 4,40   | 2,42          | ton            |
| Nutriënten       | 4.339  | Niet bepaald  | kg             |
| Droge biomassa   | 0,00   | 1,00          | ton            |
| Afvalwater       | 0,00   | 319,82        | m <sup>3</sup> |
| O <sub>2</sub>   | 0,00   | 1,16          | ton            |
| NH <sub>3</sub>  | 0,00   | 16,81         | kg             |
| N <sub>2</sub> O | 0,00   | 0,02          | kg             |

## Energiebalans

## Cultivatie

Het energieverbruik is opgedeeld in 3 fracties: CO<sub>2</sub> injectie, mengen en bereiden van het groeimedum (Acien et al., 2012; Kadam, 2001; Jorquera et al., 2010). De totale elektrische energieconsumptie bedraagt 3,99 MWh<sub>el</sub>/ton droge biomassa.

## Oogsten en drogen

De algenoogst en het drogen van algen werden berekend conform het CCU-scenario (Sectie 4.1.3.1) en bedragen respectievelijk 4,02 MWh<sub>e</sub>/ton droge biomassa en 10,9 MWh<sub>e</sub>/ton droge biomassa.

### Totale energiebalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 34. Hier vormt het drogen van de micro-algen de hoofdmoot van het totale energieverbruik.

////////////////////////////////////

| Unit                             | Proces                         | Waarde | Eenheid                               |
|----------------------------------|--------------------------------|--------|---------------------------------------|
| Cultivatatie                     | Opkweek van micro-algen        | 3,99   | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Oogsten                          | Opconcentreren van micro-algen | 4,02   | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Drogen                           | Spreeidrogen                   | 10,92  | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
|                                  |                                |        |                                       |
| Totaal elektriciteitsverbruik    |                                | 18,93  | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa |
| Totaal thermisch energieverbruik |                                | 0,00   | MWh <sub>th</sub> /ton droge biomassa |

De productie van micro-algen in een open systeem gaat gepaard met een aanzienlijke CO<sub>2</sub>-voetafdruk (Tabel 35). Gelijkaardig aan het CCU-scenario maken de indirecte CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan het energieverbruik de hoofdmoot uit van de CO<sub>2</sub>-emissies.

| Referentiescenario                              | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Volledig hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                                   |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | -1,99                  | -1,99            | -1,99                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 2,42                   | 2,42             | 2,42                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 5,40                   | 7,61             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 0,00                   | 0,00             | 0,00                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |
|                                                 |                        |                  |                                    |                                           |
| Netto                                           | 5,83                   | 8,04             | 0,43                               | ton CO <sub>2</sub> eq/ton droge biomassa |

<sup>3</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas als brandstof (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>).

#### 4.1.3.3 Potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing

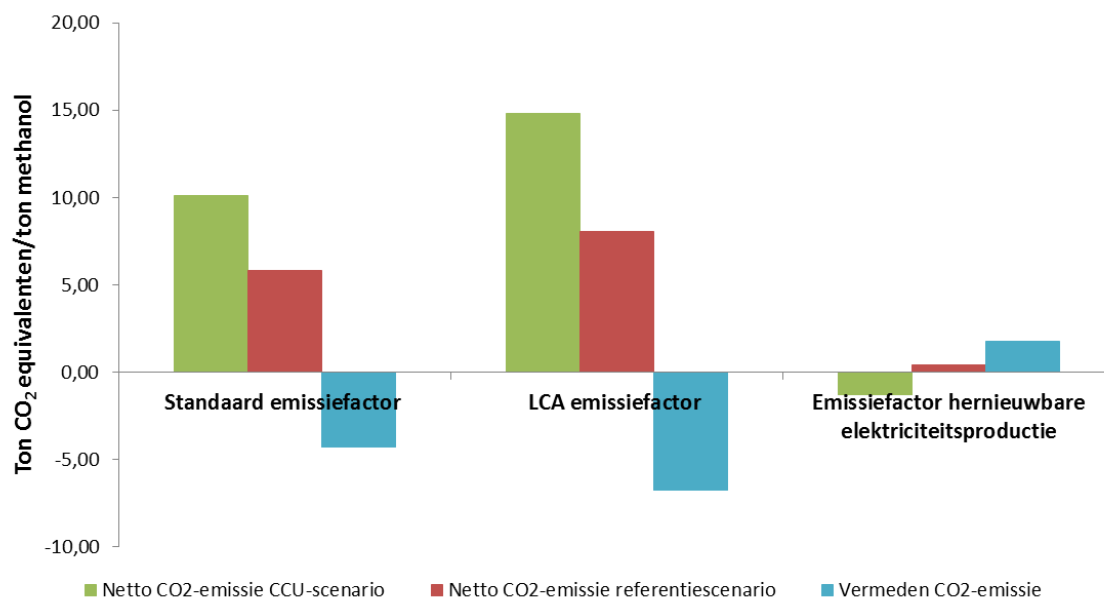
Tabel 36 geeft de massa- en energiebalans voor beide scenario's weer. De vastlegging van CO<sub>2</sub> in biomassa wordt bepaald door de massabalans en is bijgevolg in beide scenario's even groot. Conform de literatuur is het energieverbruik in een gesloten fotobioreactor groter dan een open vijversysteem. De verliezen (CO<sub>2</sub>, zouten, water, nutriënten) zijn in een gesloten systeem lager in vergelijking met open vijvers. Dit vertaalt zich in een grotere directe CO<sub>2</sub>-emissie door de lagere CO<sub>2</sub> opname efficiëntie (Pires et al., 2012). Er dient opgemerkt te worden dat in deze ruwe analyse geen CO<sub>2</sub>-emissiefactoren werden toegekend aan de productie van nutriënten, zouten en (afval)water. De studie van Taelman et al. (2013) geeft echter aan dat deze indirecte CO<sub>2</sub>-bijdragen significant zijn. Zo draagt de productie van nutriënten voor 9% bij tot de totale CO<sub>2</sub>-emissies in de cultivatie van micro-algen in ProviAPT fotobioreactoren in België.

Bijgevolg kan samenvattend gesteld worden dat ongeacht het cultivatiesysteem, de productie van micro-algen voor aquacultuur gepaard gaat met een CO<sub>2</sub>-emissie. De milieu impact in termen van CO<sub>2</sub> van een open vijversysteem is onder de gemaakte assumpties gunstiger in vergelijking met een gesloten fotobioreactor omwille van het groter energieverbruik. Er dient opgemerkt te worden dat de kweek van een monocultuur in een open systeem bijzonder moeilijk is o.w.v. verhoogd risico op contaminatie. Een gedetailleerd procesontwerp dat rekening houdt met de reinigingsfrequentie en indirecte CO<sub>2</sub>-voetafdruk van nutriënten, zouten en (afval)water dient in een vervolgstadium uitgevoerd te worden om de analyse verder te verfijnen. Het gebruik van afvalwater, de ontwikkeling van meer duurzame processen, het gebruik van hernieuwbare energie en afgassen zal de CO<sub>2</sub>-voetafdruk aanzienlijk verlagen. Recycleren van de uitlaatgassen draagt ook bij tot een meer positieve milieu impact, maar hierbij dient vermeden te worden dat O<sub>2</sub> (geproduceerd tijdens de groei van de micro-algen) toxisch wordt voor de micro-algen (Sectie 2.2.6.3). Taelman et al. (2013) toonden inderdaad via simulaties aan dat het mogelijk kan zijn om de voetafdruk met een factor 7 te verlagen door gebruik te maken van afvalstromen en meer efficiënte procesinfrastructuur in een warmer klimaat zoals Spanje. Desondanks was de CO<sub>2</sub>-voetafdruk groter dan deze van klassiek traditioneel visvoer voor pangasius juveniles geproduceerd uit terrestrische biomassa zoals rijst en tarwe (Taelman et al., 2013).

Tabel 36: Vergelijking van massa- en energiebalans voor de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (CCU-scenario) en open vijvers (referentiescenario)

|                                  | CCU-scenario | Referentiescenario | Eenheid                                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------|-----------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>      | -1,99        | -1,99              | ton CO <sub>2</sub> /ton droge biomassa |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie | 0,68         | 2,42               | ton CO <sub>2</sub> /ton droge biomassa |
| Totaal elektriciteitsverbruik    | 40,03        | 18,93              | MWh <sub>el</sub> /ton droge biomassa   |
| Totaal thermisch energieverbruik | 0,00         | 0,00               | MWh <sub>th</sub> /ton droge biomassa   |

////////////////////////////////////



Figuur 33: Netto CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van micro-algen in een gesloten fotobioreactor (CCU-scenario) en open vijver (referentiescenario) en het verschil in CO<sub>2</sub>-emissies van beide scenario's

#### 4.1.4 Constructiemateriaal

#### 4.1.4.1 CCU-scenario

Er bestaan twee varianten van het Carbstone proces: een lage druk proces voor aanmaak van standaard bouwmaterialen (druksterkte tot 50 MPa) en een hoge druk proces voor de aanmaak van hoogwaardige bouwmaterialen met specifieke eigenschappen (druksterkte > 50 MPa). In dit document werd het lage druk proces geselecteerd vermits dit proces wellicht eerst gecommmercialiseerd zal worden in Vlaanderen. Voor het doorrekenen van het lage druk scenario wordt uitgegaan van een receptuur waarbij de minerale grondstofmix bestaat uit een mengsel van 50% gedroogde fijnkorrelige staalslakken en 50% grof stinox zand. Beide grondstoffen zijn afkomstig uit het metaalrecuperatieproces van de firma RECMIX te Genk waarbij RVS staalslakken als basisgrondstof ingezet worden. Deze receptuur geeft aanleiding tot carbonaatstenen met een sterkte van 43 MPa, 2,5% totale koolstof (TC, *Total Carbon*) en een dichtheid van 2300 kg/m<sup>3</sup>.

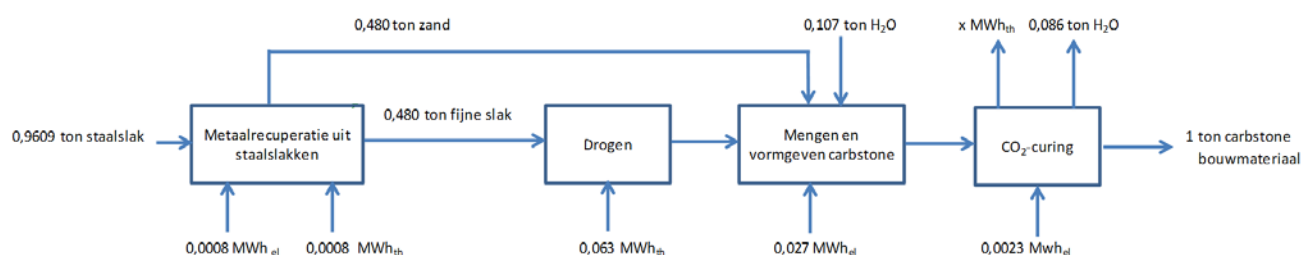
### Blokschema

Het blokschema voor de productie van bouwmaterialen op basis van carbonatatie is weergegeven in Figuur 34. CO<sub>2</sub> is afkomstig van puntbronnen. Staalslakken (0-60 mm) die ontstaan bij de productie van staal worden als minerale basisgrondstof gebruikt. In een eerste stap wordt het metaal gerecupereerd uit de staalslakken door middel van een mechanisch verwerkingsproces. Hierbij ontstaan de volgende vermarktbare producten: stinox (grind), stinox zand, metaal en fijne slakken. Het grind en het zand zijn BENOR gecertificeerd en worden als traditionele bouwmaterialen vermarkt. Het metaal wordt terug ingezet als grondstof voor de productie van staal. In deze studie wordt het scenario bekeken waarbij het stinox zand en de fijne slakken als input worden gebruikt voor het carbonatatieproces. Het zand kan rechtstreeks ingezet worden in het carbonatatieproces. De fijne slakken worden echter eerst gedroogd vooraleer ze als input gebruikt worden. Voor het drogen van de fijne staalslakken voorziet men laagwaardige restwarmte te gebruiken van een nabijgelegen bedrijf mogelijk in combinatie met warmte opgewekt in een WKK installatie op de eigen site. Merk op dat voor het opmaken van de massabalans weergegeven in het blokschema (Figuur 34) enkel de fractie staalslakken wordt weergegeven die gebruikt wordt voor de aanmaak van 1 ton Carbstone.

De eerste stap in het carbonatatieproces betreft het intensief mengen van de minerale grondstoffen met water. Dit mengsel wordt vervolgens vormgegeven via compactatie (persen). Voor het lage druk proces verloopt het mengen en het persen op dezelfde wijze als in een traditionele betonplant. De groene bouwmaterialen (die de gewenste afmetingen hebben maar slechts minimale sterkte) worden vervolgens in een klimaatkamer of reactor geplaatst waar ze in contact worden gebracht met CO<sub>2</sub> bij verhoogde druk (0.5 bar). De CO<sub>2</sub>-curing gebeurt hier in een CO<sub>2</sub> (>90%) atmosfeer. Op de beoogde site zijn er mogelijkheden om CO<sub>2</sub> te gebruiken die als reststroom gegeneerd wordt in een nabijgelegen industrieel bedrijf. Deze reststroom kan zonder verdere zuivering of opconcentratie ingezet worden in het Carbstone proces. Om de CO<sub>2</sub> stroom op gepaste wijze te kunnen doseren in de CO<sub>2</sub>-curing kamer zal de binnenkomende CO<sub>2</sub> wel gecompriëerd worden tot 5 bar.

////////////////////////////////////

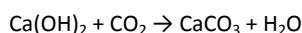
Tijdens de CO<sub>2</sub>-curing worden door de reactie van CO<sub>2</sub> met de Ca/Mg-mineralen (silicaten, hydroxides) aanwezig in de staalslakken carbonaten gevormd die zorgen voor de nodige sterkteontwikkeling. De bouwmaterialen die uit de klimaatkamer of reactor komen zijn direct klaar voor gebruik.



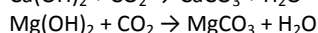
Figuur 34: Blokschema voor de productie van bouwmaterialen uit staalslakken en CO<sub>2</sub>. De massa- en energiebalansen (uitgedrukt per ton bouw materiaal geproduceerd) worden in de tekst toegelicht.

### Massabalansen

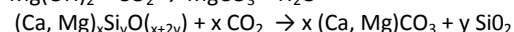
Vergelijking 32, Vergelijking 33 en Vergelijking 34 geven de reacties weer tussen CO<sub>2</sub> en de Ca/Mg mineralen aanwezig in de minerale reststoffen.



(Vergelijking 32)



(Vergelijking 33)



(Vergelijking 34)

Omdat de finale massabalans (Tabel 37) bepaald wordt door diverse factoren (mineralogische samenstelling van uitgangspunt, reactiekinetiek, ...), werd ze experimenteel bepaald. In deze studie werd uitgegaan van een TC waarde van 2,5%.

Tabel 37: Massabalansen voor de productie van 1 ton Carbstone bouw materiaal

| Component        | In (ton) | Uit (ton) |
|------------------|----------|-----------|
| Fijne staalslak  | 0,480    | 0,000     |
| CO <sub>2</sub>  | 0,092    | 0,000     |
| Stinox zand      | 0,480    | 0,000     |
| H <sub>2</sub> O | 0,107    | 0,086     |
| Carbstone        | 0,000    | 1,000     |

### Energiebalansen

#### Metaalrecuperatie staalslak

Zowel het stinox zand als de fijne slak zijn minerale grondstoffen die als co-producten ontstaan bij de herwinning van metaal uit staalslakken conform het RECMIX proces. Om de energie-input van dit verwerkingsproces correct te kunnen toekennen aan de verschillende vermarktbaar producten werd een allocatie op basis van economische waarde van de diverse producten gehanteerd. In het blokschema in Figuur 34 wordt enkel de energie weergegeven die werd gealloceerd aan het stinox zand en de fijne slak nodig voor



## CO<sub>2</sub>-emissions

De netto CO<sub>2</sub>-uitstoot werd berekend voor 2 scenario's: het thermisch drogen op basis van aardgas (Tabel 39) en drogen op basis van laagwaardige restwarmte (Tabel 40).

De netto CO<sub>2</sub> vastlegging voor de productie van Carbstone bouwmaterialen bedraagt in België 65 tot 92 kg CO<sub>2</sub> equivalenten /ton Carbstone bouw materiaal (Tabel 39 en Tabel 40). Vermits in de bouwindustrie de emissies vaak worden uitgedrukt per m<sup>3</sup> werden deze waarden omgerekend uitgaande van een dichtheid van 2300 kg/m<sup>3</sup>. De netto CO<sub>2</sub> vastlegging voor de productie van Carbstone bouwmaterialen bedraagt in België 149 tot 212 kg CO<sub>2</sub> equivalenten /m<sup>3</sup> Carbstone.

Tabel 39: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van Carbstone bouwmaterialen uit staalslakken en CO<sub>2</sub>. In dit scenario werd verondersteld dat de thermische energie voor het drogen van de fijne slak geproduceerd wordt door het verbranden van aardgas

| CCU-scenario                                    | Standaard | LCA    | Volledig<br>hernieuwbaar | Eenheid                                             |
|-------------------------------------------------|-----------|--------|--------------------------|-----------------------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | -0,092    | -0,092 | -0,092                   | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 0,000     | 0,000  | 0,000                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 0,009     | 0,012  | 0,000                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 0,013     | 0,015  | 0,013                    | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
|                                                 |           |        |                          |                                                     |
| Netto                                           | -0,071    | -0,065 | -0,079                   | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |

<sup>1</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>), thermische energie met aardgas en biodiesel als brandstof voor het drogen van de fijne slak (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) en het transport van grondstoffen (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) respectievelijk.

<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>), thermische energie met aardgas en biodiesel als brandstof voor het drogen van de fijne slak (0,237 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) en het transport van grondstoffen (0,156 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) respectievelijk.

<sup>3</sup> De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met aardgas (0,202 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) of biodiesel (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) als brandstof.

Tabel 40: Overzicht van CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van Carbstone bouwmaterialen uit staalslakken en CO<sub>2</sub>. In dit scenario werd verondersteld dat laagwaardige restwarmte gebruikt wordt voor het drogen van de fijne slak waarbij de CO<sub>2</sub>-emissies gerelateerd aan de productie van restwarmte verwaarloosd wordt

| CCU-scenario                                    | Standaard <sup>1</sup> | LCA <sup>2</sup> | Volledig hernieuwbaar <sup>3</sup> | Eenheid                                             |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Vastgelegde CO <sub>2</sub>                     | -0,092                 | -0,092           | -0,092                             | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
| Directe CO <sub>2</sub> -emissie                | 0,000                  | 0,000            | 0,000                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (elektrisch) | 0,009                  | 0,012            | 0,000                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
| Indirecte CO <sub>2</sub> -emissie (thermisch)  | 0,000                  | 0,000            | 0,000                              | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |
|                                                 |                        |                  |                                    |                                                     |
| Netto                                           | -0,083                 | -0,080           | -0,092                             | ton CO <sub>2</sub> eq/ton Carbstone bouw materiaal |

<sup>1</sup> De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de standaard emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,285 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>), thermische energie met laagwaardige restwarmte en biodiesel als brandstof voor het drogen van de fijne slak (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) en het transport van grondstoffen (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) respectievelijk.

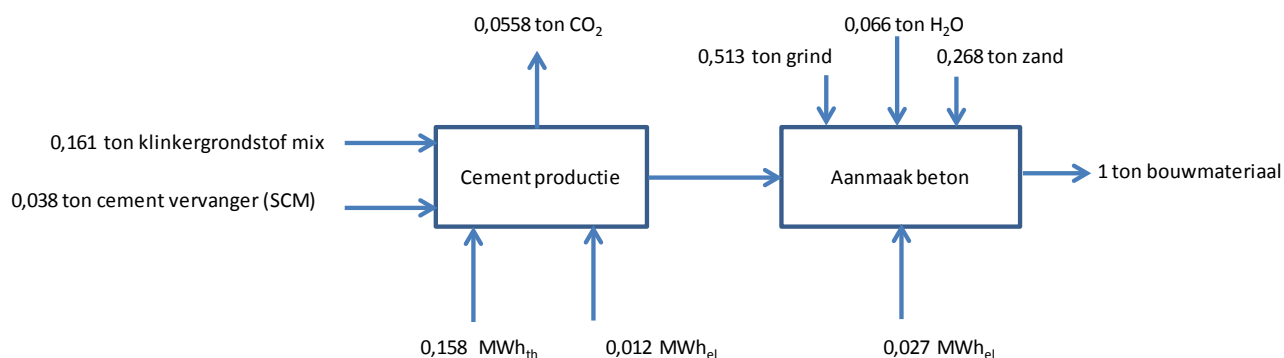
<sup>2</sup>De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de LCA emissiefactor voor elektriciteitsproductie in België (0,4 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>), thermische energie met laagwaardige restwarmte en biodiesel als brandstof voor het drogen van de fijne slak (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) en het transport van grondstoffen (0,156 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) respectievelijk.

<sup>3</sup> De CO<sub>2</sub>-emissies werden berekend met de emissiefactor voor volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie in België (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>el</sub>) en standaard emissiefactor voor thermische energie met laagwaardige restwarmte (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) of biodiesel (0 ton CO<sub>2</sub> eq/MWh<sub>th</sub>) als brandstof.

#### 4.1.4.2 Referentiescenario

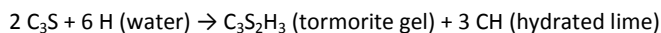
##### Blokschema

Als referentiescenario voor het Carbstone proces werd gekozen voor een traditioneel veelgebruikt bouw materiaal met vergelijkbare eigenschappen (sterkte) namelijk betonstenen met sterkte van 35-50 MPa. Het blokschema voor de productie van bouwmaterialen op basis van beton is weergegeven in Figuur 35.

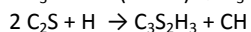


Figuur 35: Blokschema voor de productie van bouwmaterialen uit beton. De massa- en energiebalansen worden in de tekst toegelicht

Beton wordt geproduceerd uit grind, zand, cement en water (Figuur 35) waarbij de functionaliteit alsook de sterkte van het beton in grote mate bepaald wordt door de gebruikte hoeveelheid en type cement. Voor deze studie werd uitgegaan van 345 kg cement/m<sup>3</sup> beton met een dichtheid van 2400 kg/m<sup>3</sup>. *Portland* cement is de meest gebruikte cementsoort en bestaat uit 95% klinker en 5% gips. Tri-calcium silicaat (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>/C<sub>3</sub>S) en di-calcium silicaat (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>S) zijn de hoofdbestanddelen van klinker (Tabel 41). De sterkteontwikkeling van beton of de hydratatie van cement kan worden benaderd door onderstaande reacties.



(Vergelijking 35)



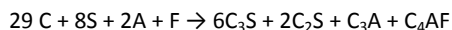
(Vergelijking 36)

Klinker wordt geproduceerd door het malen, calcineren en sinteren van een specifieke grondstoffen mix. Tijdens de calcinatie wordt de CO<sub>2</sub> uit de mineralen gestript (voornamelijk kalksteen) conform onderstaande reactie. De calcinatie gebeurt typisch tussen 800 en 1200°C waarbij ook andere kleimineralen ontbinden in oxides. Diverse brandstoffen (petroleumcokes, steenkool, gas, alternatieve brandstoffen,...) worden ingezet als thermische energiebron.



(Vergelijking 37)

Vervolgens vindt het sinteren plaats bij temperaturen tussen 1250 en 1400°C. Het sinter- of klinkerproces is een vrij complexe reactie die kan benaderd worden door onderstaande reactie (USGS, 2005).



(Vergelijking 38)

Na afkoeling wordt de klinker gemengd met andere toeslagstoffen en vervolgens fijngemalen in een cementmolen. De laatste decennia is ook het gebruik van andere cementsoorten sterk in opmars. Deze alternatieve cementsoorten bestaan vaak uit een mengsel van klinker en cementvervanger (Tabel 42). De cementvervangers worden voornamelijk gebruikt om de CO<sub>2</sub>-emissies van cement te reduceren. In België ligt het gebruik van andere cementsoorten of cementvervangers vrij hoog. Het klinkergehalte bedraagt in België gemiddeld 63% (FEBELCEM, 2014<sup>35</sup>). In Europa (EU27) bedraagt dit gemiddeld 73,7% (CEMBUREAU, 2016).

Tabel 41: Typische mineralogische samenstelling van *Portland* cement (USGS, 2005)

| Omschrijving                    | Chemische formule                                               | Notatie in termen van oxide groepen                                              | Korte notatie     | Typisch percentage |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Tricalciumsilicaat              | Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>                                | (CaO) <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>                                              | C <sub>3</sub> S  | 50-70              |
| Dicalciumsilicaat               | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                                | (CaO) <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>                                              | C <sub>2</sub> S  | 10-30              |
| Tricalciumaluminaat             | Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>                  | (CaO) <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                | C <sub>3</sub> A  | 3-13               |
| Tetracalciumaluminoferriet      | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub> | (CaO) <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> AF | 5-15               |
| Calciumsulfaat dihydraat (gips) | CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O <sub>10</sub>               | (CaO) (SO <sub>3</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>                          |                   | 3-7                |

Tabel 42: Typische compositie van diverse cement types

| Cement type                    | <i>Portland</i> cement (%) | <i>Portland</i> vliegas cement (%) | Hoogovencement (%) | Pozzolanic cement mixes (%) |
|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Klinker                        | 95-100                     | 65-94                              | 5-64               | 45-89                       |
| Vliegas                        |                            | 6-35                               |                    |                             |
| Hoogovencement                 |                            |                                    | 36-95              |                             |
| Puzzolana                      |                            |                                    |                    | 11-55                       |
| Andere grondstoffen (bv. gips) | 0-5                        | 0-5                                | 0-5                | 0-5                         |

<sup>35</sup> <http://www.febelcem.be/nl/publicatie-download//bauen-in-beton-construire-en-beton-20142015>

## Massabalansen

De finale massabalans wordt weergegeven in Tabel 43.

Tabel 43: Massabalans voor productie van bouwmaterialen op basis van beton

| Component                  | In (ton) | Uit (ton) |
|----------------------------|----------|-----------|
| Ruwe grondstof mix klinker | 0,161    | 0,000     |
| Cement vervanger (SCM)     | 0,038    | 0,000     |
| CO <sub>2</sub>            | 0,000    | 0,056     |
| Grind                      | 0,513    | 0,000     |
| Zand                       | 0,268    | 0,000     |
| H <sub>2</sub> O           | 0,066    | 0,000     |
| Beton                      | 0,000    | 1,000     |

## Energiebalansen

## Cement productie

Voor de productie van cement op basis van klinker wordt zowel thermische als elektrische energie aangewend. Thermische energie wordt voornamelijk gebruikt voor het drogen, calcineren en het sinteren van de grondstoffen. Vaak wordt hier een mengsel van diverse brandstoffen gebruikt (steenkool, petroleum cokes, biomassa en diverse afvalmaterialen). De hoeveelheid thermische energie wordt bepaald door het type klinkerproces (droog, semi-droog, nat, ...) maar in Europa wordt een gemiddelde waarde van 3730 MJ/ton klinker of 1,1 MWh<sub>th</sub>/ton klinker gehanteerd (CEMBUREAU, website 6 april 2016). De CO<sub>2</sub>-emissies horend bij deze thermische energie productie zijn eveneens afhankelijk van het type brandstof (IPCC, 2006; EIA, 2009). In deze studie wordt voorgesteld te werken met een waarde van 281 kg CO<sub>2</sub>/ton klinker. Naast thermische energie wordt ook elektrische energie aangewend voor de afzuigventilatoren en het malen van de ruwe klinkergrondstoffen en afgewerkte klinker tot cement. Gemiddeld wordt in Europa gerekend met 116 kWh/ton klinker (CEMBUREAU, 2016). Voor het berekenen van de finale energiebalans werd rekening gehouden met een klinker/cement ratio van 73,7%. In deze studie werd de energie nodig voor de productie van de alternatieve cementen (SCMs, *supplementary cementitious material*) niet in rekening gebracht. Deze SCMs worden vaak als bijproduct in de staal- of energieproductie gevormd.

## Aanmaak beton

Voor de aanmaak van de betonproducten wordt gemiddeld 27 kWh<sub>e</sub>/ton gebruikt. Er werd van uitgegaan dat dit voornamelijk elektrische energie betreft.

Totale energibalans

De totale energiebalans is weergegeven in Tabel 44.

////////////////////////////////////

Tabel 44: Energiebalans voor de productie van bouwmaterialen uit beton

| Unit                                    | Proces                         | Waarde | Eenheid                               |
|-----------------------------------------|--------------------------------|--------|---------------------------------------|
| <b>Productie klinker</b>                | Drogen, calcineren en sinteren | 0,158  | MWh <sub>th</sub> /ton bouw materiaal |
|                                         | Malen en afzuigen              | 0,012  | MWh <sub>el</sub> /ton bouw materiaal |
| <b>Aanmaak beton</b>                    | Mengen van grondstoffen        | 0,027  | MWh <sub>el</sub> /ton bouw materiaal |
| <b>Totaal elektriciteitsverbruik</b>    |                                | 0,039  | MWh <sub>el</sub> /ton bouw materiaal |
| <b>Totaal thermisch energieverbruik</b> |                                | 0,158  | MWh <sub>th</sub> /ton bouw materiaal |

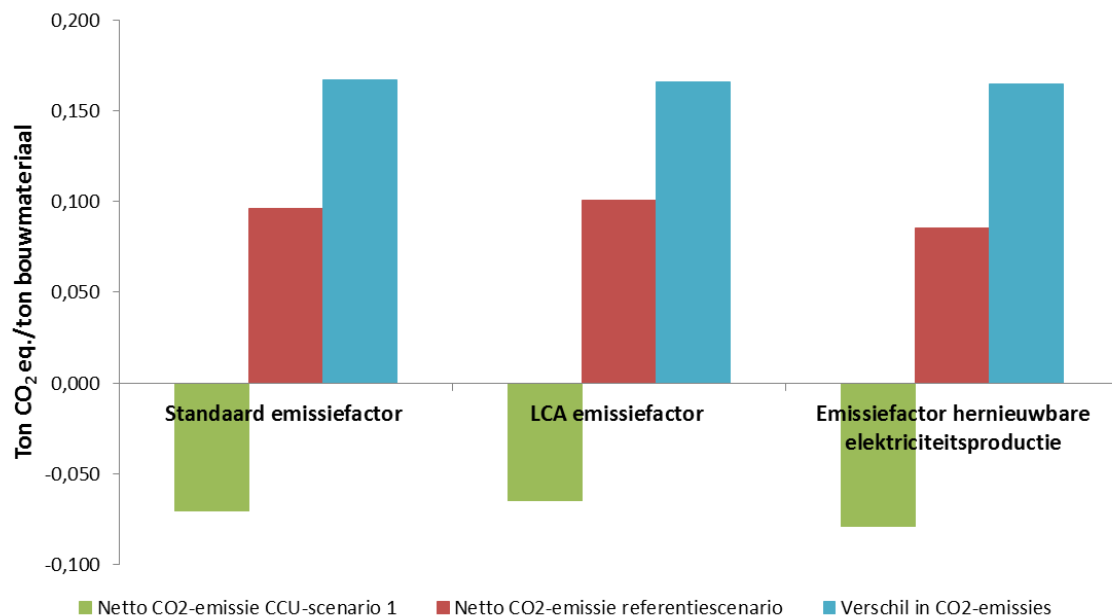
### CO<sub>2</sub>-emissies

De netto CO<sub>2</sub>-emissies voor de productie van bouwmaterialen op basis van beton bedragen 85-101 kg CO<sub>2</sub> equivalenten/ton betonproduct of 196-232 kg CO<sub>2</sub> equivalenten /m<sup>3</sup> betonproduct (Tabel 45) uitgaande van een dichtheid van 2400 kg/m<sup>3</sup> wanneer gerekend wordt met de Belgische elektriciteitsmix. De CO<sub>2</sub>-emissies worden voornamelijk veroorzaakt door de chemische ontbinding van de grondstoffen (voornamelijk kalksteen) en de thermische energie ingezet tijdens de klinkerproductie. De cement- en betonindustrie is zich bewust van de hoge CO<sub>2</sub>-emissies die ze veroorzaakt en heeft een strategie uitgewerkt om de CO<sub>2</sub>-emissies te reduceren. Samenvattend kunnen we stellen dat deze gericht is op 3 pijlers:

- Verhogen van de energie efficiëntie door investeringen in *state-of-the-art* technologieën (thermische en elektrische efficiëntie);
- Gebruik van alternatieve brandstoffen en grondstoffen. Door het co-verwerken van afvalstoffen en materialen kunnen CO<sub>2</sub>-emissies veroorzaakt door het storten of het verbranden vermeden worden;
- Het verlagen van de klinker-cement ratio door gebruik van vliegassen, hoogovenslakken en natuurlijke pozzolane materialen waar mogelijk.

Meer concrete maatregelen en targets aangaande het reduceren van de CO<sub>2</sub>-emissies in de cement- en beton-industrie staan uitgebreid beschreven in sectorpublicaties (CEMBUREAU, 2012 en 2016).





Figuur 36: Netto CO<sub>2</sub>-emissies voor productie van bouwmaterialen op basis van CO<sub>2</sub> en minerale grondstoffen (CCU-scenario) en beton (referentiescenario) en het verschil in CO<sub>2</sub>-emissies van beide scenario's. In het CCU-scenario werd verondersteld dat de thermische energie voor het drogen van de fijne slak geproduceerd wordt door het verbranden van aardgas



Figuur 37: Netto CO<sub>2</sub>-emissies voor productie van bouwmaterialen op basis van CO<sub>2</sub> en minerale grondstoffen (CCU-scenario) en beton (referentiescenario) en het verschil in CO<sub>2</sub>-emissies van beide scenario's. In het CCU-scenario werd laagwaardige restwarmte verondersteld voor het drogen van de fijne slak waarbij de CO<sub>2</sub>-emissies verwaarloosd werden

#### 4.1.5 Vergelijking van 4 cases

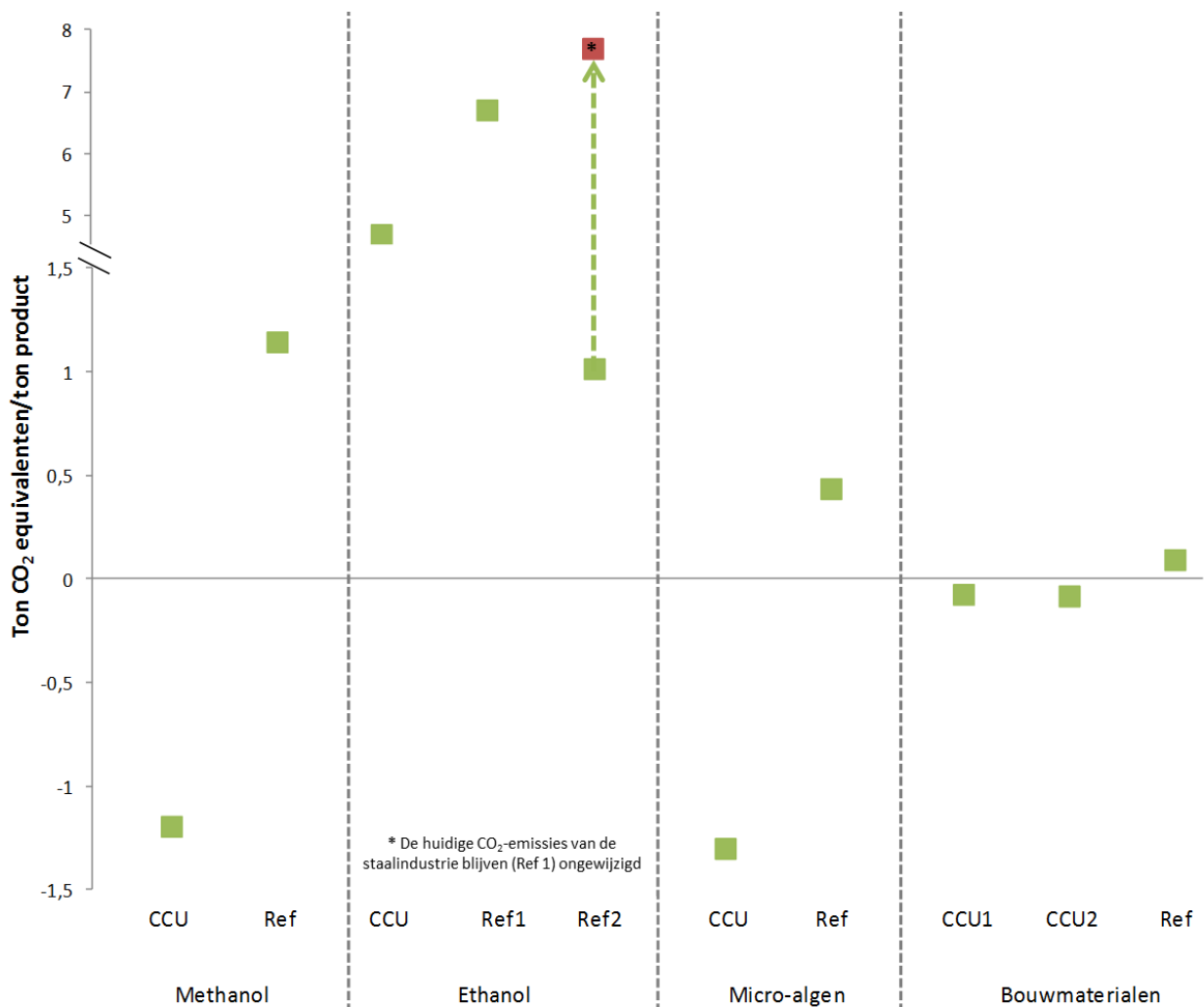
Bij de bespreking van de individuele *cases* werd al aangegeven welke invloed het gebruik van verschillende emissiefactoren heeft op de berekende netto CO<sub>2</sub>-emissies. De CO<sub>2</sub>-voetafdruk voor de 4 *cases* wordt hier dan ook enkel onderling vergeleken voor het gebruik van hernieuwbare energie, omdat het meest wenselijk is voor toepassing van CCU (Figuur 38).

Een eerste manier om naar de CO<sub>2</sub>-balans te kijken is op het niveau van de CCU-technologie zelf. Het doel is hier om netto CO<sub>2</sub> vast te leggen. In 3 van de 4 cases, nl. *Power-to-methanol*, productie van algenbiomassa en in mindere mate de productie van constructiematerialen, is dit ook effectief het geval (negatieve waarde in Figuur 38). De productie van ethanol daarentegen gaat voor de specifieke Steelanol case gepaard met CO<sub>2</sub> emissies. De kanttekening die bij eerstgenoemde case gemaakt moet worden is wel dat methanol het grootste potentieel voor CO<sub>2</sub>-vastlegging heeft maar dat de duur van de vastlegging beperkt is.

Een tweede manier om de CO<sub>2</sub>-balans te evalueren bestaat erin de winst t.o.v. een specifiek referentiescenario te bekijken. In dit geval spreken we van vermeden CO<sub>2</sub>-emissies. Deze zijn het grootste voor *Power-to-methanol* en de productie van algenbiomassa. In het geval van micro-algen dient opgemerkt te worden dat de vermeden CO<sub>2</sub>-emissies niet gerealiseerd worden door de CCU-technologie zelf, maar eerder door het gebruik van hernieuwbare energie. Anders zou de milieu impact in het CCU-scenario zelfs groter zijn dan in het referentiescenario. Ook voor de methanol productie ligt de grootste milieuwinst in het gebruik van hernieuwbare elektriciteit. De productie van bouwmaterialen gaat steeds gepaard met een (weliswaar kleine) besparing in CO<sub>2</sub>-emissies ongeacht de herkomst van de elektriciteit.

Voor de Steelanol *case* zijn 2 referentiescenario's te onderscheiden. Het eerste referentiescenario betreft de huidige situatie waarin het hoogovengas gevaloriseerd wordt naar elektriciteit. De Steelanol aanpak zorgt in dit geval – ongeacht de herkomst van de elektriciteit - voor lagere CO<sub>2</sub> emissies op voorwaarde dat het verlies aan opgewekte energie gecompenseerd wordt door hernieuwbare energie. Dit resulteert in ca. 2 ton CO<sub>2</sub>/ton ethanol vermeden emissies. Een belangrijke opmerking hierbij is dat bij het uiteindelijke gebruik van ethanol als brandstof nog extra CO<sub>2</sub> zal vrijgezet worden, een effect dat hier niet mee verrekend werd en de totale balans wel verder zal beïnvloeden. Het tweede referentiescenario (productie van ethanol uit nafta) lijkt op het eerste zicht een lagere CO<sub>2</sub>-voetafdruk te hebben. Maar hierbij dient de kanttekening gemaakt te worden dat het de huidige CO<sub>2</sub>-emissies van de staalindustrie (referentiescenario 1) ongewijzigd laat. Indien ook met deze CO<sub>2</sub>-emissies (referentiescenario 1) rekening gehouden wordt (Figuur 38, aangeduid in rood), draagt de Steelanol aanpak bij tot het vermijden van 3 ton CO<sub>2</sub>/ton ethanol.

Tot slot wordt nogmaals benadrukt dat de uitgevoerde analyse indicatief en benaderend is. Een uitgebreide LCA is nodig om een adequaat beeld te krijgen van de effectieve CO<sub>2</sub>-emissies en -reducties, rekening houdend met de randvoorwaarden van de individuele cases.



Figuur 38: Netto CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de geselecteerde cases voor het CCU-scenario (afgekort CCU) en het conventionele proces (Referentie-scenario, afgekort Ref) in de veronderstelling van volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie. "Ref1 en Ref 2 – ethanol" staat respectievelijk voor referentiescenario 1 (i.e., verbranding van hoogovengas) en 2 (i.e., productie van ethanol uit nafta). "CCU1 en CCU2 – bouwmaterialen" staat respectievelijk voor Carbstone bouw materiaal met als thermische energie voor het drogen van de fijne slak het verbranden van aardgas en laagwaardige restwarmte. Vermits het "Ref2 – ethanol" scenario de huidige CO<sub>2</sub>-emissies van de staalindustrie (weergegeven in Ref1 - ethanol) ongewijzigd laat, dienen in feite de CO<sub>2</sub>-emissies van "Ref1 – ethanol" mee in rekening gebracht te worden (aangeduid in rood) voor de totale balans

## 4.2 POTENTIËLE WINSTEN

Op basis van de massa- en energiebalans wordt nagegaan wat de economische haalbaarheid van het proces is. De massa- en energiebalans is rechtstreeks gekoppeld met de dynamische kosten-baten analyse waardoor eenvoudig nagegaan kan worden wat de impact is op het economisch resultaat wanneer technische parameters wijzigen. De haalbaarheid van de processen wordt nagegaan door berekening van de netto contante waarde (NCW), interne rendementsvoet (IRR) en verdisconteerde terugverdiendtijd. Gezien het om een eerste inschatting gaat en er veel onzekerheid is op de aangenomen parameters werd ook een onzekerheidsanalyse uitgevoerd om de belangrijkste parameters te identificeren. Het model is opgebouwd in Excel en de onzekerheidsanalyse wordt uitgevoerd via de software Crystal Ball ©.

We willen benadrukken dat dit een eerste inschatting is op basis van de gemaakte assumpties en dat een meer diepgaande analyse nodig is voor verdere conclusies.

De processen worden alle geëvalueerd op 20 jaar en er wordt rekening gehouden met een gewogen gemiddelde kapitaalkost van 3,94%. Belastingen bedragen 33,99%. De loonkost per uur werd ook gelijk verondersteld in elke *case* en bedraagt 39 euro (Eurostat data). Voor het onderhoud van installaties wordt rekening gehouden met een kost ter hoogte van 3% van de investeringskost (aangeduid als %I<sub>0</sub>), tenzij anders vermeld. De prijzen voor elektriciteit en water zijn per *case* verschillend en worden duidelijk vermeld. Deze kunnen afwijken doordat processen op verschillende locaties gesitueerd zijn met specifieke kenmerken, de grootte van de bedrijven verschillend is of doordat de technologieën voor verschillende doeleinden ingezet worden. Een prijs van 40 euro/ton werd aangerekend voor de CO<sub>2</sub>-opvang, tenzij anders vermeld. Deze prijs ligt in lijn met geprojecteerde CO<sub>2</sub>-opvangkosten afkomstig uit zuivere industriële processen van 33 euro/ton en 65 euro/ton voor andere processen (Naims, 2016). Via een onzekerheidsanalyse wordt de invloed van de CO<sub>2</sub>-kostprijs nagegaan op de economische haalbaarheid. Verder werden alle assumpties zoals opbrengst van product of materiaal, schaalgrootte afgestemd met de opgemaakte projectfiches (Sectie 2.2).

Tabel 47: Samenvatting algemene economische assumpties

|                            | Parameter                       | Waarde | Eenheid         | Bron                        |
|----------------------------|---------------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|
| <b>Financieel</b>          | Gewogen gemiddelde kapitaalkost | 3,94   | %               |                             |
|                            | Belastingpercentage             | 33,99  | %               |                             |
|                            | Evaluatieperiode                | 20     | jaar            |                             |
| <b>Operationele kosten</b> | Uurloon                         | 39     | euro/h          | Eurostat                    |
|                            | Onderhoud                       | 3      | %I <sub>0</sub> | Peters en Timmerhaus (1991) |
|                            | CO <sub>2</sub>                 | 40     | euro/ton        | Naims (2016)                |



haalbaarheid nagegaan. Daarnaast wordt er rekening mee gehouden dat de installatie ingeschakeld kan worden door Elia als primaire reserve. We gaan ervan uit dat we een symmetrisch primair reservevermogen van 33% van het totaal vermogen kunnen aanbieden. De marktprijs in 2013 bedroeg 40-50 euro/MW/h<sup>36</sup>. Momenteel ligt de marktprijs lager en nemen we voor deze studie een prijs aan van 35 euro/MW/h. We merken hierbij op dat er enerzijds een grotere vraag naar reserves zal komen, maar dat er anderzijds een toenemende concurrentie verwacht wordt op deze markt waardoor de prijzen verder onder druk komen te staan. De totale jaarlijkse opbrengst door het aanbieden van de installatie aan Elia bedraagt ca. 5,4 Meuro.

Tabel 48: Samenvatting economische assumpties methanol case

|                            | Parameter                              | Waarde     | Eenheid             | Bron                               |
|----------------------------|----------------------------------------|------------|---------------------|------------------------------------|
| <b>Investeringskosten</b>  | Methanol installatie                   | 1.000.000  | euro/1000 ton/jaar  | CRI                                |
|                            | Randinfrastructuur                     | 10.000.000 | euro                | Havenbedrijf van Antwerpen         |
|                            |                                        |            |                     |                                    |
| <b>Operationele kosten</b> | Personeelsleden                        | 6          | #                   |                                    |
|                            | Water                                  | 1,6        | euro/m <sup>3</sup> | Havenbedrijf van Antwerpen         |
|                            | Elektriciteit                          | 40         | euro/MWh            | Belpex; Havenbedrijf van Antwerpen |
|                            | Aardgas                                | 20         | euro/MWh            | Havenbedrijf van Antwerpen         |
|                            | Katalysator                            | 29         | euro/kg             | CRI                                |
|                            | Verzekering                            | 0,4        | % vaste investering | Peters en Timmerhaus (2013)        |
| <b>Opbrengsten</b>         | Methanol (incl. <i>green premium</i> ) | 600        | euro/ton            | Havenbedrijf van Antwerpen         |
|                            | Primaire reserves                      | 35         | euro/MW/h           | Elia                               |

#### 4.2.1.4 Resultaat economische analyse en onzekerheidsanalyse

Op basis van de aangenomen assumpties vinden we dat de investering haalbaar is en een NCW heeft van 20 Meuro, een IRR van 16% en een verdisconteerde terugverdientijd van 8 jaar. Wanneer we echter veronderstellen dat geen gebruik gemaakt kan worden van de primaire reserves, vinden we dat de investering niet haalbaar is. De NCW daalt tot -33 Meuro.

Via een onzekerheidsanalyse wordt nagegaan welke parameters de grootste invloed hebben op de economische haalbaarheid. Uit deze analyse blijkt dat voornamelijk de verkoopprijs van methanol en de aankoopprijs van elektriciteit erg belangrijk zijn. Daarnaast is ook de vergoeding voor reservecapaciteit en de investeringskost belangrijk.

<sup>36</sup> <http://www.elia.be/en/suppliers/purchasing-categories/energy-purchases/Ancillary-Services-Volumes-Prices>



#### 4.2.2 Ethanol

Voor de economische analyse wordt uitgegaan van een input van ca. 68.500 Nm<sup>3</sup> BF (*blast furnace*) per uur. Dit resulteert in een jaarlijkse ethanolproductie van ca. 50.000 ton. De totale investeringskost voor de ethanol productie *plant* wordt geschat op 87 Meuro<sup>37</sup>. In deze investeringskost zit ook de afvang en de voorbehandeling van de gassen. Hierdoor wordt geen afzonderlijke prijs voor CO<sub>2</sub> opgenomen in de economische analyse van de Steelanol *case*.

Voor het onderhoud en de werking van de installaties zijn ca. 23 VTE's (voltijds equivalenten) noodzakelijk. De jaarlijkse personeelskost bedraagt ongeveer 2 Meuro. Er wordt rekening gehouden met een verzekeringspercentage van 0,4% van de totale vaste investeringskost, i.e. 350 keuro/jaar. Elektriciteits- en gasaankopen bedragen respectievelijk 50 en 5,5 euro/MWh. De totale elektriciteitskost per jaar bedraagt bijna 6 Meuro. Door de beschikbaarheid van restwarmte op de site, in combinatie met de warmte beschikbaar uit de cogeneratie, is geen externe aankoop van warmte vereist. Voor het onderhoud van de plant wordt rekening gehouden met een jaarlijkse kost van 2,6 Meuro (i.e. 3% van de totale investeringskost).

Een samenvatting van de assumpties wordt weergegeven in Tabel 49. De totale investeringskosten bedragen ca. 87 Meuro. De operationele kosten bedragen 11 Meuro per jaar. Er wordt verondersteld dat de nodige warmte niet aangekocht moet worden, maar dat gebruik gemaakt kan worden van restwarmte beschikbaar op de site. De jaarlijkse opbrengsten verkregen uit de verkoop van ethanol bedragen ca. 25 Meuro per jaar. Er werd rekening gehouden met een verkoopprijs van ethanol van 500 euro/ton<sup>38</sup>.

Tabel 49: Samenvatting economische assumpties ethanol *case*

|                            | Parameter       | Waarde     | Eenheid         | Bron                        |
|----------------------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------------------|
| <b>Investeringskosten</b>  | Totale plant    | 87.000.000 | euro            | ArcelorMittal               |
| <b>Operationele kosten</b> | Personeelsleden | 23         | #               | ArcelorMittal               |
|                            | Elektriciteit   | 50         | euro/MWh        | ArcelorMittal               |
|                            | Gas             | 5,5        | euro/MWh        | ArcelorMittal               |
|                            | Verzekering     | 0,4        | %I <sub>0</sub> | Peters en Timmerhaus (2013) |
| <b>Opbrengsten</b>         | Ethanol         | 500        | euro/ton        | NASDAQ                      |

<sup>37</sup> <http://corporate.arcelormittal.com/news-and-media/news/2015/july/13-07-2015>

<sup>38</sup> <http://www.nasdaq.com/markets/ethanol.aspx>



### 4.2.3 Micro-algen

Voor de economische analyse wordt uitgegaan van een productieschaal van 120 ton drooggewicht (DW) algen per jaar en een productiviteit van 11 ton droge stof per hectare per jaar. Dit komt overeen met een totale oppervlakte van 17 hectare.

Om de investeringskost te berekenen wordt steeds de kost van de benodigde apparatuur aangevuld met additionele directe en indirecte kosten volgens de methode van Peters en Timmerhaus (1991). Deze additionele directe kosten zijn: installatiekosten (47% van de oorspronkelijke investeringskost), kosten voor de instrumentatie- en controle-apparatuur (18% van de oorspronkelijke investeringskost), kosten voor de pijpleiding (66%), kosten voor de elektrische apparatuur (11% van de oorspronkelijke investeringskost), kosten voor gebouwen (18% van de oorspronkelijke investeringskost), terreinaanpassingen (10% van de oorspronkelijke investeringskost) en kosten voor dienstenfaciliteiten (70% van de oorspronkelijke investeringskost). Voor de grondkost wordt geen percentage in rekening gebracht, aangezien deze apart berekend wordt. De indirecte kosten zijn: ingenieurs- en supervisiekosten (33% van de totale directe kost), constructie-uitgaven (41% van de totale directe kost), kosten verbonden met de aannemer (5% van de directe en indirecte kosten), onvoorziene kosten (10% van de totale directe en indirecte kost) en werkkapitaal (15% van de totale investeringskost). De methode van Peters en Timmerhaus wordt gebruikt wanneer men enkel zicht heeft op de *delivered equipment cost* om zo een inschatting te krijgen van de totale investeringskost. Merk op dat in de andere cases verondersteld is dat deze kosten reeds inbegrepen zijn in de weergegeven investeringskost.

Het personeel bestaat uit minimum 3 VTE's met één additionele VTE per hectare (Michiels, 2013). Dit resulteert in een totaal van ca. 20 werknemers en een totale jaarlijkse personeelskost van ongeveer 1,5 Meuro. Voor de berekening van de indirecte operationele kosten wordt de methode van Peters en Timmerhaus (1991) gebruikt. De verzekeringskosten bedragen 1% van de investeringskosten. Voor de overheads- en administratieve kosten wordt een kost van 70% en 15% van de totale personeels- en onderhoudskosten meegenomen. Daarnaast is er ook een kost van respectievelijk 10% en 5% van de totale operationele kosten voor distributie en onderzoek. Laboratoriumkosten worden niet in rekening gebracht omdat aangenomen wordt dat deze reeds inbegrepen zijn bij de kost van het inoculum. Elektriciteit wordt aangekocht aan een prijs van 116,4 euro/MWh. De prijs voor elektriciteit ligt in deze *case* hoger doordat de productie van algen wordt verondersteld plaats te vinden bij bedrijven met een lagere energievraag.

De residuele biomassa wordt verkocht als larvale voeders voor vis- en garnaalkwekerijen aan 100 euro/kg. Deze prijs wordt ook gebruikt voor de aankoopkost van het inoculum.

#### 4.2.3.1 Cultivatie

De investeringskost van de ProviAPT bioreactor bedraagt 15 euro/m<sup>2</sup> met een additionele investeringskost van 240 keuro per hectare. De levensduur van deze reactor is 2 jaar (Michiels, 2013). Er wordt aangenomen dat in deze additionele kost alle extra directe kosten reeds inbegrepen zijn. De indirecte kosten die nog toegevoegd worden zijn de uitgaven voor de aannemer, onvoorziene uitgaven en werkkapitaal. Voor de cultivatiestap is er

Voor de cultivatiestap is er water nodig, wat aangekocht wordt aan een prijs van 3,41 euro/m<sup>3</sup>. Dit resulteert in een jaarlijkse waterkost van 21.169 euro. De totale zout- en nutriëntkosten bedragen respectievelijk 205.317 euro/jaar en 137.888 euro/jaar.

Voor de centrifuge wordt met een totale kost van ca. 1,5 M euro gerekend. Deze kost is gebaseerd op offertes van verschillende bedrijven en bevat ook alle additionele directe en indirecte kosten. De centrifuge heeft een levensduur van 10 jaar. Het afvalwater brengt een kost mee van 2,43 euro/m<sup>3</sup> (VMM, 2015).

De prijs van de sproeidroger wordt bepaald aan de hand van twee gekende prijzen: 187.971 euro voor een capaciteit van 15 kg verwijderd water per uur en 432.233 euro voor een capaciteit van 50 kg verwijderd water per uur (Olafsson, 2013). Ook bij de sproeidroger worden alle additionele directe en indirecte kosten meegerekend. De sproeidroger heeft een levensduur van 30 jaar (Ciesielski en Zbicinski, 2010).

Een samenvatting van de assumpties wordt weergegeven in Tabel 50. De totale investeringskosten bedragen ca. 50 Meuro. De operationele kosten bedragen gemiddeld 5 Meuro per jaar. De jaarlijkse opbrengsten verkregen uit de verkoop van de residuele biomassa bedragen ca. 12 Meuro per jaar.

Tabel 50: Samenvatting economische assumpties micro-algen case

|                     | Parameter                            | Waarde                                                           | Eenheid                    | Bron                                              |          |
|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|----------|
| Investeringskosten  | ProviAPT reactor                     | 15                                                               | euro/m <sup>2</sup>        | Michiels (2013)                                   |          |
|                     | Additionele investeringskost reactor | 240.000                                                          | euro/ha                    | Michiels (2013)                                   |          |
|                     | Indirecte kosten                     | 32                                                               | %                          | Peters en Timmerhaus (1991)                       |          |
|                     | Centrifuge                           | -1030<br>Capaciteit(m³/h)+153437 <sup>0</sup>                    | euro/m³/h                  | Commerciële offertes; Peters en Timmerhaus (1991) |          |
|                     | Sproeidroger                         | 162.547<br>(Capaciteit (kg verwijderd water/h)) <sup>-0,31</sup> | euro/kg verwijderd water/h | Olafsson (2013); Peters en Timmerhaus (1991)      |          |
|                     | Grondprijs                           | 2,78                                                             | euro/m²                    | Peeters et al. (2015)                             |          |
|                     | Totaal landgebruik                   | 150                                                              | % cultivatie-oppervlakte   | Michiels (2013)                                   |          |
| Operationele kosten | Personeelsleden                      | 3                                                                | #                          | Michiels (2013)                                   |          |
|                     | Extra personeel                      | 1                                                                | #/ha                       | Michiels (2013)                                   |          |
|                     | Water                                | 3,41                                                             | euro/m³                    | Eurostat                                          |          |
|                     | Heffing op waterverontreiniging      | 2,43                                                             | euro/m³                    | VMM                                               |          |
|                     | KNO <sub>3</sub>                     | 1.632                                                            | euro/ton                   | www.mbferts.com                                   |          |
|                     | NaHCO <sub>3</sub>                   | 672                                                              | euro/ton                   | www.intralabs.co.uk                               |          |
|                     | KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>      | 2.040                                                            | euro/ton                   | www.mbferts.com                                   |          |
|                     | FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O | 602                                                              | euro/ton                   | www.alibaba.com                                   |          |
|                     | MgSO <sub>4</sub>                    | 816                                                              | euro/ton                   | www.mbferts.com                                   |          |
|                     | Elektriciteit                        | 116,40                                                           | euro/MWh                   | Eurostat                                          |          |
|                     | Zout                                 | 151                                                              | euro/ton                   | www.zout.be/landbouwzout                          |          |
|                     | Verzekering                          | 1                                                                | %I <sub>0</sub>            | Peters en Timmerhaus (1991)                       |          |
|                     | Overhead                             | 70                                                               | % personeel en onderhoud   | Peters en Timmerhaus (1991)                       |          |
|                     | Administratieve kost                 | 15                                                               | % personeel en onderhoud   | Peters en Timmerhaus (1991)                       |          |
|                     | Distributie                          | 10                                                               | % operationele kost        | Peters en Timmerhaus (1991)                       |          |
|                     | Onderzoek                            | 5                                                                | % operationele kost        | Peters en Timmerhaus (1991)                       |          |
|                     | Inoculum                             | 100                                                              | euro/kg                    | Assumptie                                         |          |
|                     | Opbrengsten                          | Micro-algen                                                      | 100                        | euro/kg                                           | Proviron |

////////////////////////////////////

De NCW van de economische analyse bedraagt 45 Meuro, met een IRR van 257% en een verdisconteerde terugverdientijd van 0,35 jaar.

Voor de sensitiviteitsanalyse werd voor alle technologische en economische parameters in het model een driehoeksverdeling van -10% en +10% aangenomen. De 10 parameters die het meeste impact hadden op de NCW worden weergegeven in Figuur 41. De belangrijkste parameter is de verkoops prijs van de biomassa. Daarom wordt er nog een *what-if* analyse uitgevoerd. Deze analyse resulteert in een *breakeven* prijs van 65 euro/kg biomassa. De prijs van CO<sub>2</sub> heeft een minder belangrijke impact op de haalbaarheid. Ook bij een prijs boven 60 €/ton blijft de *case* nog haalbaar.



#### 4.2.4 Carbonatatie

Voor de economische analyse houden we rekening met een productieschaal van 250.000 ton Carbstone per jaar uit staalslakken. Er wordt rekening gehouden met een uitval van 10%. Voor de staalslakken wordt geen prijs in rekening gebracht. Voor de productieschaal wordt geschat dat 25 VTEs nodig zijn. De totale jaarlijkse personeelskost bedraagt ca. 2 Meuro. Voor de elektriciteit houden we rekening met een aankoopprijs van 93 euro/MWh en voor aardgas met een prijs van 29 euro/MWh. De totale elektriciteitskost bedraagt ongeveer 700.000 euro per jaar. De totale kost voor warmte bedraagt ongeveer 500 keuro/jaar. Er zal ook nagegaan worden wat de impact is op de economische haalbaarheid wanneer restwarmte aanwezig is op de site en geen warmte aangekocht moet worden.

##### 4.2.4.1 Carbstone productie-installatie

De totale investeringskost voor het zetten van een nieuwe Carbstone productie-installatie met een capaciteit van 250 kton per jaar, wordt geschat op 18 Meuro. Hierin zitten ook de kosten voor een gebouw en site-voorbereidingen inbegrepen. Wanneer men echter kan starten van een bestaande betonplant, zal de investeringskost veel lager liggen, *i.e.* 4 Meuro.

Tijdens de productie van Carbstone wordt een beperkte hoeveelheid water verbruikt. De kosten voor de aankoop van water bedragen 3,41 euro/m<sup>3</sup>. Naast water zijn er nog andere operationele kosten waarvoor de totale kost geschat wordt op 1 euro/m<sup>3</sup> Carbstone productie. De jaarlijkse kosten voor water en andere operationele kosten bedragen respectievelijk ca. 18.000 en 110.000 euro.

Voor de economische analyse wordt ook rekening gehouden met licentiekosten ter hoogte van 5 euro/ton Carbstone productie. De totale licentiekosten per jaar bedragen 1,2 Meuro.

##### 4.2.4.2 CO<sub>2</sub> toevoeging

Voor de CO<sub>2</sub> toevoeging wordt een prijs aangerekend van 40 euro/ton. Dit is in lijn met de prijzen voor CO<sub>2</sub> uit gassen die aangegeven wordt in de literatuur, *i.e.* 30-60 \$/ton (House et al., 2011). De jaarlijkse kost voor CO<sub>2</sub> bedraagt 1 Meuro. Aangezien de CO<sub>2</sub> voor Carbstone productie niet 100% zuiver moet zijn, zal in de sensitiviteitsanalyse ook nagegaan worden wat de economische impact is wanneer de CO<sub>2</sub> prijs slechts 20 euro/ton bedraagt.

Een samenvatting van de assumpties wordt weergegeven in Tabel 51. De totale investeringskosten bedragen ca. 18 Meuro in geval een volledig nieuwe installatie gezet moet worden. De operationele kosten bedragen 6 Meuro per jaar. De jaarlijkse opbrengsten verkregen uit de verkoop van Carbstone bedragen ca. 12,5 Meuro per jaar. Er werd rekening gehouden met een verkoopprijs voor de Carbstones van 127 euro/m<sup>3</sup>. De aangenomen prijs is de prijs voor *low end products* en ligt vermoedelijk tussen 100 en 155 euro/m<sup>3</sup>. De hoogwaardige toepassingen worden in deze *case* buiten beschouwing gelaten.

Tabel 51: Samenvatting economische assumpties Carbstone case

|                     | Parameter                      | Waarde     | Eenheid  | Bron     |
|---------------------|--------------------------------|------------|----------|----------|
| Investeringskosten  | Carbstone installatie (nieuw)  | 18.000.000 | euro     | RECMIX   |
|                     | Carbstone installatie (ombouw) | 4.000.000  | euro     | RECMIX   |
|                     |                                |            |          |          |
| Operationele kosten | Personeelsleden                | 25         | #        |          |
|                     | Water                          | 3,41       | euro/m³  | Eurostat |
|                     | Elektriciteit                  | 93         | euro/MWh | Eurostat |
|                     | Aardgas                        | 29         | euro/MWh | Eurostat |
|                     | Diverse variabele kosten       | 1          | euro/m³  |          |
|                     | Licentie                       | 5          | euro/ton |          |
| Opbrengsten         | Carbstone                      | 127        | euro/m³  | RECMIX   |

#### 4.2.4.3 Resultaat economische analyse en onzekerheidsanalyse

Op basis van de aangenomen assumpties vinden we dat de investering haalbaar is en een NCW heeft van 41 Meuro, een IRR van 85% en een verdisconteerde terugverdientijd van 1,25 jaar wanneer een volledig nieuwe installatie gezet moet worden. Wanneer we echter veronderstellen dat we een bestaande betonplant kunnen ombouwen, wordt de investering nog positiever en bedraagt de NCW 57 Meuro en is de terugverdientijd minder dan 1 jaar.

Via een onzekerheidsanalyse (Figuur 42) gaan we na welke parameters de grootste invloed hebben op de economische haalbaarheid. Uit deze analyse blijkt dat voornamelijk de verkoopprijs van de Carbstones, de productiecapaciteit, de personeelskost en de investeringskost een grote invloed hebben op de variatie in de NCW.

[illegible]



#### 4.2.5 Vergelijking van 4 cases

Onder de gemaakte assumpties zijn de *cases* micro-algen en carbonatatie economisch haalbaar. De *cases Power-to-methanol* en ethanol zijn enkel economisch haalbaar wanneer respectievelijk een capaciteitsvergoeding voor de levering van primaire reserve d.m.v. electrolyse en het gebruik van restwarmte aanwezig op de site verondersteld wordt. Voor alle *cases* heeft de verkoopprijs van de geproduceerde output een zeer grote impact op het economisch plaatje. Voor de *Power-to-methanol case*, hebben ook de aankoopprijs van elektriciteit en de vergoeding voor de reservecapaciteit een grote invloed op de economische haalbaarheid. We merken hierbij op dat de prijzen voor ethanol, methanol, elektriciteit en reservecapaciteit voor Elia erg fluctuerend en marktgevoelig zijn. Een meer gedetailleerde analyse is nodig om de impact van deze onzekerheden op de economische haalbaarheid van de verschillende processen na te gaan. Verder kunnen we concluderen dat voor CCU-projecten het belangrijk is om hoogwaardige producten te produceren om investerings- en operationele kosten te compenseren of dat gebruik gemaakt moet worden van de meest optimale locatie om maximaal baat te hebben van reeds voorziene infrastructuur en *utilities*.

Wanneer beslist moet worden hoe CCU-projecten verder ondersteund kunnen worden, is het belangrijk om te kijken naar de kost per ton CO<sub>2</sub> vastgelegd in de verschillende eindproducten of de hoeveelheid vermeden CO<sub>2</sub>-emissies, veeleer dan de kost voor de afvang van CO<sub>2</sub>. Deze laatste werd in de verschillende *cases* gelijk verondersteld en blijkt niet de belangrijkste parameter te zijn die de economische haalbaarheid beïnvloedt. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die finaal vastgelegd wordt in de eindproducten is daarentegen verschillend per *case* en de kostprijs die hier tegenover staat, is sterk afhankelijk van het benodigde conversieproces. Men zou enerzijds kunnen beslissen om ondersteuning te bieden aan die processen die het meeste CO<sub>2</sub> aan een zo laag mogelijke kost kunnen vastleggen. Op basis van deze preliminaire analyse van 4 geselecteerde *cases* scoren methanol en bouwmaterialen in dit opzicht best, met dit onderscheid dat de vastlegging in methanol van veel kortere duur is dan in bouwmaterialen. De Steelanol *case* is een speciaal geval omdat er weinig CO<sub>2</sub> wordt vastgelegd maar wel veel emissies worden vermeden. Het is dus van belang om goed te definiëren wat het doel van de ondersteuning moet zijn. Daarenboven zijn meer gedetailleerde berekeningen en een meer geïntegreerde analyse nodig om een finaal advies te kunnen verlenen (zie ook Sectie 4.6).

////////////////////////////////////

### 4.3 SCHAALGROOTTE IN HET VLAAMS GEWEST

De klimaatdoelstellingen die afgesproken werden op de COP21 in Parijs (2015) zijn ambitieus. Een van de redenen om in CCU te investeren kan dus zijn een substantiële bijdrage aan de vereiste emissiereducties in Vlaanderen te leveren. Om dit te kunnen inschatten is uiteraard niet alleen het CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel per ton eindproduct belangrijk zoals bepaald in Sectie 4.1, maar ook de schaalgrootte waarop het proces in Vlaanderen kan worden ingezet.

Voor elke *case* werd eerst van de huidige of concreet geplande schaalgrootte uitgegaan. Vervolgens werd geëvalueerd wat de theoretisch maximale schaalgrootte kan zijn. Hierbij werd voor elke *case* de beperkende factor bepaald en in functie daarvan de totale capaciteit ingeschat

#### 4.3.1 Power-to-methanol

Het havenbedrijf voorziet bij *upscaling* een basiseenheid van 50 kton methanol per jaar (Sectie 2.2.2.2). Dit is de minimale productiecapaciteit omwille van het schaalvoordeel. Volgens de massabalans is dan een input van 69 kton CO<sub>2</sub>/jaar nodig waarvan 60 kton CO<sub>2</sub>/jaar effectief vastgelegd wordt onder de vorm van methanol (Tabel 52).

Indien de gehele methanol import van de Antwerpse Haven vervangen wordt door methanol uit *Power-to-methanol*, is 420 kton/jaar CO<sub>2</sub> nodig voor de productie van 305 kton methanol/jaar. Dit zou < 1% van de wereldmarkt betekenen en bedraagt ongeveer 50% van de Belgische methanolvraag in 2011.

### 4.3.2 Ethanol

ArcelorMittal voorziet bij opschaling een productie van 47 kton ethanol tegen 2018 (2.2.1.2). Dit resulteert in ca. 90 kton vermeden CO<sub>2</sub>/jaar (Tabel 52).

Vermits ethanol volgens het LanzaTech proces hoofdzakelijk uit CO geproduceerd wordt en voorlopig vooral gekoppeld wordt aan afgassen van de staalindustrie, werden enkel CO-bevattende emissies van ArcelorMittal in aanmerking genomen voor het inschatten van de totale capaciteit. Ter vereenvoudiging gaan we ervan uit dat 50% van alle gassen van ArcelorMittal-Gent die nu in de elektriciteitscentrale Knippegroen als brandstof gebruikt worden, ingezet zouden kunnen worden voor productie van ethanol. De totale CO<sub>2</sub> emissies van Knippegroen bedragen zo'n 4,5 Mton CO<sub>2</sub> (ETS register, 2015). Als een inputstroom van hoogovengas met 25,6 vol% CO en 26,2 vol% CO<sub>2</sub> verondersteld wordt, kan 708 kton CO ingezet worden voor een productie van 165 kton ethanol/jaar (<1% van de wereldmarkt). Vlaanderen stoot hierdoor 300 kton minder CO<sub>2</sub>-emissies per jaar uit t.o.v. het huidige scenario van elektriciteitsopwekking. Maar dit gaat wel nog altijd gepaard met een (zij het verminderde) CO<sub>2</sub>-emissie van 830 kton/jaar.

### 4.3.3 Micro-algen

De geplande productiecapaciteit van Proviron tegen 2020 heeft een CO<sub>2</sub> captatiepotentieel van ca. 220 ton per jaar (Sectie 2.2.6.2). Volgens de massabalans is dan een input van 440 ton CO<sub>2</sub>/jaar nodig. Enkel bij gebruik

////////////////////////////////////

van volledig hernieuwbare energie wordt effectief CO<sub>2</sub> vastgelegd in micro-algen (290 ton/jaar). Anders gaat het productieproces gepaard met CO<sub>2</sub>-emissies.

Voor een inschatting van de schaalgrootte werd het beschikbare landoppervlak als limiterende parameter geïdentificeerd. Om niet teveel in competitie te treden met de landbouw, werd 1% van alle cultuurgrond (6181 ha, Groen en Dynamisch Stedengewest) in beschouwing genomen. In dat geval kan in Vlaanderen 43,6 kton biomassa/jaar geproduceerd worden. Dit is een factor 1,5 groter dan de huidige wereldmarkt voor larvale voeders voor vis- en garnaalkwekerijen. Enkel bij gebruik van hernieuwbare energie kan netto 36 kton/jaar CO<sub>2</sub> vastgelegd in micro-algen.

#### 4.3.4 Carbonatatie

Carbstone Innovation zou bij continue procesvoering 20 kton staalslakken per jaar verwerken (2.2.4.2). Hierbij wordt 3,8 kton CO<sub>2</sub>/jaar vastgelegd in ca. 42 kton bouwmaterialen. De optimale schaalgrootte voor het Carbstone proces wordt momenteel ingeschat op verwerking van 50-100 kton CO<sub>2</sub>/jaar per productie-eenheid. Dit resulteert in een productie van 540-1100 kton bouwmaterialen/jaar.

Vermits de afzetmarkt enkele miljoenen tonnen per jaar bedraagt en CO<sub>2</sub> in overmaat aanwezig is, werd de beschikbare hoeveelheid staalslakken geïdentificeerd als de beperkende factor voor de productie van bouwmaterialen uit CO<sub>2</sub>. Slakkenzand van de metaalindustrie wordt in Genk en Gent geproduceerd voor samen ca. 1 Mton/jaar. In combinatie met deze totale hoeveelheid staalslak kan ca. 1 Mton Carbstone bouw materiaal geproduceerd worden. Bij gebruik van laagwaardige restwarmte voor het drogen van de slakken wordt de CO<sub>2</sub>-input maximaal vastgelegd in het productieproces en bedraagt deze 96 kton/jaar in Vlaanderen. Ca. 184 kton CO<sub>2</sub> (< 1% van de EU ETS geregistreerde CO<sub>2</sub>-emissies) kan vermeden door cement-gebaseerde bouwmaterialen te vervangen door deze fractie aan Carbstone bouwmaterialen.

#### 4.3.5 Vergelijking van 4 cases

Rekening houdend met de aannames voor de evaluatie van de schaalgrootte, blijkt dat vooral de productie van brandstoffen een groot potentieel heeft voor het reduceren van emissies (Tabel 52). Voorwaarde is wel dat hernieuwbare energie ingezet wordt in het proces. Dit is conform de verwachtingen en sluit aan bij analyses die ook elders worden gemaakt. Dit heeft o.a. te maken met de grote vraag naar vloeibare brandstoffen en met de hoge ratio van CO<sub>2</sub> vastgelegd per ton product.

De schaalgrootte voor methanolproductie uit CO<sub>2</sub> kan eventueel verder vergroot worden doordat volgens het EU ETS register in Vlaanderen 48 installaties aanwezig zijn met CO<sub>2</sub>-emissies > 69 kton/jaar (samen 7,4 Mton CO<sub>2</sub>). Hierbij dient echter wel rekening gehouden te worden met de marktgrootte van methanol in Vlaanderen, evenals de vraag voor het aanbieden van de primaire reserves. Om het volle potentieel in CO<sub>2</sub>-reductie te benutten, lijkt het ook aangewezen om te diversifiëren naar andere *Power-to-X* concepten. De verhouding vastgelegde CO<sub>2</sub>/ton product is ook gunstig voor de productie van algenbiomassa maar in dit geval is de wereldmarkt voor larvale voeders voor vis- en garnaalkwekerijen en de totale vastlegging van CO<sub>2</sub> beperkt. Ook hier is echter verruiming naar andere eindproducten voor andere toepassingen mogelijk. De

////////////////////////////////////

Voor carbonatatatieprocessen zijn de afzetmarkten groot maar is de CO<sub>2</sub> besparing per ton product in Vlaanderen te laag om tot een sterke totale emissiereductie te komen. Dit heeft deels te maken met de beperkte hoeveelheid staalslakken aanwezig in Vlaanderen. Het potentieel kan vergroot worden door materiaal uit nabijgelegen regio's (maximum transportradius bv. 300 km) te benutten en door te diversifiëren naar andere reststromen (bv. huishoudelijk afval).

Tabel 52: Schaalgrootte van geselecteerde *cases* in Vlaanderen

| <i>Case</i>                     | Beperkende factor       | Output                 | Netto vastgelegde CO <sub>2</sub> in het proces <sup>1</sup> |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b><i>Power-to-methanol</i></b> | 69 kton CO <sub>2</sub> | 50 kton methanol       | 60 kton                                                      |
| <b>Ethanol</b>                  | CO als input            | 47 kton ethanol        | 20 kton (90 kton vermeden)                                   |
| <b>Micro-algen</b>              | Ruimtegebruik           | 220 ton micro-algen    | 290 ton                                                      |
| <b>Carbonatatie</b>             | Staalslakken            | 42 kton bouwmaterialen | 3,8 kton                                                     |

<sup>1</sup>Netto CO<sub>2</sub> vastgelegd in het CCU-proces in de veronderstelling van volledig hernieuwbare elektriciteitsproductie. In het CCU-productieproces van ethanol en bouwmaterialen wordt bovendien het gebruik van restwarmte verondersteld.

#### 4.4 TECHNOLOGISCH MATURITEITSNIVEAU

De meest gangbare methode om het niveau van een technologieontwikkeling te beoordelen is gebaseerd op zogenaamde *technology readiness level* (TRL)-niveaus, waarbij TRL-1 aangeeft dat er slechts een basis tot een ontwikkeling is gelegd, terwijl TRL-9 aangeeft dat het product volledig ontplooid is in de markt. Een korte duiding van de TRL-niveaus kan teruggevonden worden in Tabel 53.

Tabel 53: Beschrijving van de TRL-niveaus (Horizon2020<sup>39</sup>)

| TRL | Beschrijving                                                                                            |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Principe; het basisidee is bekend.                                                                      |
| 2   | Het technologisch concept is geformuleerd.                                                              |
| 3   | Experimentele proof-of-concept.                                                                         |
| 4   | Technologie is gevalideerd in een laboratoriumomgeving.                                                 |
| 5   | Technologie is gevalideerd in een relevante omgeving.                                                   |
| 6   | Technologie is gedemonstreerd in een relevante omgeving.                                                |
| 7   | Systeemprototype is gedemonstreerd in een operationele omgeving.                                        |
| 8   | Systeem/product is compleet en gekwalificeerd d.m.v. test en demonstratie in een operationele omgeving. |
| 9   | Systeem/product is duurzaam verankerd en bewezen in een operationele omgeving.                          |

Zoals reeds aangehaald in Sectie 2.4 bevinden de 4 *cases* zich al in een semi-commercieel stadium met ingeschatte TRL-niveaus  $\geq 7$  (Tabel 54). Ze zijn dus klaar om gedemonstreerd te worden in een operationele omgeving. Opschaling op dit niveau gaat uiteraard gepaard met grote investeringen en risico's. Als de overheid dit type vlaggenschipprojecten wil stimuleren, zal ze dus minstens mee voor een geschikt investeringsklimaat moeten zorgen.

Tabel 54: Geschatte TRL-niveaus voor de geselecteerde cases in Vlaanderen

| Case                                       | Status productie 2015                      | Geschatte TRL |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| Ethanol uit afgassen van de staalindustrie | 400 ton Ethanol/jaar                       | 7-8           |
| <i>Power-to-methanol</i>                   | 4 000 ton Methanol/jaar                    | 8             |
| Productie van algen                        | 12 ton Biomassa/j (0.4 ha)                 | 7             |
| Constructiematerialen                      | 15 000 ton Bouwmateriaal/jaar <sup>1</sup> | 7             |

<sup>1</sup>Indien continue productie

<sup>39</sup> [http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf)

## 4.5 SYSTEEMANALYSE

### 4.5.1 Doel

De systeemanalyse is een kwalitatieve SWOT-analyse waarin we nagaan hoe afhankelijk een toepassing is van andere factoren en wat de trade-offs zijn van de toepassing. Vragen die in deze analyse gesteld worden zijn:

- Waar komen de andere inputs dan CO<sub>2</sub> vandaan en hoe zeker zijn we van de beschikbaarheid ervan?;
- Hoe ziet de competitie voor deze inputs er uit?;
- Hoe groot is het potentieel van CO<sub>2</sub> captatie?;
- Wat zijn de mogelijke markten voor de output en is er vraag naar deze output? Hoe ziet de competitie voor deze output er uit?;
- Wat is de benodigde technologie en infrastructuur voor toepassing op industriële schaal ?;
- Is de captatie duurzaam? Wat zijn trade-offs van de toepassing en past de toepassing in een sluitende kringloop?

De systeemanalyse geeft uiteindelijk een inzicht in de sleutel succesfactoren van de toepassing. Deze analyse dient tevens ook ongefundeerde mythes tegen én voor CCU bloot te leggen.

De duur van de captatie (de tijd gedurende de welke CO<sub>2</sub> wordt vastgelegd, gaande van kort tot permanent) wordt ook aanzien als een duurzaamheidscriterium. Langdurige captatie kan een positievere bijdrage zijn tot een duurzamere oplossing omdat het CO<sub>2</sub> voor lange tijd uit het systeem haalt en toelaat

- de reductie van CO<sub>2</sub>-emissies te versnellen;
- CO<sub>2</sub>-bronnen te compenseren die technisch of economisch moeilijk te verminderen zijn (bv. luchtvaart).

De netto impact van langdurige of permanente captatie op klimaatdoelstellingen is bovendien minder afhankelijk van schommelingen in captatiepotentieel in een relatief kort cyclisch circulair model.

#### 4.5.2 Power-to-methanol

Tabel 55: Uitgebreide systeemanalyse *Power-to-methanol*

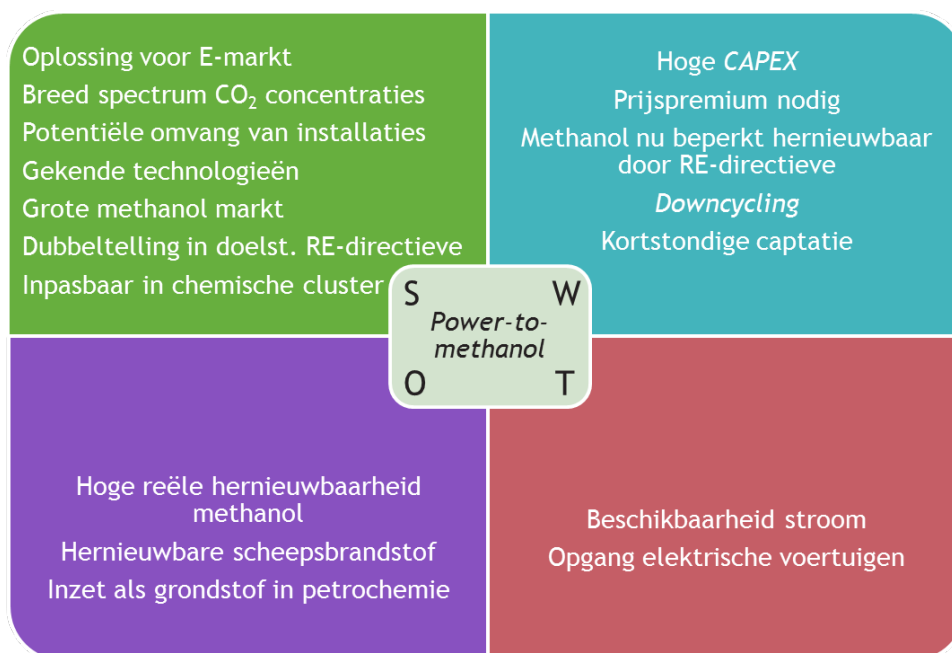
| Power-to-Methanol     |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Input stroom          | S | Stroom is een grondstof die gemakkelijk te transporteren is op voorwaarde dat de capaciteit op het netwerk beschikbaar is.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Input stroom          | S | <i>Power-to-methanol</i> biedt een mogelijke oplossing voor flexibiliteitsmanagement op het elektriciteitsnetwerk, dat kan onderverdeeld worden in balancerings (van vraag en aanbod voor 50 Hz-regeling) en congestiemanagement. <i>Power-to-methanol</i> levert een dienst door het omzetten van stroomoverschotten in waterstof en vervolgens methanol.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Input stroom          | T | Heden, en in de toekomst nog meer, zijn er stroomoverschotten afkomstig van hernieuwbare stroom op ogenblikken van hoge hernieuwbare elektriciteitsproductie en lage totale stroomvraag. Dit heeft lagere stroomprijzen tot gevolg. Hoewel sommige studies naar het marktpotentieel van de omzetting van hernieuwbare elektriciteit naar chemicaliën (bv. “De rol van <i>Power-to-gas</i> in het toekomstige Nederlandse energiesysteem”, juli 2014, ECN en DNV GL) duiden op een risico dat het <u>totale</u> “overschot” aan elektriciteit voor 2030 op zich onvoldoende is om de hoge kapitaalkost van de technologie te verantwoorden (met als gevolg hoge kapitaalslasten per geproduceerde eenheid waterstof en methanol), wijst een recente studie van Elia (2015) wel op een duidelijke nood aan flexibiliteit tegen 2030. |
| Input stroom          | T | Door congestie in het distributienetwerk is het mogelijk dat bestaande stroomoverschotten uit decentrale energieopwekking (hernieuwbaar of niet) decentraal moeten opgeslagen, omgezet of vermeden (bv. door afschakeling) worden. Dit is een gevolg van het feit dat congestiemanagement en balancerings niet op elkaar zijn afgestemd.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Input stroom          | T | <i>Power-to-methanol</i> is één van de vele mogelijke <i>pathways</i> die bekeken worden om stroomoverschotten op te slaan of te vermijden en staat er dus mee in concurrentie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Input CO <sub>2</sub> | S | Er is weinig informatie bekend over de eisen die aan de CO <sub>2</sub> input stroom worden gesteld. De literatuur vermeldt rookgassen met >15% CO <sub>2</sub> . Verwijdering van zwavel is minstens vereist. Het Antwerps Havenbedrijf focust op het gebruik van hoog geconcentreerd CO <sub>2</sub> uit industriële processen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Input CO <sub>2</sub> | W | De Haven voorziet een pilootproject voor 5.000 ton methanol per jaar. Bij <i>upscaling</i> voorziet het in een basiseenheid van 50.000 ton methanol per jaar en een gebruik van ca. 70.000 ton CO <sub>2</sub> per jaar. Indien de gehele fossiele import van de Antwerpse Haven vervangen wordt door methanol uit <i>Power-to-methanol</i> , dient er 420.000 ton CO <sub>2</sub> gebruikt te worden. In realiteit zal er ook nog methanol import zijn van welke oorsprong dan ook. Daarom wordt in deze analyse het CO <sub>2</sub> gebruik voor methanol op 300.000 ton geschat.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Input CO <sub>2</sub> | S | Technisch kan één methanol productie-eenheid vermoedelijk de volledige methanol productie voorzien en 300.000 ton CO <sub>2</sub> gebruiken.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

[illegible]

|                        |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Input waterstof</b> | T | <i>Power-to-methanol</i> loopt over de productie van waterstof uit hernieuwbare energie. Het mogelijke volume aan hernieuwbare waterstof is afhankelijk van het totale overschot aan elektriciteit en is mogelijk beperkt. Methanolproductie zal voor deze hernieuwbare waterstof in concurrentie moeten treden met toepassingen van hernieuwbare waterstof in bv. groene voertuigen.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Technologie</b>     | S | In <i>Power-to-methanol</i> zijn electrolyse en de katalytische omzetting van gecompriëerde gassen tot methanol de twee belangrijke stappen in het proces. Electrolyse van water is een beproefde technologie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Technologie</b>     | W | Voor <i>Power-to-methanol</i> dienen volledig nieuwe installaties gebouwd te worden met een relatief hoge CAPEX.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Output</b>          | S | Momenteel wordt 300.000 ton fossiele methanol ingevoerd en verwerkt in de Haven van Antwerpen. De wereldmarkt bedraagt zo'n 70 Mton en de vraag stijgt. Daarvan zou ongeveer een derde gebruikt worden als brandstof.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Output</b>          | S | De focus ligt in eerste instantie op het gebruik als hernieuwbare brandstof, omdat daar een door de EU opgelegde vraagmarkt voor bestaat. Op basis van de <i>Fuel Quality Directive</i> (2009/30/EC) en CEN standard (EN 228) kan in Europa tot 3 vol-% methanol in diesel gemengd worden. Bovendien zijn er diverse andere toepassingen voor methanol zowel in benzine (MTBE) alsmede de vervanging van diesel. Methanol wordt ook in het bijzonder vermeld als interessante optie voor scheepsbrandstof omdat het ook leidt tot lagere zwavel, stof en NO <sub>x</sub> emissies (Moirangthem, 2016; report DNV GL Shipping Outlook 2025 <sup>40</sup> ). |
| <b>Output</b>          | W | Momenteel is een prijspremium nodig voor een rendabel proces (Bron: interview met Haven van Antwerpen).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Output</b>          | W | De methanol van <i>Power-to-methanol</i> wordt in geval van afname van stroom van het <i>grid</i> door de Europese Commissie op basis van artikel 3 van de RED als hernieuwbaar beschouwd in verhouding tot het gemiddeld aandeel hernieuwbare energie op het <i>grid</i> . Dit is slechts ca. 15%.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Output</b>          | S | Het aandeel hernieuwbare methanol telt dubbel in de doelstelling hernieuwbare energie op basis van de RED.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Output</b>          | O | Indien de RED zou toelaten het aandeel van hernieuwbare energie te berekenen op basis van de garanties van oorsprong van het afnamepunt (EAN-code) van <i>Power-to-methanol</i> , dan zou het aandeel ca. 50% bedragen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Output</b>          | W | Aangezien een deel van de stroom voor de productie van methanol gehaald wordt uit het in balans houden van het gehele net (ook op momenten van grote stroomvraag met grote inzet van kernenergie, gascentrales en stroom import), is deze stroom nooit 100% hernieuwbaar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Output</b>          | T | De opgang van de elektrische voertuigen (ook gestimuleerd door het balanceren van de energiemarkt) en voertuigen op gas zijn belangrijke concurrenten voor de toepassing van methanol voor het verduurzamen van mobiliteit. Elektrische voertuigen kunnen als concurrent voor de ontploffings- of                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

<sup>40</sup> <http://to2025.dnvgl.com/shipping/>

|                       |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |   | hybridemotor mogelijk in de toekomst het marktpotentieel van verkoop van methanol als biobrandstof verkleinen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Infrastructuur</b> | S | <i>Power-to-methanol</i> is een chemisch proces dat perfect thuis hoort in een chemische cluster als de Haven van Antwerpen waar CO <sub>2</sub> beschikbaar is (met beperkte ontwikkeling van transportinfrastructuur) en opslag en transport van methanol gemakkelijk kan georganiseerd worden over het water, spoor en weg.                                                                                                                                                                    |
| <b>Duurzaamheid</b>   | S | Indien methanol als brandstof gebruikt wordt heeft het een positieve impact door de verdringing van fossiele brandstoffen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Duurzaamheid</b>   | W | Indien methanol als transportbrandstof wordt gebruikt, gebeurt de vrijzetting zeer verspreid en verdund. Indien een zuivere geconcentreerde CO <sub>2</sub> bron wordt gebruikt is de toestand van de CO <sub>2</sub> na vrijzetting minder gunstig en is er dus sprake van <i>downcycling</i> . Zolang het aanbod aan zuivere stromen veel groter is dan de vraag ernaar door technologieën waar <i>downcycling</i> minder uitgesproken is, stelt het probleem van <i>downcycling</i> zich niet. |



Figuur 43: SWOT-analyse *Power-to-methanol*

### 4.5.3 Ethanol

Tabel 56: Uitgebreide systeemanalyse ethanol

| Ethanol        |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Input          | S | De technologie werd al getest op industriële afgassen, vooral uit de staalindustrie, maar komt ook in aanmerking voor andere gasstromen die CO, CO/H <sub>2</sub> of CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> bevatten. De gehalten aan CO en H <sub>2</sub> zijn best zo hoog mogelijk.<br>Een brede range van CO/H <sub>2</sub> verhoudingen kan in het proces gebruikt worden. Storende parameters zijn zwavelhoudende componenten zoals SO <sub>x</sub> en H <sub>2</sub> S, HCN, stof en BTX. Deze zullen dus via een juiste voorbehandeling verwijderd moeten worden. |
| Input CO       | W | Ethanol wordt in hoofdzaak uit CO geproduceerd. Er worden dus vooral onrechtstreeks CO <sub>2</sub> -emissies (o.a. afkomstig van CO-verbranding) vermeden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Technologie    | W | Er zijn nog belangrijke technologische uitdagingen gelinkt aan de grootte van de opschalingsstap en de robuustheid onder industriële omstandigheden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Technologie    | W | Voor ethanolproductie dienen volledig nieuwe installaties gebouwd te worden met een relatief hoge CAPEX.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Output         | S | De ethanolmarkt bedraagt > 50 Mton/jaar wereldwijd.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Output         | W | Zonder premium voor “groene” ethanol <i>versus</i> het fossiele alternatief is het proces mogelijk niet rendabel.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Output         | W | Het is niet zeker of een erkenning als hernieuwbare brandstof of biobrandstof volgens de definities van de RED mogelijk is.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Output         | O | Gelijkstelling van de via deze weg geproduceerde ethanol met hernieuwbare brandstoffen met de voorwaarde dat de CO <sub>2</sub> -intensiteit van de brandstof verlaagt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Output         | S | De focus ligt in eerste instantie op het gebruik als brandstof, omdat daar een door de EU opgelegde vraagmarkt voor bestaat. Op basis van de <i>Fuel Quality Directive</i> (2009/30/EC) en CEN standard (EN 228) kan in Europa tot 10 vol-% ethanol in diesel gemengd worden.                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Output         | T | De opgang van elektrische voertuigen (ook gestimuleerd door het balanceren van de energiemarkt) en voertuigen op gas zijn belangrijke concurrenten voor de toepassing van ethanol voor het verduurzamen van mobiliteit.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Infrastructuur | S | Productie van ethanol is een biochemisch proces dat perfect thuis hoort in een industriële cluster waar CO <sub>2</sub> of afgassen beschikbaar zijn (met beperkte ontwikkeling van transportinfrastructuur) en opslag en transport van ethanol gemakkelijk kan georganiseerd worden over water, spoor en weg.                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Duurzaamheid   | W | De CO wordt momenteel verbrand tot CO <sub>2</sub> met recuperatie van energie. De CO <sub>2</sub> wordt dus geëmitteerd in geconcentreerde vorm. Als de CO omgezet wordt naar ethanol, wordt er bij gebruik als transportbrandstof verspreid en verdund CO <sub>2</sub> vrijgezet. Er is dan sprake van <i>downcycling</i> .                                                                                                                                                                                                                                      |
| Duurzaamheid   | O | Indien ethanol in de petrochemie wordt gebruikt als grondstof kan er een positief effect zijn door verdringing van fossiele brandstoffen (geen bijkomende CO <sub>2</sub> ).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

////////////////////////////////////  
 //////////////////////////////////////



#### 4.5.4 Micro-algen

Tabel 57: Uitgebreide systeemanalyse micro-algen

| Micro-algen           |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Input reststoffen     | O | Groei van micro-algen kan in principe op basis van afvalwaters die rijk zijn aan nutriënten.                                                                                                                                                                                                 |
| Input CO <sub>2</sub> | S | De CO <sub>2</sub> -input dient vrij te zijn van zwavel maar mag NO <sub>x</sub> bevatten. De CO <sub>2</sub> concentratie mag relatief laag zijn.                                                                                                                                           |
| Input CO <sub>2</sub> | W | CO <sub>2</sub> captatie door micro-algen is zeer landintensief. In een gematigd klimaat zoals dat van Vlaanderen kan een productiviteit behaald worden van 30-60 ton droge biomassa per hectare per jaar waarbij 55 tot 110 ton CO <sub>2</sub> per hectare per jaar kan gecapteerd worden. |
| Input CO <sub>2</sub> | W | Voor toepassing als larvaal voedsel, moeten de geoogste micro-algen gedroogd worden en dit vereist energie-intensieve technieken. Verdere extractie- en zuiveringsstappen voor het isoleren van bepaalde chemicaliën zijn echter niet nodig.                                                 |
| Input CO <sub>2</sub> | W | De geplande productiecapaciteit van Proviron tegen 2020 heeft een CO <sub>2</sub> captatiepotentieel van slechts ca. 220 ton per jaar.                                                                                                                                                       |
| Technologie           | W | De courante productiesystemen voor micro-algen hebben nog belangrijke nadelen en zijn zeer gevoelig en duur door de kost aan procescontrole en voortdurende monitoring ( <i>Roadmap</i> Micro-algen, FISCH, Februari 2014).                                                                  |
| Output                | S | De marktwaaarde van het eindproduct van Proviron is hoog (bron: interview met Proviron).                                                                                                                                                                                                     |
| Output                | S | In dierlijke voeding mogen algen momenteel zonder beperking gebruikt worden mits implementatie van de GMP principes.                                                                                                                                                                         |
| Output                | T | Verstrengende wetgeving inzake voedselveiligheid en verschillen in internationale regelgeving kunnen een rem zijn op de groei van algenteelt voor menselijke voeding en dierenvoeding.                                                                                                       |
| Output                | B | Het leveren van grote, constante hoeveelheden biomassa van micro-algen is momenteel nog niet mogelijk.                                                                                                                                                                                       |
| Infrastructuur        | W | CO <sub>2</sub> captatie door micro-algen is landintensief.                                                                                                                                                                                                                                  |
| Duurzaamheid          | O | Micro-algen kunnen ook gebruikt worden voor andere toepassingen dan de huidige toepassing van Proviron, bv. in de farmacie, als brandstof of als vuller in traditionele plastics ter vervanging van petroleum-gebaseerde vullers.                                                            |

////////////////////////////////////



#### 4.5.5 Carbonatatie

Tabel 58: Uitgebreide systeemanalyse carbonatatatie

| Carbonatatie          |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Input reststoffen     | S | Carbonatatie zet in op het valoriseren van een restfractie van de recyclage van slakken uit de metaalindustrie, het zogenaamde slakkenzand. Dankzij de CCU-technologie kan deze fractie hoogwaardig ingezet worden als grondstof en verdringt het een deel van de productie van cement en de daarmee gepaard gaande uitstoot van CO <sub>2</sub> . |
| Input reststoffen     | S | Slakkenzand van de metaalindustrie wordt in grote hoeveelheid geproduceerd op een beperkt aantal plaatsen, in Genk en Gent samen ca. 1 Mton. Eén ton slakkenzand kan ca. 150 kg CO <sub>2</sub> opnemen. Slakkenzand is gemakkelijk in bulk te transporteren, veelal over het water, door de ligging van de staalfabrieken.                        |
| Input reststoffen     | O | Door diversificatie in de input van reststoffen (bv. slakken uit verbrandingsinstallaties of zeefzand uit betonbrekers waarop al testen zijn uitgevoerd) kan de hoeveelheid te verwerken CO <sub>2</sub> verhoogd worden.                                                                                                                          |
| Input CO <sub>2</sub> | W | Bij een totale hoeveelheid van 1 Mton slakkenzand uit de metaalindustrie kan slechts ca. 150.000 ton CO <sub>2</sub> verwerkt worden.                                                                                                                                                                                                              |
| Input CO <sub>2</sub> | S | Het proces is optimaal bij CO <sub>2</sub> concentraties van > 20 %, maar is ook mogelijk bij veel lagere concentraties (er zijn testen uitgevoerd tot 15 % CO <sub>2</sub> ).                                                                                                                                                                     |
| Input CO <sub>2</sub> | W | De optimale schaalgrootte voor het Carbstone proces wordt momenteel ingeschat op verwerking van 30.000 tot 40.000 ton CO <sub>2</sub> /jaar per productie-eenheid met een optimale aanvoer van ca. 250.000 ton aan grondstoffen.                                                                                                                   |
| Technologie           | S | De technologie is relatief eenvoudig en breed toe te passen. Een bestaande betonfabriek met een output van ca. 250.000 ton product kan relatief eenvoudig aangepast worden (enkel de klimaatkamers dienen aangepast te worden).                                                                                                                    |
| Output                | S | De markt van betonklinkers en aanverwante betonproducten is zeer groot en redelijk stabiel. Bovendien is deze markt lokaal en wordt weinig beïnvloed door internationale concurrentie.                                                                                                                                                             |
| Output                | S | Betonklinkers via carbonatatie worden geproduceerd tegen concurrentiële prijs (bron: interview met Carbstone).                                                                                                                                                                                                                                     |
| Output                | S | Onderzoek op eindproducten uit productie op pilotschaal wijst uit dat het eindproduct beantwoordt aan de Europese productennormen (bron: interview met Carbstone Innovation).                                                                                                                                                                      |
| Output                | T | De producten dienen in een conservatieve markt het vertrouwen van de bouwaannemer nog te winnen. De keuringen op industrieel niveau zijn nog niet gebeurd. Bovendien is het eindproduct een vervangproduct zonder commerciële en technische meerwaarde t.o.v. de bestaande producten op basis van cement.                                          |

[illegible]



#### 4.5.6 Bijkomend CO<sub>2</sub>-perspectief

#### 4.5.6.1 CO<sub>2</sub>-emissierechten

In de systeemanalyse werd de marktprijs van CO<sub>2</sub>-emissierechten in het ETS niet besproken omdat de verschillende pistes hiervoor geen inkomsten in rekening brengen. Vermoedelijk zijn hiervoor 2 redenen:

- De huidige prijs van de CO<sub>2</sub>-emissierechten is van die orde dat hij geen grote impact heeft op het financieel plan in vergelijking met bepaalde andere kosten;
- In de huidige Europese wetgeving moeten installaties die onder het EU ETS vallen sowieso emissierechten inleveren voor alle CO<sub>2</sub>-emissies die ontstaan en vervoerd worden buiten de ETS-sector, ook al worden deze CO<sub>2</sub>-emissies afgevangen en gebruikt in een nieuw productieproces.

Inkomsten uit eventueel veel hoger gewaardeerde CO<sub>2</sub>-emissierechten dan vandaag kunnen vanzelfsprekend een doorslaggevende factor worden voor de meeste technologieën indien de Europese wetgeving het mogelijk maakt om vermeden CO<sub>2</sub>-emissie wel pro-rata in mindering te brengen.

#### 4.5.6.2 CO<sub>2</sub>-captatiekosten

De kostprijs voor de voorbehandeling van het CO<sub>2</sub> om bv. eventuele onzuiverheden te verwijderen is voor alle pistes nog onduidelijk. Vooralsnog wordt aangenomen dat de kostprijs voor de voorbehandeling voor alle pistes van dezelfde grootte orde is, al hebben *Power-to-methanol* en ethanol het voordeel van schaalgrootte. Momenteel mikken alle *cases* op de relatief zuivere CO<sub>2</sub>-stromen waarvoor de kosten voor zuivering en captatie lager liggen.

#### 4.5.6.3 CO<sub>2</sub>-transportkost

In deze paragraaf wordt een inzicht gegeven in transportkosten van CO<sub>2</sub> per pijpleiding. Andere transportvormen worden in deze studie niet besproken omdat de hoeveelheden te transporteren CO<sub>2</sub> van die grootte orde zijn (> 30.000 ton per jaar) dat transport per pijpleiding vermoedelijk het meest aangewezen is.

De transportprijs per ton CO<sub>2</sub> is sterk afhankelijk van de hoeveelheid te transporteren CO<sub>2</sub>, de transportafstand, de transportdruk, de vorm (gas of vloeibaar) en de duur van het project. De verschillende besproken technologieën onderscheiden zich o.a. op vlak van de nodige invoerdruk van de CO<sub>2</sub>. Bij de *Power-to-methanol case* ligt deze druk rond 30 bar, bij de *ethanol case* rond 7 bar, bij het Carbstone proces rond 5 bar en bij de algenteelt vermoedelijk lager dan 5 bar. Om deze invoerdruk te bekomen dient de CO<sub>2</sub> tussen bron en gebruik gecomprimeerd te worden, bij voorkeur na captatie bij de bron omdat dan de diameters van de transportleidingen beperkt kunnen worden. De kostprijs van compressie is een belangrijke factor in de totale transportkost en kan oplopen tot ca. 85%.

De kostprijs per ton CO<sub>2</sub> is ingeschat voor een vergelijkbaar scenario voor alle 4 technologieën met gelijke jaarlijkse hoeveelheid te verwerken CO<sub>2</sub> (ca. 50 kton per jaar ongeveer overeenkomend met de pilootfases van *Power-to-methanol* en ethanol en een industriële schaal van carbonatatie), gelijke projectduur en gelijke transportafstand (2 tot 3 kilometer). Ruwe schattingen voor compressie en transport van CO<sub>2</sub> onder gasvorm op basis van eerdere projecten waarin DNV GL betrokken was (vnl. in Nederland) geven een kostenrange tussen ca. 40 euro/ton CO<sub>2</sub> voor de lagere drukken (5 bar) en ca. 65 euro/ton CO<sub>2</sub> voor de hogere druk. Door

[illegible]

een aantal factoren zoals ligging, inpassing in bestaande leidingstraten, ruimtelijke ordening, ... kunnen de effectieve kosten voor elke technologie in belangrijke mate afwijken. Indien *Power-to-methanol* en ethanol evolueren naar een hogere schaalgrootte zal de transportkost per ton CO<sub>2</sub> ook dalen.

#### 4.5.7 Besluit

Uit de systeemanalyses kan o.a. het volgende besloten worden.

#### 4.5.7.1 Input

- Inkomsten uit eventueel veel hoger gewaardeerde CO<sub>2</sub>-emissierechten dan vandaag kunnen vanzelfsprekend een doorslaggevende factor worden voor de meeste technologieën indien de Europese wetgeving het mogelijk maakt om vermeden CO<sub>2</sub>-emissie wel in mindering te brengen;
- Beschikbaarheid van noodzakelijke andere input of inkomsten dan CO<sub>2</sub> dient gemaximaliseerd te worden, bv. in het geval van de flexibiliteitsdienst van *Power-to-methanol*, reststoffen voor carbonatie en warmte voor ethanol;
- *Downcycling* na kortstondige captatie van zuivere CO<sub>2</sub>-stromen is op langere termijn te vermijden.

#### 4.5.7.2 Technologie

- CCU-technologie is ontwikkeld en veelal bewezen op semi-industriële schaal maar de kostprijs voor de captatie en voorbehandeling van het CO<sub>2</sub> is voor alle pistes nog onduidelijk.

#### 4.5.7.3 Infrastructuur

- Infrastructuur voor CO<sub>2</sub>-transport is nog niet aanwezig en de infrastructuurkosten zijn gelijkwaardig voor de geanalyseerde technologieën. De kostprijs per ton wordt in grote mate bepaald door de compressie;
- De locatie voor een CCU-site dient zo gekozen te worden dat de milieu-impact en de kosten voor aanvoer van CO<sub>2</sub> en andere grondstoffen redelijk zijn.

#### 4.5.7.4 Output en duurzaamheid

- De “kwaliteit” van de captatie wordt o.a. bepaald door:
  - directe en indirecte emissies voor captatie, transport, gebruik van de CO<sub>2</sub> in een LCA-benadering (dit geldt nog meer voor niet-EU ETS dan voor EU ETS);
  - de graad van permanentie (bv. zeer lange termijn bij carbonatatie);
  - het circulair karakter van het CO<sub>2</sub>-gebruik (bv. bij biobrandstoffen, maar ook bij *Power-to-methanol*);
  - eventueel ook de netto meerwaarde (in LCA-opzicht) van de CCU-technologie t.o.v. alternatieven (bv. de netto toegevoegde waarde van het gebruik van afgassen bij ethanol t.o.v. gebruik als brandstof in een elektriciteitscentrale).
- Diversificatie van eindproducten waarin CO<sub>2</sub> wordt opgeslagen verhoogt de marktkansen van een CCU-technologie;
- De locatie voor een CCU-site dient zo gekozen te worden dat de milieu impact voor afvoer van de eindproducten redelijk is.

Deze systeemanalyse geeft een inzicht hoe een CCU-beleid op deze factoren kan inspelen.

////////////////////////////////////

## 4.6 ALGEMEEN BESLUIT

Tabel 59 geeft kwalitatief weer hoe de 4 cases zich verhouden voor de 4 geanalyseerde criteria.

De cases zijn technologisch even marktrijp en dienen nu gedemonstreerd te worden in een operationele omgeving.

Carbonatatie en de productie van micro-algen zijn winstgevend onder de gemaakte assumpties, maar scoren lager in schaalgrootte. De lage CO<sub>2</sub>-sequestratie per ton bouw materiaal en de hoeveelheid beschikbare staalslakken, zijn belangrijke limiterende factoren voor bredere toepassing in het Vlaamse gewest. Door diversificatie in de input van reststoffen kan de hoeveelheid te verwerken CO<sub>2</sub> echter verhoogd worden. Voor algenteelt is het de geringe markt van larvale voeders die de schaalgrootte beperkt. Hoewel een verruiming van toepassingen de vraag naar micro-algen kan vergroten, zal dit de schaalgrootte maar beperkt beïnvloeden wegens het oppervlaktebeslag.

*Power-to-methanol* is momenteel nog niet concurrentieel met de fossiele brandstoffen maar heeft het grootste potentieel om CO<sub>2</sub> vast te leggen en past in de circulaire economie. Om ten volle gebruik te maken van het potentieel voor CO<sub>2</sub> besparing en een bredere afzetmarkt te garanderen, kan gediversifieerd worden naar andere producten en dus *Power-to-X* concepten.

Ethanolproductie uit hoogovensgas is economisch haalbaar onder de gemaakte assumpties. In dit geval is er sprake van verminderde CO<sub>2</sub>-emissies t.o.v. de huidige situatie waarin de gassen verbrand worden met opwekking van energie, tenminste wanneer dit verlies aan energie gecompenseerd wordt door hernieuwbare elektriciteitsproductie.

Voor beide brandstoffen geldt wel dat bij gebruik als transportbrandstof de duur van de CO<sub>2</sub>-vastlegging beperkt is en dat er *downcycling* plaatsvindt, in de zin dat emissies van puntbronnen uiteindelijk verspreid en verdund worden vrijgezet na verbranding van de brandstoffen. Bovendien is er in de toekomst mogelijk concurrentie te verwachten van elektrische voertuigen. De aanwending van de brandstoffen voor industriële doeleinden vermijdt *downcycling*.

Tabel 59: Overzicht van de cases in functie van de verschillende criteria. Groen: gunstig, rood: ongunstig, oranje: gunstig onder bepaalde condities

|                    | Methanol | Ethanol | Micro-algen | Bouwmaterialen |
|--------------------|----------|---------|-------------|----------------|
| Emissiereductie    | Orange   | Orange  | Orange      | Green          |
| Potentiële winsten | Orange   | Green   | Green       | Green          |
| Schaalgrootte      | Green    | Green   | Red         | Orange         |
| TRL                | Green    | Green   | Green       | Green          |



## 5.1 WAAROM CCU-BELEID?

- CCU biedt kansen voor nieuwe oplossingen en business modellen voor energie-transitie (bv. door het aanbieden van flexibiliteitsdiensten);
- CCU biedt een nieuw potentieel voor technologie-innovatie in bedrijfstakken waar de technologische evolutie trager verloopt (bv. aanmaak van klinkers).

Een gericht CCU-beleid kan de ontwikkeling van CCU stimuleren van CO<sub>2</sub>-bron tot CCU-output door

- de acceptatie van CCU en de producten ervan te helpen vergroten;
- doorbraken te helpen forceren bij gemeenschappelijke problemen bv. op vlak van captatie en transport van CO<sub>2</sub>;
- de ontwikkeling van nieuwe beloftevolle CCU-technologieën te stimuleren;
- mogelijk te maken dat het hergebruik van CO<sub>2</sub> in rekening wordt gebracht in CO<sub>2</sub>-emissie inventarissen;
- het opschalen van CCU in functie van de klimaatdoelstellingen.

Een specifieke CCU-beleid kan ook verstorend werken indien het geen rekening houdt met zijn omgeving, bv. het internationaal klimaatbeleid en de markt van vraag en aanbod van producten.

Een CCU-beleid dient ingepast te worden in het bestaand kader van het internationaal klimaatbeleid. De relatie met het EU ETS is in dit opzicht heel belangrijk omdat de meest interessante CO<sub>2</sub>-bronnen in de regel EU ETS bedrijven zullen zijn. Een belangrijk aspect hierbij is dat er een juist inzicht is in de gerealiseerde netto CO<sub>2</sub>-vastlegging van een CCU-technologie op basis van LCA van CO<sub>2</sub>-bron tot en met gebruik van de CCU-output. Om de milieu-integriteit van het klimaatbeleid te bewaren moet er op toegezien worden dat CO<sub>2</sub>-emissies die na een tijdelijke vastlegging terug in de atmosfeer worden gebracht worden opgenomen in de BKG-emissie-inventarissen.

Een specifieke CCU-beleid kan ook marktverstoringen veroorzaken indien het leidt tot de promotie van CCU-technologieën en -producten waar de markt niet om vraagt. Er kan een soort *lock-in* effect ontstaan waarbij het klimaatbeleid afhankelijk is van producten met weinig marktvraag waardoor deze producten kunstmatig moeten worden gepromoot. Het CCU-beleid dient in principe echter geen onderscheid te maken in technologieën indien de CO<sub>2</sub>-emissie inventarissen rekening houden met de netto CO<sub>2</sub>-vastlegging van een CCU-technologie. Een “technologieneutraal” beleid heeft als voordeel dat

- nieuwe technologieën en toepassingen alle kansen gegeven worden want CCU staat uiteindelijk nog in kinderschoenen;
- het gamma aan CCU-technologieën mee evolueert met de vraag aan producten uit de markt;
- de CCU-technologieën blijvend de rentabiliteit in het oog moeten houden;
- er geen *lock-in* effect ontstaat.

////////////////////////////////////

Het beleid kan wel voor bepaalde technologieën specifieke gunstmaatregelen uitwerken bv. indien een technologie

- voor schaalgrootte in het klimaatbeleid zorgt;
- voor *backbone* kan zorgen op vlak van captatie en transport waarop andere technologieën zich kunnen aansluiten.

In de volgende paragrafen wordt een mogelijk CCU-beleid meer concreet uitgewerkt met voorstellen voor mogelijke beleidsmaatregelen.

### 5.1.2 Aanpak

In een eerste paragraaf wordt de context van het lokaal en internationaal klimaat- en energiebeleid kort toegelicht omdat ze de belangrijkste specifieke beleidscontext vormen voor CCU (Figuur 47). Bij dit beleid wordt kort aangegeven in welke mate ze nu al CCU, en in het bijzonder de 4 onderzochte *cases*, ondersteunen. De ruimere context van het economisch en innovatiebeleid wordt in deze studie niet toegelicht.

Vervolgens wordt overlopen welk beleidsinstrumentarium op vlak van o.a. klimaat, energie, economie en innovatie beschikbaar is om CCU beter te ondersteunen. De mogelijkheden zijn geïdentificeerd op basis van eerdere studies zoals bv. de “Evaluatie van het beleidskader en identificatie van beleidsinstrumenten voor het faciliteren van CC(U)S-projecten in Vlaanderen” (Laenen et al., 2013) en de bevindingen uit de vorige hoofdstukken van deze studie. De beleidsmogelijkheden worden breed opgevat, dit wil zeggen breder dan het klimaatbeleid zoals beschreven in Sectie 5.2.

Op basis van de beleidsopties wordt een beleidsvisie voorgesteld die rekening houdt met de ecologische, economische en innovatieve meerwaarde die CCU te bieden heeft.

Tenslotte wordt de beleidsvisie kort uitgewerkt in beleidsplannen voor de korte en langere termijn.



Figuur 47: Visuele voorstelling van de aanpak voor het uitwerken van een CCU-beleid

## 5.2 KLIMAAT- EN ENERGIEBELEID

Voor Vlaanderen is het Europees klimaatbeleid het belangrijkste internationaal beleidskader voor klimaat en energie. In 2008 heeft het Europees Parlement het Europese Klimaat/Energiepakket (2013-2020) goedgekeurd. Met dit pakket schuift de Europese Unie onder de doelstellingen voor 2020 van een vermindering met 20% van de uitstoot van broeikasgassen t.o.v. 1990.

De volgende wettelijke initiatieven dienen om deze doelstelling te realiseren:

- de Richtlijn emissiehandel (EU ETS);
- de beschikking over de verdeling van de inspanningen tussen de lidstaten (Non-EU ETS);
- de richtlijn hernieuwbare energie;
- het energie-efficiëntieplan en de richtlijn energie-efficiëntie;
- de richtlijn betreffende de geologische opslag van koolstofdioxide (CCS).

In het klimaatpakket voor 2030 en de Routekaart 2050 zijn nog ambitieuzere doelstellingen opgenomen. Het gamma wettelijke initiatieven zal hiervoor herzien en uitgebreid moeten worden. De specifieke voorgestelde initiatieven ter stimulatie van CCU in deze studie kunnen hierin zeker kaderen.

### 5.2.1 De richtlijn emissiehandel (EU ETS)

Het EU ETS is het Europees systeem voor het verhandelen van uitstootrechten van broeikasgassen. Het systeem is gebaseerd op de EU ETS-directieve (Richtlijn 2003/87/EG<sup>41</sup>). Er vallen meer dan 11.000 fabrieken, elektriciteitscentrales en andere installaties onder dit systeem in Europa. Deze installaties zorgen samen voor ongeveer de helft van de CO<sub>2</sub>-emissies en 40% van de totale broeikasgasemissies van de EU. Het systeem is een *cap and trade* systeem waarbij een maximumuitstoot van broeikasgassen wordt bepaald. Deze mogelijke uitstoot wordt enerzijds geveild onder de vorm van emissierechten en anderzijds deels toegewezen als gratis emissierechten. Installaties moeten zelf hun CO<sub>2</sub>-emissies meten en rapporteren. Wanneer de installatie meer uitstoot dan rechten heeft, moet ze emissierechten bijkopen. Omgekeerd kan een installatie haar rechten verkopen wanneer ze minder uitstoot. Dit zorgt er in theorie voor dat zonder al te veel overheidsinterventie, de goedkoopste methode tot het terugdringen van broeikasgasemissies wordt gevonden.

Van 2005 tot en met 2007 liep een eerste fase om het systeem te testen. De tweede fase liep van 2008 tot en met 2012. In deze fase zijn de flexibele mechanismen toegevoegd, waardoor installaties onder het ETS beperkt “emissiekredieten” afkomstig van het *Joint Implementation* (JI) systeem en het *Clean Development Mechanism* (CDM) konden gebruiken.

De derde fase loopt tot december 2020, het jaar waarin de emissiereductie doelstelling van 20% (t.o.v. 1990) moet bereikt worden. In deze derde fase neemt de cap af met 1,74% per jaar. Na het jaar 2020 begint de vierde fase waarin de uitstoot verder en sneller teruggebracht dient te worden.

<sup>41</sup> <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=celex:32003L0087>

In Tabel 60 wordt aangegeven in welke mate CCU in het EU ETS is opgenomen. CCS is tevens opgenomen als een vergelijkingspunt.

|        | CCS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | CCU                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EU ETS | <p>Gecapteerde en getransfereerde fossiele CO<sub>2</sub> wordt afgetrokken van de installatie inventaris van een individuele installatie, verdere reglementering in EU CCS Directive (2009/31/EC) met een belangrijke focus op de monitoring en controle van de lektheid van het systeem van afvang, over transport tot opslag.</p> | <p>Gecapteerde en vastgelegde fossiele CO<sub>2</sub> in de eigen installatie kan verrekend worden in de installatie inventaris op basis van de massabalans methode. Gecapteerde en getransfereerde fossiele CO<sub>2</sub> wordt afgetrokken van de installatie inventaris indien <b>getransfereerd als inherent in een brandstof naar een installatie die opgenomen is in EU ETS</b> (bv. de huidige transfer van CO/CO<sub>2</sub> van ArcelorMittal naar een elektriciteitscentrale). De gecapteerde en getransfereerde fossiele CO<sub>2</sub> wordt afgetrokken van de installatie van vertrek en bijgeteld bij de ontvangende installatie.</p> <p><i>Deze reglementering is niet van toepassing voor transfer van CO<sub>2</sub> naar de 4 onderzochte technologieën omdat ze op zich zelf staande installaties zijn met technologieën die niet onder het toepassingsgebied van het EU ETS vallen. Dit wil zeggen dat de getransfereerde en gecapteerde CO<sub>2</sub> als geëmitteerd wordt beschouwd en er dus emissierechten voor voorzien moeten worden.</i></p> |

Tabel 61: Ondersteuning CCS en CCU in NER

De CDM/JI systemen zijn niet van toepassing voor CCU-projecten binnen Vlaanderen omdat de flexibele mechanismen projecten in het buitenland betreffen. Enkele CDM-methodes beschrijven echter wel CCU toepassingen, met o.a. sterke raakvlakken met carbonatatie voor wat betreft AM0027 en AM0015. Het gaat om volgende methodes:

- ### 5.2.2 De beschikking over de verdeling van de inspanningen tussen de lidstaten (Niet-EU ETS)

Deze nationale doelstellingen van een lidstaat voor niet-EU ETS worden uitgedrukt in percentages in vergelijking met 2005. Voor Europa is het percentage globaal gelijk aan -10 % in 2020 in vergelijking met 2005, voor België bedraagt het -15 %. De beschikking focust niet alleen op het jaar 2020. In feite bepaalt ze jaarlijkse uitstootlimieten volgens een lineair traject tussen 2013 en 2020.

Op gewestelijk niveau werd een klimaatplan uitgewerkt waarbij in het kader van deze analyse het Vlaams mitigatieplan voor (niet-EU ETS) industrie relevant is. CO<sub>2</sub> bronnen voor CCU zijn voornamelijk EU ETS-industrie gerelateerd maar het gebruik van CO<sub>2</sub> via CCU vindt meestal plaats in niet-EU ETS bedrijven.

////////////////////////////////////



De Annex IX van de RED geeft een overzicht van brandstoffen die tweemaal mogen meegerekend worden in het behalen van de doelstelling voor hernieuwbare brandstoffen. Een categorie is in het bijzonder voor CCU relevant: (s) CCU voor transport doeleinden, op voorwaarde dat de energiebron hernieuwbaar is.

Brandstoffen uit CCU zijn niet noodzakelijk hernieuwbare brandstoffen (energie uit niet-fossiele bronnen). De hernieuwbaarheid van brandstoffen uit CCU is op basis van de RED immers niet afhankelijk van de C-bron, wel van de energiebron (bv. energie uit wind of biomassa) die hernieuwbaar moet zijn. Een CCU brandstof is enkel een biobrandstof indien geproduceerd met hernieuwbare energie zoals gedefinieerd in de directieve. Hierdoor worden CCU brandstoffen benadeeld ten opzichte van biobrandstoffen, zelfs indien een zelfde hoeveelheid CO<sub>2</sub> wordt vermeden.

Bij de toetsing van het Steelanol project aan de RED benadrukte de Europese Commissie dat de gebruikte warmtebron van hernieuwbare oorsprong moet zijn.

De methanol van *Power-to-methanol* wordt in geval van afname van stroom van het *grid* door de Europese Commissie als hernieuwbaar beschouwd, echter enkel in verhouding tot het gemiddeld aandeel hernieuwbare energie op het *grid*. De reden hiervoor is de volgende:

- De RED voorziet in doelstellingen per lidstaat inzake het aandeel hernieuwbare energie in het totale energieverbruik. Voor het elektrische energieverbruik voorzag de EC in een systeem van Garanties van Oorsprong (GO) voor de hernieuwbare *labelling* van de corresponderende stroompakketten. De EC liet de vrije handel van de GO's toe binnen de EU (incl. IJsland, Noorwegen, Zwitserland).
- Door een overaanbod van GO's alternatief voor een (te subsidiëren) binnenlandse hernieuwbare elektriciteitsproductie door extern aangekochte GO's haar quota inzake hernieuwbare energieproductie kon halen. Om dergelijke ondergraving van het beleid inzake de opbouw van hernieuwbare energieproductie te vermijden, voorzag de EC voor de RED daarom specifiek voor het luik hernieuwbare elektriciteitsproductie de telling op niveau van de binnenlandse productie en niet het aandeel in het eindverbruik.
- Door deze (GO-)telling op niveau van de productie ontstaat hierbij bovendien een situatie van dubbeltelling in geval van benutting van dezelfde GO's voor de input van hernieuwbare elektriciteit voor de aanmaak van hernieuwbare brandstoffen, nodig ter realisatie van de subdoelstelling hernieuwbaar transport. De RED verbiedt daarom de toepassing van GO's voor de invulling van 0,5 % doelstelling inzake de inzet van hernieuwbare brandstoffen.
- Hierdoor zou het probleem ontstaan van de onmogelijkheid van de aanmaak van brandstoffen vanuit elektrische energie, d.w.z. of op basis van elektrische energie aangemaakte *liquid fuels* (zogenaamde *electrofuels*) of voeding van elektrische wagens. Het zijn echter net deze brandstoffen die voor een groot deel de via het ILUC-amendement op de RED geïntroduceerde vraag naar geavanceerde brandstoffen zullen moeten invullen.

Art. 4.3.c van de RED biedt daarom een tussenoplossing, waarbij voor de hernieuwbare brandstoffen uit elektriciteit de gemiddelde aanwezigheid van hernieuwbare energie in het elektrische *grid* kan gebruikt worden (EU of lidstaat, naar keuze). Voor elektrische voertuigen mag zelfs geheel abstractie gemaakt worden

[illegible]

van de oorsprong en wordt de energie de facto als hernieuwbaar beschouwd. De facto laat de RED dus een dubbeltelling toe, gaande van het aandeel hernieuwbare energie in het *grid* voor *liquid fuels* tot 100% in het geval van de voeding van elektrische voertuigen.

Deze maatregel creëert echter een sterke bevoordeling van elektrische wagens. Ten tweede is het voor aanmaak van hernieuwbare brandstoffen uit elektriciteit voorziene regime economisch niet haalbaar. Immers maximaal een percentage van de geproduceerde brandstof, gelijk aan de *grid mix*, kan als hernieuwbaar gelabeld en dus vermarkt worden.

### 5.2.5 Belgisch energiebeleid

In het Belgisch energiebeleid komen o.a. de volgende thema's aan bod:

- de organisatie van de gas- en elektriciteitsmarkt;
- de afbouw van het gebruik van kernenergie;
- de toepassing van het Federaal Plan Duurzame Ontwikkeling;
- de strijd tegen de opwarming van de aarde;
- internationale samenwerking;
- de diversificatie van energiedragers en de betrokken sectoren;
- verder overleg tussen de Federale overheid en de Gewesten.

#### 5.2.5.1 Bewaken van energiebalansen

Het bewaken van de energiebalansen is in de organisatie van de gas- en elektriciteitsmarkt één van de belangrijkste taken. De energiebalansen verschaffen een geëigend kader voor een systematische meting van het verschil tussen het energieaanbod (zichtbaar brutoverbruik van primaire energie) en de vraag (finaal energieverbruik).

De werking van de elektriciteits- en gasmarkt wordt in de praktijk opgevolgd door regulatoren. Dit zijn instellingen met de wettelijke bevoegdheid om bepaalde aspecten van de markt te reguleren, zoals een controle op prijzen, concurrentie, openbare dienstverplichtingen en marktmechanismen. De federale Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas of CREG heeft een adviserende functie ten behoeve van de overheid en moet er eveneens op toezien dat alle marktpelers de wetten en de regelgeving respecteren. De CREG controleert het beheer van de gas- en elektriciteitstransmissienetten (hoge druk en hoogspanning).

De Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt of VREG is verantwoordelijk voor de goede werking van de Vlaamse energiemarkt. De VREG is bevoegd voor de regulatie van het distributienetbeheer. VREG beheert ook de databank van garanties van oorsprong. Dit is een bewijsstuk waarmee men de afkomst van de geproduceerde elektriciteit, bv. hernieuwbaar, kan bewijzen. Een afnamepunt (EAN-code) kan via de VREG met de Greencheck 2.0 de herkomst van de energie natrekken. Het % groene stroom dat de leverancier de afgelopen maanden leverde, kan onmiddellijk gezien worden.

Flexibiliteitsmanagement op het elektriciteitsnetwerk is een belangrijk proces in de werking van het elektriciteitsnetwerk en kan verder onderverdeeld worden in balancering (van vraag en aanbod voor 50 Hz-

////////////////////////////////////

regeling) en congestiemanagement. Flexibiliteitsmanagement gebeurt door Elia (hoogspanning) en de distributienetbeheerders en wordt gecontroleerd door CREG (hoogspanning) en VREG (distributienet).

Het bewaken van de energiebalansen heeft een invloed op *Power-to-methanol* aangezien deze sterk inzet op flexibiliteitsdiensten.

#### 5.2.5.2 Nationaal Actieplan Hernieuwbare Energie

In het Belgisch energiebeleid speelt het nationaal actieplan hernieuwbare energie een belangrijke rol voor de verduurzaming en diversificatie van de energievoorziening.

## Hernieuwbare stroom

De Federale Overheid en de Gewesten hebben verhandelbare certificaatregelingen ingevoerd om de productie van elektriciteit van hernieuwbare oorsprong te bevorderen, rekening houdend met de toegewezen bevoegdheden. Er werd tevens een pakket maatregelen uitgewerkt dat de uitbouw beoogt van offshore windparken op het Belgisch continentaal plateau. In de transportsector wordt steun gegeven voor de ontwikkeling van mobiliteit met elektrische wagens.

## Biobrandstoffen

Een heel groot deel van de doelstelling van 13% hernieuwbare energie tegen 2020 voor België zal uit de energetische valorisatie van biomassa moeten komen. Om de ontwikkeling van biobrandstoffen in de transportsector te bevorderen, voerde de federale overheid fiscaal vrijgestelde biobrandstofquota in, evenals een verplichting tot bijmenging (momenteel 4% met een voorziene verhoging in 2017).

De Annex IX van de RED die een overzicht geeft van brandstoffen die tweemaal mogen meegerekend worden in het behalen van de doelstelling voor hernieuwbare brandstoffen, is intussen ingevoerd in de Belgische wetgeving.

Deze maatregelen hebben een stimulerend effect op *Power-to-methanol* door

- de hogere beschikbaarheid van hernieuwbare stroom door de stimulatie van elektriciteit van hernieuwbare oorsprong en de grotere nood aan nieuwe oplossingen voor balanceren van het net.
- de gunstige dubbele telling van *Power-to-methanol* op basis van de vertaling van Annex IX in de Belgische wetgeving.

### 5.2.5.3 Vlaams Actieplan Hernieuwbare Energie

Op 31 januari 2014 heeft de Vlaamse Regering een indicatieve doelstelling vooropgesteld van 10,5% hernieuwbare energie tegen 2020. Na goedkeuring van een samenwerkingsakkoord met de federale overheid en de overige twee gewesten, zal een geactualiseerd actieplan hernieuwbare energie 2020 worden voorgelegd aan de Vlaamse Regering. Dit plan moet een verdere groei van de productie van hernieuwbare energie garanderen, waarbij de doelstelling op de meest kostenefficiënte wijze wordt gerealiseerd. De Vlaamse Regering besliste bv. in 2015 via een *Fast Lane* de plaatsing van windturbines te faciliteren op plaatsen die daarvoor geschikt zijn en zo een versnelling hoger te schakelen om de doelstelling hernieuwbare energie te

////////////////////////////////////

behalen. Enerzijds wordt verder gebouwd op het werk van de provincies en gaat men op zoek naar meest geschikte zones voor windturbines, anderzijds wordt gezocht naar manieren om de onderliggende procedures te versnellen.

Deze maatregelen hebben enkel indirect een stimulerend effect op *Power-to-methanol* door de beschikbaarheid van hernieuwbare stroom door de stimulatie van elektriciteit van hernieuwbare oorsprong en de grotere nood aan nieuwe oplossingen voor balanceren van het net.

### 5.2.6 Besluit

CCU wordt vooral gestimuleerd door de EU-reglementering inzake hernieuwbare energie en minder door het EU ETS (minder vooral in het geval van CCU in een niet EU ETS installatie).

Voor de geselecteerde *cases* betekent dit dat enkel *Power-to-methanol* vanuit het Europees klimaatbeleid wordt ondersteund, al is het beperkt tot het aandeel hernieuwbaar van de methanol.

Op nationaal en Vlaams niveau zijn er binnen het economisch beleidsinstrumentarium een aantal ondersteunende maatregelen, zoals bijvoorbeeld strategische ecologiesteun. Er is echter geen specifiek instrument dat rechtstreeks gericht is op het ondersteunen van CCU technologieën.

////////////////////////////////////

- de acceptatie van CCU en de producten ervan te helpen vergroten;
- doorbraken te helpen forceren bij gemeenschappelijke problemen bv. op vlak van captatie en transport van CO<sub>2</sub>;
- de ontwikkeling van nieuwe beloftevolle CCU-technologieën te stimuleren;
- mogelijk te maken dat het hergebruik van CO<sub>2</sub> in rekening wordt gebracht in CO<sub>2</sub>-emissie inventarissen door zich in te passen in het bestaand kader van het internationaal klimaatbeleid;
- het opschalen van CCU in functie van de klimaatdoelstellingen;
- geen onderscheid te maken in technologieën (indien de CO<sub>2</sub>-emissie inventarissen rekening houden met de netto CO<sub>2</sub>-vastlegging van een CCU-technologie);
- door eventueel specifieke gunstmaatregelen uit te werken voor technologie die voor schaalgroottes in het klimaatbeleid en voor 'backbone' kan zorgen.

- CCU-grondstoffen
  - CO<sub>2</sub>;
  - Energie;
  - Andere.
- CCU-technologie
  - Ondersteunen van O&O om doorbraaktechnologie te ontwikkelen en kost verder te reduceren;
  - Ondersteunen van ontwikkeling van LCA-analyses;
  - Demonstratieprojecten;
  - Haalbaarheidsstudies.
- CCU-output
  - Reglementering hernieuwbare brandstoffen;
  - Reglementering andere CCU-output;
  - Openbare aanbestedingen.
- Waardeketen
  - Clusterbeleid;
  - Infrastructuur.

Figuur 48 geeft een overzicht van de voornaamste beleidsdomeinen die verder in deze paragraaf besproken worden. De figuur toont waar deze maatregelen op dit moment actief zijn in de CCU-waardeketen (de afgebeelde keten is een vereenvoudiging van de realiteit en is niet volledig). Onder “actief” wordt nog niet noodzakelijk verstaan “CCU stimulerend”.

In deze paragraaf wordt onderzocht of de actieradius van de maatregelen in de waardeketen kan vergroot worden (bv. EU ETS-directieve) en/of de maatregel meer stimulerend kan werken in zijn huidige actiedomein (bv. RED). Ook wordt onderzocht of een aantal “blinde vlekken” in de waardeketen kunnen ingevuld worden (bv. stimulering CCU-materialen).

[illegible]

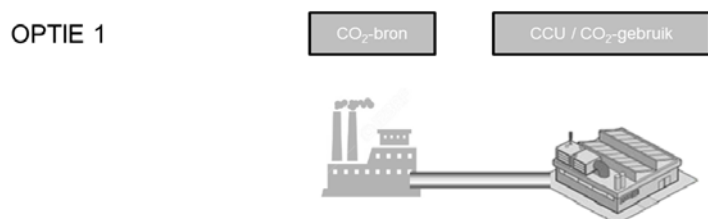




### Optie 1

Een mogelijke piste is om in het EU ETS de mogelijkheid te voorzien dat CO<sub>2</sub> getransfereerd wordt naar een andere niet-EU ETS installatie waarbij

- deze hoeveelheid volledig getransfereerd CO<sub>2</sub> in mindering kan gebracht worden van de EU ETS installatie-inventaris en
- de CO<sub>2</sub>-emissie van het CCU-project opgenomen wordt in de niet-EU ETS inventaris (Figuur 49).



|                            | EU ETS    | niet –EU ETS |
|----------------------------|-----------|--------------|
| Hoeveelheid transfer       | 1 ton uit | 1 ton in     |
| Hoeveelheid netto-captatie | -         | x ton        |
| Rapportage                 | 0         | (1 – x) ton  |

Figuur 49: Aanpassingen aan EU ETS reglementering – Optie 1

Onder netto-captatie wordt de hoeveelheid CO<sub>2</sub> verstaan die gecapteerd is wanneer het eindproduct van de CCU-technologie gebruiksklaar is.

Deze gecapteerde emissies kunnen in de gebruiksfase van het product terug uitgestoten worden, bv. bij het gebruik van brand- en meststoffen. Bij andere gebruikstoepassingen zoals bouwproducten worden de gecapteerde emissies (semi-)permanent vastgelegd.

Geapteerde emissies die vrijkomen bij de gebruiksfase van het product dienen gerapporteerd te worden in de relevante sector. Zo worden brandstofemissies opgenomen in de niet-ETS broeikasgasinventaris. Er dient op toegezien worden dat ook in deze gebruiksfase de emissies maximaal ingeperkt worden.

Deze optie zou juridisch verankerd kunnen worden via een aanpassing van artikel 49 van de Verordening inzake monitoring en rapportage van broeikasgassen overeenkomstig de EU ETS Richtlijn (Verordening (EU) 601/2012).

Een volledige transfer van de gecapteerde emissies van de EU ETS naar de niet-ETS sector zou het voor een lidstaat moeilijker kunnen maken om de doelstelling te halen indien een significante hoeveelheid CO<sub>2</sub>

[illegible]

bijkomend in de niet-ETS sector moet gerapporteerd worden. Dit kan in deze optie 1 bv. het geval zijn wanneer er bij de productie van het CCU product zelf een grote hoeveelheid CO<sub>2</sub> wordt vrijgezet. Onder significant wordt een hoeveelheid CO<sub>2</sub>-emissie verstaan die aanzienlijk is t.o.v. de ESD-doelstelling van de lidstaat en daardoor belangrijke extra inspanningen door de lidstaat met zich meebrengt. Het is in dit geval dus nodig dat de ESD-doelstelling van de lidstaat kan aangepast worden in functie van de CCU-ontwikkelingen in de lidstaat.

Monitoring per project is noodzakelijk omdat de netto CO<sub>2</sub>-vastlegging project per project kan verschillen voor een zelfde CCU-toepassing door bv. verschillen in captatie en transport van de CO<sub>2</sub>.

Een belangrijk aandachtspunt is de kost van monitoring, rapportage en eventuele verificatie op projectniveau. De kosten moeten immers in relatie staan met de baten ervan. De monitoring zal daarom gebaseerd moeten zijn op directe metingen, massabalansen en inschattingen op basis van wetenschappelijk onderzoek. De noodzakelijke nauwkeurigheid van de monitoring zal verschillende zijn in de verschillende stappen van een CCU-keten (transport, vastlegging en productgebruik) en afhankelijk zijn van de grootte van de CO<sub>2</sub>-emissie in elke stap. De monitoring moet anderzijds voldoende dekkend en betrouwbaar zijn om te dienen voor

- het aanpassen van de ESD-doelstelling van de lidstaat;
- acceptatie in het EU ETS om de volledige transfer in mindering te brengen in de inventaris van de CO<sub>2</sub>-bron.

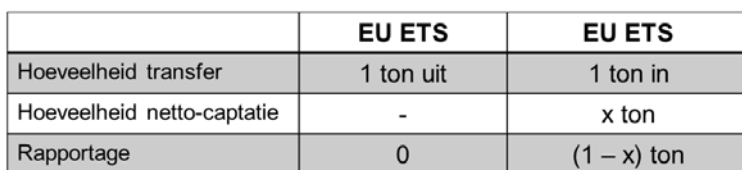
Er dient specifieke regelgeving ontwikkeld te worden om deze monitoring mogelijk te maken. De specifieke monitoringsregels kunnen lokaal uitgewerkt worden, maar een Europees kader met een aantal basisprincipes is noodzakelijk.

Er kan overwogen worden om het regelgevend kader in een eerste fase met een aantal eenvoudige ingrepen aan te passen om CCU te stimuleren, bv. door artikel 49 van Verordening (EU) 601/2012 aan te passen . Op die manier kunnen ETS bedrijven vrijgesteld worden van de rapportering van gecapteerde emissies, mits deze in de niet-ETS sector worden gerapporteerd. Dit kan zonder aanpassing van de ESD-doelstelling of mits toekenning van “experimenteerruimte” door het licht verhogen van de ESD-doelstelling.

Een belangrijk nadeel van deze optie is dat de CO<sub>2</sub> producent aan de bron niet gestimuleerd wordt voor verdere ontwikkeling van nieuwe low carbon technologieën in zijn eigen proces.

////////////////////////////////////

Een andere mogelijke piste is om de ontvangende installatie waar de CO<sub>2</sub> permanent (bv. carbonatatie) of tijdelijk (bv. methanol en ethanol) wordt opgeslagen in een product, op te nemen als een activiteit in het EU ETS. De CO<sub>2</sub>-emissie van het CCU-project (emissie die tijdens het CCU-proces vrijkomt) blijft deel van de EU ETS boekhouding (Figuur 50).



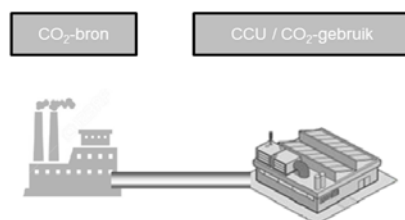
Netto-captatie wordt op dezelfde wijze geïnterpreteerd als in optie 1.

Een aanpassing van de EU ETS Richtlijn in deze zin is vermoedelijk mogelijk via Art. 23 en 24. Voor een CCU binnen een bestaande EU ETS activiteit kan het bedrijf de mogelijkheid gelaten worden om de monitoring op te nemen in de monitoring methode en inventaris van de hoofdininstallatie of deze CCU activiteit te classificeren als een aparte EU ETS installatie. De totale hoeveelheid netto CO<sub>2</sub>-vastlegging en de kosten/baten van een aparte inventaris zullen hierbij vermoedelijk een doorslaggevende rol spelen.

////////////////////////////////////

### Optie 3

- enkel het deel dat effectief gecapteerd wordt kan afgetrokken worden van de inventaris van de CO<sub>2</sub>-bron.
- er geen CO<sub>2</sub>-emissie van het CCU-project dient opgenomen te worden in de niet-EU ETS inventaris (Figuur 51).



|                            | EU ETS        | niet - EU ETS |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Hoeveelheid transfer       | 1 ton uit     | 1 ton in      |
| Hoeveelheid netto-captatie | -             | x ton         |
| Rapportage                 | $(1 - x)$ ton | 0             |

Een belangrijk voordeel van deze piste is dat het risico op aantasting van de integriteit van het EU ETS minimaal is. Een ander belangrijk voordeel van deze optie is dat de CO<sub>2</sub> producent aan de bron nog altijd aangespoord wordt tot verdere ontwikkeling van nieuwe low carbon technologieën of tot het zoeken van een transfer van CO<sub>2</sub> naar een CCU-toepassing met een hoge netto CO<sub>2</sub>-captatie.

////////////////////////////////////

In optie 3 krijgt wordt vanuit het ETS een stimulans gegeven om het CCU-product zo CO<sub>2</sub>-efficiënt te vervaardigen. Tegelijkertijd wordt er over gewaakt dat de gecapteerde emissies gerapporteerd worden in de niet-ETS sector. Hierdoor is optie 3 een gebalanceerde en pragmatische rapporteringsmethode.

#### 5.3.1.2 Aanpassen Vlaams migratieplan

De meeste maatregelen uit Cluster 4.1 “Energie-gerelateerde emissies” uit het Vlaams mitigatieplan en vooral het Vlaams mitigatieplan voor (niet-ETS) industrie kunnen in theorie uitgebreid worden met steunmaatregelen voor negatieve emissies zoals in het geval van het overnemen en verwerken van CO<sub>2</sub> van een andere installatie (bv. een EU ETS installatie) door een CCU-technologie (niet-EU ETS). In het bijzonder de maatregelen met investeringssteun lijken interessant:

- Maatregel 4.1.3: investeringssteun via oproep voor groene warmte in grootschalige installaties op biomassa (> 1 MW) uit te breiden naar CCU-installaties;
- Maatregel 4.1.4: Garanderen stabiel investeringsklimaat voor WKK én CCU;
- Maatregel 4.1.5: Warmte én CO<sub>2</sub>-netten;
  - Potentieel studies uitvoeren voor warmte- en koudenetten én CO<sub>2</sub>-netten.
- Maatregel 4.1.6 Ecologiesteun;
  - Financiële tegemoetkoming aan ondernemingen die ecologie-investeringen zullen realiseren in het Vlaamse Gewest (deels gekoppeld aan maatregel 4.1.2).
- Maatregel 4.1.7 Groene Waarborg;
  - Waarborg voor de financiering van energiebesparende én CO<sub>2</sub>-reducerende investeringen in Vlaanderen waarvan de terugverdientijd maximaal tien jaar bedraagt.
- Maatregel 4.1.9 Duurzame bedrijventerreinen;
  - Subsidiëring van *greenfields* (of met uitbreiding ook bestaande bedrijventerreinen) als ze CO<sub>2</sub>-neutraal zijn (of worden voor bestaande bedrijventerreinen).

Degelijke LCA's van de CCU-projecten zijn noodzakelijk om de emissiereducties aan te tonen.

### 5.3.2 Beleidsinstrumenten voor andere CCU-input

Het CCU-potentieel van bv. carbonatatie kan sterk verhoogd worden indien de CO<sub>2</sub> kan gebonden worden aan andere reststoffen dan deze uit metaalslakken. Mogelijk kunnen daardoor bepaalde afvalstoffen, waarvoor momenteel hergebruik moeilijk of onmogelijk is, toch hergebruikt worden. Mogelijk kan dit gestimuleerd worden door aanpassingen in de afvalstoffen reglementering, maar dit is in het kader van deze studie niet verder onderzocht.

### 5.3.3 Beleidsinstrumenten voor het ondersteunen van O&O

De overheid kan O&O ondersteunen om doorbraaktechnologie te ontwikkelen en de kost van CCU verder te reduceren.

Op Europees niveau is Horizon2020 het belangrijkste programma voor financiering van onderzoek en innovatie. Het bestaat uit een aantal secties waarin onderzoekstopics *bottom up* door de indieners bepaald kunnen worden en een aantal secties waarin de topics *top down* vastgelegd worden. Vooral deze laatste zijn

////////////////////////////////////

hier relevant. Sinds de start van het Horizon2020 programma werden al specifieke oproepen gelanceerd rond CCU bv. in het kader van<sup>42</sup>:

- *Societal Challenge Secure, Clean and Efficient Energy - Low Carbon Economy (LCE);*
- *Societal Challenge Food Security, Sustainable Agriculture and Forestry, Marine and Maritime and Inland Water Research and the Bioeconomy – Innovative, Sustainable and Inclusive Bioeconomy (ISIB);*
- *Societal Challenge Food Security, Sustainable Agriculture and Forestry, Marine and Maritime and Inland Water Research and the Bioeconomy – Blue Growth (BG);*
- *Industrial Leadership, Leadership in Enabling and Industrial Technologies – Nanotechnologies, Advanced Materials, Biotechnology and Production (NMBP);*
- *Industrial Leadership, Leadership in Enabling and Industrial Technologies – Biotechnology (BIOTEC).*

Het type projecten varieert van Onderzoeks- en innovatieprojecten (*Research and Innovation Actions*, RIA) op lager TRL niveau tot Innovatieprojecten op hoger TRL niveau (*Innovation Actions*, IA), en omvat tevens *Coordinating and Support Actions* (CSA) die eerder gericht zijn op begeleidende maatregelen. Sommige oproepen gebeuren in nauwe samenwerking met publiek-private partnerschappen, zoals bv. SPIRE gericht op een duurzame procesindustrie. In bepaalde gevallen worden specifieke technologieën naar voren geschoven zoals biotechnologie en electrochemie, die volledig aansluiten bij het portfolio aan technologieën dat door Vlaamse kennisinstellingen en industrie wordt ontwikkeld.

Financiering kan ook bekomen worden via zogenaamde KICs (*Knowledge and Innovation Communities*). De *Climate-KIC* bv. richt zich op innovatie met betrekking tot het klimaat. Vier vlaggenschipprogramma's werden gedefinieerd waarvan de activiteiten variëren van pionieronderzoek tot ondernemerschap. Eén ervan is het EnCO2re programma geleid door Covestro, dat tot doel heeft het gebruik van CO<sub>2</sub> als grondstof in chemische waardeketens te stimuleren (<http://enco2re.climate-kic.org/>). Een aantal projecten lopen reeds en regelmatig worden ook nieuwe oproepen voor ideeën gelanceerd.

In Vlaanderen worden al CCU-projecten gefinancierd, o.a. via MIP<sup>43</sup>, FiSCH<sup>44</sup> en het vroegere IWT (nu AIO<sup>45</sup>). Voorbeelden hiervan staan vermeld in het luik inventarisatie. Het gaat dan meestal om coöperatieve projecten tussen bedrijven en onderzoeksinstituten of tussen bedrijven onderling. Binnen FiSCH werd C1-chemie wel weerhouden als een strategisch topic voor de middellange termijn, maar tot op heden worden nergens specifieke budgetten voorzien voor financiering van CCU.

Op lokaal vlak bestaat ook de Duurzame Ontwikkeling (DTO) regeling van de Vlaamse Regering die tot doel heeft stimulerende modaliteiten te implementeren voor onderzoeks- en ontwikkelingsprojecten gericht op duurzame ontwikkeling. De maatregel richt zich o.a. op volgende innovatiedoelstellingen: besparing van grondstoffen, besparing van energie, reductie van emissies, ontwikkeling van hernieuwbare grondstoffen en energiebronnen, levensduurverlenging van producten en procestechnologie of verhoogde arbeidsveiligheid en -hygiëne. CCU past hier in.

<sup>42</sup> <http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/index.html>

<sup>43</sup> <http://www.i-cleantechvlaanderen.be/#!mip/c8id>

<sup>44</sup> <http://www.fi-sch.be/nl/>

<sup>45</sup> <http://www.vlaio.be/>



### 5.3.5 Beleidsinstrumenten voor demonstratieprojecten

### 5.3.5.1 NER300/400

Dit Europees programma is bedoeld voor innovatieve demonstratieprojecten met koolstofarme energie en is wereldwijd gezien een van de omvangrijkste financieringsprogramma's in zijn soort. Het programma is bedoeld als katalysator voor milieuvriendelijke technologieën en moet commerciële exploitatie van o.m. CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag en hernieuwbare energiebronnen in de Europese Unie dichterbij brengen. De oprichting van NER300 vloeit voort uit Richtlijn 2009/29/EG, waarin is vastgelegd dat de opbrengst van 300 miljoen emissierechten aan duurzame energieprojecten moet worden besteed. Het NER300-budget wordt beheerd door de Europese Commissie, de Europese Investeringsbank en de lidstaten. De NER300-financiering is goed voor tot 50% van de "subsidiabele kosten" van het project, een term die in wezen neerkomt op de extra kosten t.o.v. bestaande, beproefde technologieën. De rest komt van particuliere investeringen en/of aanvullende nationale financiering.

Momenteel wordt de NER400 ontwikkeld waarin de scope van de NER300 wordt uitgebreid tot *low carbon innovation in industrial sectors* waaronder CCU i.t.t. de scope van de NER300 zou moeten kunnen vallen. De middelen uit het NER400 zouden beschikbaar komen vanaf 2021.

Het zijn de lidstaten die in de NER300 een eerste evaluatie en selectie deden op de voorgestelde projecten uit eigen land en vervolgens een voorstel deden naar de Europese Commissie. Dit wil zeggen dat voor de NER400 het beleid CCU-demonstratieprojecten kan opnemen in haar selectie naar de Europese Commissie mits ze voldoen aan de criteria van de NER 400.

#### 5.3.5.2 Fast Track to Innovation

Andere Europese financieringsmechanismen voor demonstratieprojecten staan open voor alle onderwerpen en technologieën en zijn dus niet specifiek voorbehouden voor CCU. Een voorbeeld daarvan is de *Fast Track to Innovation*. Dit onderdeel van het Horizon2020 programma ondersteunt innovaties van demonstratie tot marktintroductie en richt zich dus op relatief mature technologieën en processen (minstens TRL 6).

### 5.3.5.3 TINA projecten

Het Vlaamse TINA-fonds heeft tot doel ondernemingen te helpen om innovatieve producten of diensten sneller op de markt te brengen. Het is een marktgestuurd investeringsfonds, dat wordt beheerd door PMV en dat 200 miljoen aan risicokapitaal kan activeren. Het moedigt ondernemingen aan om samen te werken met andere ondernemingen en investeerders, kennisinstellingen, onderzoeks- en/of technologiepartners. Daarom steunt het enkel ondernemingen die samenwerken in een consortium (samenwerkingsverband). Het fonds wil sectoren ondersteunen die een belangrijke rol vervullen in de Vlaamse economie, de zogenaamde speerpuntsectoren. In de conceptnota "Clusterbeleid" van de Vlaamse regering zijn de volgende sectoren omschreven als "speerpuntclusters":

- duurzame chemie;
- gespecialiseerde maakindustrie;
- gepersonaliseerde gezondheidszorg;
- gespecialiseerde logistiek;

////////////////////////////////////

- gespecialiseerde agro-food;
- geïntegreerde bouw-milieu-energie cluster;
- smart systems;
- creatieve industrieën en diensten.

CCU is direct onder te brengen onder “duurzame chemie” en “geïntegreerde bouw-milieu-energie” clusters. Dit wil zeggen dat er dus geen wijzigingen aan het zouden nodig zijn indien men met een goed projectvoorstel komt.

### 5.3.6 Beleidsinstrumenten voor hernieuwbare brandstoffen (CCU-output)

### 5.3.6.1 RED en FQD

Brandstoffen uit CCU worden erkend door de RED op voorwaarde dat ze gemaakt worden op basis van hernieuwbare energie zoals gedefinieerd in de directieve.

Het is vandaag niet uit te sluiten dat bepaalde niet hernieuwbare CCU-brandstoffen bijdragen tot één van de achterliggende doelstellingen van de RED en FQD, met name CO<sub>2</sub>-emissiereductie. Bij de productie van deze brandstoffen wordt CO<sub>2</sub> gecapteerd en omgezet tot een brandstof gebruik makend van bv. restenergie. Deze brandstoffen dragen bij tot de RED en FQD op voorwaarde dat dit de beste inzet is van de restenergie of m.a.w. dat een andere inzet van deze restenergie dan voor CCU niet leidt tot netto minder CO<sub>2</sub>-uitstoot. Een vergelijking met verschillende referentiescenario's is noodzakelijk om deze laatste voorwaarde aantoonbaar te maken zoals bv. bij de Steelanol *case*.

Ook voor brandstoffen die gedeeltelijk onder de huidige RED vallen omdat ze gedeeltelijk gebruik maken van hernieuwbare energie (deels **hernieuwbare brandstoffen** dus), zijn er optimalisaties mogelijk. De methanol van *Power-to-methanol* wordt in geval van afname van stroom van het *grid* op basis van artikel 3 van de RED slechts gedeeltelijk als hernieuwbaar beschouwd in verhouding tot het gemiddeld aandeel hernieuwbare energie op het *grid*. Dit bedraagt ca. 15%. Indien de reglementering zou toelaten het aandeel van hernieuwbare energie te berekenen op basis van de garanties van oorsprong van het afnamepunt (EAN-code) van *Power-to-methanol*, dan zou het aandeel ca. 50% bedragen (Artikel 3 van directieve 2009/28/EC, sectie 4. (c)).

De methanol wordt momenteel slechts gedeeltelijk als hernieuwbaar beschouwd, met name in verhouding tot het gemiddeld aandeel hernieuwbare energie op het *grid*. Met de databank van garanties van oorsprong van de VREG kan mogelijk aangetoond worden dat het hernieuwbaar karakter van de methanol veel hoger ligt omdat de technologie vooral stroom afneemt op momenten met hoge hernieuwbare productie.

Een aanpassing van het regelgevend kader waarbij abstractie wordt gemaakt van de herkomst van de energie bij CCU-brandstoffen, zou een stimulerende maatregel betekenen. Zulke maatregel creëert bovendien de gewenste technologie-neutraliteit in het beleid. Voor Steelanol kan dan in principe ook deze abstractie overwogen worden hoewel Steelanol, in tegenstelling tot elektrische wagens en *Power-to-Methanol*, zonder hernieuwbare energie wordt geproduceerd. Bovenstaande abstractie is immers in het leven geroepen

////////////////////////////////////



milieukeur is onderdeel van dit productbeleid en identificeert producten die gedurende hun gehele levenscyclus minder effect op het milieu hebben. De Commissie onderzoekt momenteel hoe de doeltreffendheid en de bijdrage van deze milieukeur tot de circulaire economie kan worden vergroot.

In het actieplan wordt het verband met het klimaatbeleid gelegd wat betreft verminderd energieverbruik en het gebruik van biomassa (met primaire focus op omzetting van C-ketens en minder op opbouw van C-ketens vanuit C1). Dit geldt ook voor de EU-milieukeur waarin energieverbruik en afvalrecyclage criteria zijn, maar CO<sub>2</sub>-emissiereductie of CO<sub>2</sub>-gebruik nauwelijks aandacht krijgen. In zowel het actieplan als de EU-milieukeur ontbreekt een visie op “hernieuwbare materialen” als onderdeel van circulaire materialen complementair aan recyclage. CCU heeft dan ook geen echte duidelijke aanknopingspunten in dit actieplan.

Een andere tendens is deze van de *carbon-footprint* van materialen. De PAS 2050, GHG Protocol en ISO 14067 zijn hierin belangrijke standaarden. De *carbon-footprint* wordt gedefinieerd als de som van CO<sub>2</sub>-emissie en CO<sub>2</sub>-verwijdering (bv. CO<sub>2</sub>-gebruik) en houdt met andere woorden rekening met CCU. De carbon-footprint benadering zit deels verwerkt in het EU ETS voor wat betreft de directe CO<sub>2</sub>-emissies op basis waarvan de emissie *cap* per sector wordt bepaald. Deze cap is een stimulatie in bv. de cementindustrie om hun producten te diversifiëren naar CO<sub>2</sub>-gunstige producten zoals deze uit carbonatatie.

Een mogelijke beleidsmaatregel is het stimuleren van overleg binnen de EU om in het EU-actieplan voor de circulaire economie en de EU-milieukeur CO<sub>2</sub>-emissiereductie en CO<sub>2</sub>-gebruik beter tot hun recht te laten komen en coherentie te bewaren met andere tendensen zoals het meten en communiceren van de carbon-footprint.

### 5.3.8 Openbare aanbestedingen

Tegen 2020 moeten alle Vlaamse overheidsopdrachten 100% duurzaam worden opgevat. Via die uitgaven kan de Vlaamse overheid als milieu- en sociaalbewust aankoper wegen op de markt. Dat bevordert de verspreiding van milieubesparende technologieën, sociale innovatie en de ontwikkeling van milieu-, socio- en ethisch verantwoorde producten en diensten.

De Vlaamse overheid is een belangrijke afnemer van brandstoffen voor haar wagenpark en kan het gebruik van hernieuwbare brandstoffen voorschrijven. De overheid is tevens een zeer belangrijke afnemer van betonproducten en andere materialen voor infrastructuur en kan in bepaalde werken producten met gunstig CO<sub>2</sub>-emissieprofiel voorschrijven.

De CO<sub>2</sub>-Prestatieladder uit Nederland kan hiervoor een inspiratiebron zijn. Het doel van deze ladder is bedrijven te stimuleren om de eigen CO<sub>2</sub>-uitstoot - en die van hun leveranciers - te kennen en permanent te zoeken naar nieuwe mogelijkheden om de uitstoot als gevolg van de eigen bedrijfsvoering en de eigen projecten terug te dringen. De ladder stimuleert bedrijven vervolgens om die maatregelen daadwerkelijk uit te voeren en bovendien de verworven kennis transparant te delen en samen met collega's, kennisinstellingen, maatschappelijke partijen en overheden actief te zoeken naar mogelijkheden om de uitstoot gezamenlijk verder terug te dringen. Het instrument wordt door opdrachtgevers en opdrachtnemers gebruikt bij

////////////////////////////////////

aanbestedingen. Het basisprincipe van de ladder is dat inspanningen van bedrijven worden gehonoreerd. Een hogere score op de ladder wordt beloond met een concreet voordeel in het aanbestedingsproces, in de vorm van een - fictieve - korting op de inschrijfprijs. De trede die een bedrijf heeft bereikt op de CO<sub>2</sub>-Prestatieladder vertaalt zich in een “gunningvoordeel”. Hoe hoger de trede of het niveau op het certificaat, hoe meer voordeel het bedrijf krijgt bij de gunningafweging. De aanbestedende organisatie bepaalt het gunningvoordeel per niveau van de ladder.

Bij een aanbidding op een aanbesteding voor de aankoop van brandstoffen kan CCU leiden tot een gunningsvoordeel in het geval de productie van brandstoffen een deel is van de eigen bedrijfsvoering. De overheid koopt in bepaalde gevallen echter onrechtstreeks producten uit CCU (bv. klinkers als onderdeel van een opdracht voor bestrating) en de CO<sub>2</sub>-uitstoot of -prestatie is geen onderdeel van de eigen bedrijfsvoering van de aanbieder aan de overheid. De impact van de CO<sub>2</sub>-Prestatieladder op CCU is in deze gevallen dan ook beperkt.

### 5.3.9 Beleidsinstrumenten ontwikkeling waardeketen

### 5.3.9.1 Clusterbeleid

De doelstellingen van het Vlaamse clusterbeleid zijn als volgt gedefinieerd:

- Het ontsluiten van onbenut economisch potentieel en de realisatie van competitiviteitsverhoging bij Vlaamse ondernemingen via een actieve en duurzame samenwerking tussen actoren.
- Bijdragen aan de oplossing van maatschappelijke uitdagingen (zoals o.a. vermeld in het regeerakkoord en de "Transversale beleidsnota Vlaanderen 2050") met een directe economische meerwaarde voor Vlaamse ondernemingen.

De ondersteuningscriteria voor speerpuntclusters zijn de volgende:

- Beoogde competitiviteitsverbetering (potentiële economische impact en beoogde meerwaarde van de cluster);
- Noodzaak en additionaliteit van de clusterwerking (positionering t.o.v. andere organisaties en bestaande activiteiten, op welk systeemfalen biedt deze clusterwerking een antwoord);
- Gedragenheden van het initiatief (vraag, engagement en sturing van ondernemingen, toegang voor nieuwe partners, en betrokkenheid van een ruime groep KMO's);
- Organisatie en werking van de cluster (rol, taken, activiteiten,..);
- Kwaliteit van de aanpak met inachtneming van het volledige waardenetwerk en voldoende aandacht voor activiteiten dicht bij de markt (werkplan en opvolging).

CCU kan potentieel bijdragen tot de oplossing van de belangrijkste maatschappelijke uitdaging van dit moment. Een CCU-project is *in se* een typisch samenwerkingsproject omdat bedrijven uit verschillende sectoren met elkaar moeten samenwerken. De projecten ondervinden belangrijke barrières (vormen van systeemfalen) op vlak van reglementering, CO<sub>2</sub>-transport infrastructuur, ... waarvoor een clusterwerking een oplossing zou kunnen bieden. Indien men ook een belangrijk economisch potentieel kan veronderstellen dan heeft CCU met andere woorden een aantal karakteristieken die beantwoorden aan de criteria van speerpuntclusters.

Het economisch potentieel van CCU-technologie is zowel het ontwikkelen en vermarkten van de technologie als het vermarkten van de eindproducten.

#### 5.3.9.2 Infrastructuur

Het beleid kan ondersteunend optreden in het ontwikkelen van infrastructuur voor CO<sub>2</sub>-transport door haalbaarheidsstudies en marktstudies te laten uitvoeren of door investeringen te stimuleren of zelfs zelf te investeren.

Anderzijds dienen nog een aantal bepalingen van de CCS directieve omgezet te worden in Belgische wetgeving meer bepaald op vlak van CO<sub>2</sub>-transport en de verplichting voor CO<sub>2</sub>-transportoperatoren om de aansluitbaarheid van andere CO<sub>2</sub>-bronnen dan de projectbron ernstig te onderzoeken.

////////////////////////////////////

## 5.4 BELEIDSVISIE VOOR CCU

In de voorgestelde beleidsvisie wordt een onderscheid gemaakt tussen een beleidsvisie op korte en lange termijn.

### 5.4.1 Beleidsvisie voor CCU op korte termijn

Op korte termijn is het beleid enerzijds gericht op de implementatie van beleidsmaatregelen op Vlaams niveau. Deze maatregelen hebben tot doel om de economische en innovatieve meerwaarde van CCU voor Vlaanderen en Europa in evidentie te stellen door

- de acceptatie van CCU en de producten ervan te helpen vergroten;
- doorbraken te helpen forceren bij gemeenschappelijke problemen bv. op vlak van captatie en transport van CO<sub>2</sub>;
- de ontwikkeling van nieuwe beloftevolle CCU-technologieën te stimuleren;
- door eventueel specifieke gunstmaatregelen uit te werken voor technologie die voor schaalgrootte in het klimaatbeleid en voor 'backbone' kan zorgen.

Anderzijds is het korte termijn beleid gericht op het beïnvloeden van Europees beleid en regelgeving met implementatie op langere termijn. Dit resulteert op termijn in het

- mogelijk maken dat het hergebruik van CO<sub>2</sub> gestimuleerd wordt door de CO<sub>2</sub>-prijs, door de rapporteringsverplichtingen van de CO<sub>2</sub>-emissies in het kader van het EU ETS aan te passen. Naast deze beleidsaanpassing, zou op langere termijn ook een context met hogere mondiale energie-en/of CO<sub>2</sub>-prijzen de ontwikkeling van CCU stimuleren.
- inzetten op alternatieve ontwikkelingstrajecten die minder prijsafhankelijk zijn omdat deze meer zekerheid geven, gezien de mondiale prijsevoluties over het laatste decennium.
- het opschalen van CCU in functie van de klimaatdoelstellingen.

### 5.4.2 Beleidsvisie voor CCU op lange termijn

Het langere termijn beleid richt zich dus zowel op de ecologische als economische en innovatieve meerwaarde van CCU.

De beleidsvisie is kort uitgewerkt in beleidsplannen voor de korte en lange termijn. De beschreven plannen geven een overzicht wanneer welke beleidsmaatregel kan geïmplementeerd worden. De beleidsmaatregelen (met eventuele opties) zijn hierboven reeds in min of meerdere mate in detail beschreven en worden niet verder uitgewerkt in dit stadium.

## 5.5 BELEIDSPPLAN VOOR KORTERE TERMIJN

### 5.5.1 LCA's stimuleren

Kwalitatieve LCA's zijn *must-haves* voor de implementatie van CCU op bredere schaal om vanuit beleidsoogpunt een helder beeld te krijgen op de mate waarin CCU technologieën kunnen bijdragen aan de noodzakelijke emissiereductie. Gekoppeld aan de LCA's moeten monitoringsprotocollen ontwikkeld worden om de resultaten van de LCA-studies te verifiëren en eventueel aan te passen.

### 5.5.2 Demonstratieprojecten faciliteren

Demonstratieprojecten zijn noodzakelijk om

- de technologie op grotere schaal te testen en te optimaliseren;
- monitoringsprotocollen te testen en de LCA's te verifiëren;
- een minimum volume aan product met stabiele kwaliteiten op te leveren om in de markt te zetten, bv. voor openbare aanbestedingen.

Het TINA-fonds kan hier een belangrijke rol spelen, evenals een soortgelijke *Fast lane* aanpak voor demonstratieprojecten als bij de ontwikkeling van windmolenparken in kader van het Vlaams energiebeleid.

### 5.5.3 Ondersteunen van investeringen

Het Vlaams klimaatplan kan uitgebreid worden zodat bestaande niet-EU ETS bedrijven aangespoord worden om te onderzoeken wat hun potentieel is om CO<sub>2</sub> te verwerken en door investeringssteun te verstrekken. Dit is bv. van toepassing voor carbonatie waarbij bestaande installaties voor betonproducten op korte termijn kunnen aangepast worden door de aanpassing van de klimaatkamers.

#### 5.5.4 Promoten van CCU-producten en CCU-diensten

De actieplannen voor hernieuwbare energie dienen aangepast te worden zodat niet enkel biobrandstoffen maar ruimer hernieuwbare brandstoffen en daarmee gelijkgestelde CCU-brandstoffen gestimuleerd worden.

Op Europees niveau kan er op korte termijn met de Europese Commissie gekeken worden om de RED in die zin aan te passen dat de graad van hernieuwbaarheid van brandstoffen berekend wordt op basis van de reële mix van energie-input in de brandstof en niet op basis van jaarlijkse nationale gemiddelden van de energiemix. Aanpassingen zoals het eventueel gelijkstellen van bepaalde CCU-brandstoffen met hernieuwbare brandstoffen lijken eerder werk van lange adem.

In de openbare aanbestedingen kunnen criteria opgenomen worden die het gebruik van CCU-producten stimuleren. Om hier een krachtig beleid te voeren is op termijn een beter beleidskader op EU-niveau noodzakelijk (zie beleidskeuzes voor de langere termijn) en zijn instrumenten zoals de EU-milieukeur en/of de CO<sub>2</sub>-prestatieladder in aangepaste vorm aangewezen.

////////////////////////////////////

CCU-diensten zijn diensten zoals bv. de flexibiliteitsdiensten van *Power-to-methanol*. Mogelijk kunnen andere CCU-technologieën ook andere meerwaarde creëren dan CO<sub>2</sub>-vastlegging en het fysieke eindproduct waar de CO<sub>2</sub> is vastgelegd.

### 5.5.5 Ondersteunen clusterontwikkeling

Een CCU-speerpuntcluster in Vlaanderen kan krachten samenbrengen om bovenstaande beleidsmaatregelen sneller tot een succes te brengen, maar ook om zich te buigen over barrières op vlak van CO<sub>2</sub>-captatie en –transport. Er dient bijzondere aandacht te gaan naar de ontsluiting van relatief zuivere CO<sub>2</sub> stromen met bij voorkeur een relatief hoge druk. CCU en CCS kunnen gebruik maken van een gedeelde infrastructuur voor captatie en transport. Het betrekken in de clusterontwikkeling van sectoren waarvoor CCS een relevante oplossing is, is dan ook aangewezen.

De cluster richt zich op korte termijn op de economische en innovatieve meerwaarde van CCU binnen het kader van de ecologische lange termijn doelstelling.

Er kan overwogen worden een *roadmap* te ontwikkelen voor CCU in Vlaanderen met vorming van een visie op langere termijn, concrete doelstellingen, identificatie van barrières en hefboomen en uiteindelijk actieprogramma's om de doelstellingen te verwezenlijken. Aangezien in CCU meerdere sectoren (op basis van de 4 *cases* van dit rapport al minstens de chemie, de bouw, de energiesector, de EU ETS bedrijven,...) en vele expertises betrokken zijn zal het echter niet eenvoudig zijn om met een brede algemene *roadmap* aan te sluiten op de concrete behoeftes van de verschillende CCU-ontwikkelpaden. Het opsplitsen in verschillende deel *roadmaps* (bv. CCU voor materialen, CCU in de energieketen,...) is daarom aangewezen.

### 5.5.6 Stimulatie onderzoek en ontwikkeling

Het beleid kan *top-down* specifieke onderzoeksdomeinen ondersteunen. Bijzondere aandacht dient hier op korter termijn te gaan naar

- CO<sub>2</sub>-captatie;
- de ontwikkeling van nieuwe beloftevolle CCU-technologieën.

### 5.5.7 Pro's en contra's van het beleidsplan op korte termijn

CCU is een proces dat gericht is op gebruik van CO<sub>2</sub> als grondstof voor nieuwe producten. Het succes van het gebruik van CO<sub>2</sub> als grondstof is afhankelijk van de continuïteit en omvang van de marktvrage naar de finale producten waarin het verwerkt is. De maatregelen in het korte termijn beleid en in het bijzonder de stimulatie van CCU-output dragen bij tot een vraaggedreven markt of hebben deze als voorwaarde ingebouwd, met name de maatregel rond clusterontwikkeling. LCA-analyses en demonstratieprojecten dragen onrechtstreeks bij tot een vraaggedreven markt omdat ze noodzakelijk zijn om het vertrouwen van de gebruiker van producten uit CCU te verdienen.

[illegible]

### 5.5.7.1 Voordelen

Het korte termijn beleid draagt bij tot een marktgedreven groei van CCU. Het draagt bij tot een duurzame economische verankering. Het legt de nodige basis van vertrouwen die nodig is om op langere termijn het klimaatbeleid ten gunste van CCU aan te passen, bv. door een aanpassing van het EU ETS en eventueel een nieuwe CCU(S) directieve. Door het opbouwen van vertrouwen en ervaring in CCU en de LCA's ervan (inclusief monitoring en rapportage), kunnen realistische en haalbare MRV-methodes (Monitoring, Rapportage Verificatie) nagestreefd worden om CCU in te passen in de CO<sub>2</sub>-boekhouding van het EU ETS en de nationale emissie-inventaris. Zoals reeds aangehaald moeten de voorbereidingen voor de aanpassingen van het EU ETS ook op korte termijn opgestart worden.

Het korte termijn beleid draagt bij tot technologie-ontwikkeling in Vlaanderen in sectoren waarin Vlaanderen sterk staat en kennis heeft, bv. de chemie en de bouwmaterialen. Het betreft bovendien sterk geclusterde technologische ontwikkeling. De technologische ontwikkeling kan leiden tot zowel export van technologie als tot industriële ontwikkeling in eigen streek.

### 5.5.7.2 Nadelen

Een goed beleidskader rond circulaire economie op EU-niveau en het ontbreken van instrumenten zoals de EU-milieukeur en/of de CO<sub>2</sub>-prestatieladder in aangepaste vorm zijn mogelijk een rem op de afzet van materialen uit CCU.

Door het uitblijven van aanpassingen aan het EU ETS ontbreekt voorsnog een rechtstreekse stimulatie aan de CO<sub>2</sub>-bron zelf.

[illegible]

## 5.6 BELEIDSPPLAN VOOR LANGERE TERMIJN

### 5.6.1 Europees klimaatbeleid

Het spreekt voor zich dat de voorbereidingen voor zowel de aanpassingen van de directieven als voor aanvragen voor NER 400 middelen op korte termijn moeten opgestart worden.

Vlaanderen kan in verband met het EU ETS aanbevelingen doen naar Europa. Hiervoor zijn 3 opties voorgesteld. Als deel van optie 1 kan overwogen worden om het regelgevend kader met een aantal eenvoudige ingrepen aan te passen om CCU te stimuleren, bv. door artikel 49 van Verordening (EU) 601/2012 aan te passen . Op die manier kunnen ETS bedrijven vrijgesteld worden van de rapportering van gecapteerde emissies, mits deze in de niet-ETS sector worden gerapporteerd.

Dit kan zonder aanpassing van de ESD-doelstelling of mits toekenning van “experimenteerruimte” door het licht verhogen van de ESD-doelstelling. Indien deze (tijdelijke?) optie te overwegen is door Europa, dan kan deze vermoedelijk sneller gerealiseerd worden dan de andere opties.

Vlaanderen kan aanbevelingen doen naar Europa om bepaalde niet hernieuwbare CCU-brandstoffen met positieve impact op bv. CO<sub>2</sub>-intensiteit van brandstoffen een plaats te geven (bv. “gelijkstellen”) naast de hernieuwbare brandstoffen.

### 5.6.2 Europees beleid circulaire materialen

Op langere termijn dient het overleg binnen de EU gestimuleerd te worden om in het EU-actieplan voor de circulaire economie en de EU-milieukeur CO<sub>2</sub>-emissiereductie en CO<sub>2</sub>-gebruik beter tot hun recht te laten komen met aandacht voor de coherentie met andere tendensen zoals het meten en communiceren van de carbon-footprint.

Het spreekt voor zich dat de voorbereidingen hiervoor op korte termijn moeten opgestart worden. Vlaanderen kan in dit verband aanbevelingen doen naar Europa.

## 6 REFERENTIES

- Acién, F.G., Fernández, J.M., Magán, J.J., Molina, E. (2012). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology advances* 30, 1344-1353.
- ADEME (2014). Valorisation chimique du CO<sub>2</sub> : état des lieux. Quantification des bénéfices énergétiques et environnementaux et évaluation économique de trois voies chimiques. Rapport.
- APIC, 2015. Acetyls Chain - World Market Overview.
- ArcelorMittal (2016).
- Aresta, M. (2003). Carbon Dioxide Recovery and Utilization. Springer-Science+Business Media, Dordrecht, Nederland.
- Asinger, F. (1968). Mono-olefins chemistry and technology. Pergamon press. 1<sup>st</sup> Edition.
- Bartley, M.L., Boeing, W.J., Corcoran, A.A., Holguin, F.O., Schaub, T. (2013). Effects of salinity on growth and lipid accumulation of biofuel microalga *Nannochloropsis salina* and invading organisms. *Biomass and Bioenergy* 54, 83-88.
- Biogas-E vzw (2014). Biomethaanpotentieel voor Vlaanderen versie 1.0.
- Bocin-Dumitriu, A., Pérez-Fortes, M., Tzimas, E., Sveen, T. (2013). Carbon Capture and Utilisation Workshop (JCR).
- Buehner, M.R., Young, P.M., Willson, B., Rausen, D., Schoonover, R., Babbitt, G., Bunch, S. (2009). Microalgae growth modeling and control for a vertical flat panel photobioreactor. American Control Conference, USA.
- Carus, M. (2014). New policy framework for bio-based economy. CINBIOS 5th IB Forum. Presentatie.
- CEMBUREAU (2012). Cements for a low-carbon Europe. A review of the diverse solutions applied by the European cement industry through clinker substitution to reducing the carbon footprint of cement and concrete in Europe.
- CEMBUREAU (2016). The role of cement in the 2050 low carbon economy.  
<http://lowcarboneyconomy.cembureau.eu>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25, 294–306.







Peeters, L., Schreurs, E., Van Passel, S. (2015). Heterogeneous impact of soil contamination on farmland prices in the Belgian campine region: Evidence from unconditional quantile regressions. *Environmental and Resource Economics*, DOI 10.1007/s10640-015-9945-6.

Pérez-Fortes, M., Bocin-Dumitriu, A., Tzimas, E. (2014). CO<sub>2</sub> utilization pathways: techno-economic assessment and market opportunities. *Energy Procedia* 63, 7968-7975.

Pérez-Fortes, M., Schöneberger, J.C., Boulamanti, A., Tzimas, E. (2016). Methanol synthesis using captured CO<sub>2</sub> as raw material: techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy* 161, 718-732.

Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. (1991) Plant design and economics for chemical engineers. Fourth Edition. McGrawHill International Editors.

Pires, J.C.M., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Simões, M. (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 3043-3053.

Quaghebeur, M., Nielsen, P., Horckmans, L., Van Mechelen, D. (2015). Accelerated carbonation of steel compacts: development of high-strength construction materials. *Frontiers in Energy Research* 3, 1-12.

Quinn, J.C., Yates, T., Douglas, N., Weyer, K., Butler, J., Bradley, T.H., Lammers, P.J. (2012). *Nannochloropsis* production metrics in a scalable outdoor photobioreactor for commercial applications. *Bioresource Technology* 117, 164-171.

San Pedro, A., González-López, C.V., Acien, F.G., Molina-Grima, E. (2015). Outdoor pilot production of *Nannochloropsis gaditana*: Influence of culture parameters and lipid production rates in raceway ponds. *Algal Research* 8:205-213.

SETIS (2016). Carbon Capture Utilisation and Storage. January 2016, No. 11.

Singh, S., Sigurbjornsson, O.F., Tran, K.-C. (2012). Process and system for producing liquid fuel from carbon dioxide and water. US 20120201717 A1. <http://www.google.ch/patents/US20120201717>.

Smith, G. (2014). Carbon Recycling for Sustainable Fuels and Chemicals. 3rd Conference on CO<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> as feedstock for Chemistry and Polymers, Essen, Duitsland. Presentatie.

Snoeckx, R., Heijckers, S., Van Wesenbeeck, K., Lenaerts, S., Bogaerts, A. (2016). CO<sub>2</sub> conversion in a dielectric barrier discharge plasma: N<sub>2</sub> in the mix as a helping hand or problematic impurity? *Energy & Environmental Science* 9, 999-1011.

Stefansson, B. (2015). Power and CO<sub>2</sub> emissions to methanol. European Methanol Policy Forum, Brussel. Presentatie.

////////////////////////////////////

Stute, A. (2015). Dream Production – Dream Polyols. Recent developments on CO<sub>2</sub>-based polyols. SCOT Mid-Term Conference, Essen. Presentatie.

Styring, P., Jansen, D., de Coninck, H., Reith, H., Armstrong, K. 2011; Carbon Capture and Utilisation in the green economy. Using CO<sub>2</sub> to manufacture fuel, chemicals and materials. Report of the Centre for Low Carbon Futures, 2011.

Taelman, S.E., De Meester, S., Roef, L., Michiels, M., Dewulf, J. (2013). The enviromental sustainability of microalgae as feed for aquaculture: a life cycle perspective. *Bioresource Technology* 150, 513-522.

Tafreshi, A.H., Shariati, M. (2006). Pilot culture of three strains of *Dunaliella salina* for  $\beta$ -carotene production in open ponds in the central region of Iran. World Journal of Microbiology and Biotechnology 22, 1003-1006.

Tanaka, K., Miyawaki, K., Yamaguchi, A., Khosravi-Darani, K., Matsusaki (2011). Cell growth and P(3HB) accumulation from CO<sub>2</sub> of a carbon monoxide-tolerant hydrogen-oxidizing bacterium, *Ideonella* sp. O-1. *Applied Microbiology and Biotechnology* 92, 1161-1169.

Thomassen, G., Egiguren Vila, U., Van Dael, M., Lemmens, B., Van Passel, S. (2016). A techno-economic assessment of an algal-based biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*. DOI 10.1007/s10098-016-1159-2.

USGS (2005). Van Oss, H.G. (2008). Background facts and issues concerning cement and cement data, US Department of the interior and US Department of Geological Survey:  
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/myb1-2006-cement.pdf>

Van Eynde, E., Lenaerts B., Tytgat, T., Verbruggen, S., Hauchecorne, B., Blust, R., Lenaerts, S. (2014). Effect of pretreatment and temperature on the properties of *Pinnularia* biosilica frustules. RSC Advances 4, 56200 – 56206.

Van Eynde, E., Lenaerts, B., Tytgat, T., Blust R., Lenaerts S. (2016). Valorization of flue gas by combining photocatalytic gas pretreatment with microalgae production. *Environmental Science & Technology* 50, 2538-2545.

Van Eynde, E., Tytgat, T., Smits, M., Verbruggen, S., Hauchecorne, B., Lenaerts S. (2013). Biotemplated diatom silica-titania materials for air purification. *Photochemical and Photobiological Sciences* 12, 690-695.

Van Gerven, T., Geysen, D., Pontikes, Y., Cizer, Ö., Mertens, G., Elsen, J., Van Balen, K., Jones, P.M., Blanpain, B. (2010). An integrated materials valorisation scheme for Enhanced Landfill Mining. International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining edition 1, Belgium.

Van-Dal, E.S., Bouallou, C. (2013). Design and simulation of a methanol production plant from CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Journal of Cleaner Production* 57, 38-45.

////////////////////////////////////

Vane, L.M. (2008). Separation technologies for the recovery and dehydration of alcohols from fermentation broths. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* 2, 553-588.

Verstraete, W. (2016). Proteins from microbes. Presentatie.

VMM Berekeningswizard Heffingen. <http://berekeningswizard.heffingen.be/>. Accessed 16/12/2015.

von der Assen, N., Bardow, A. (2014). Life cycle assessment of polyols for polyurethane production using CO<sub>2</sub> as feedstock: insights from an industrial case study. *Green Chemistry* 16, 3272-3280.

Wang, Q., Cheng, Y., Jin, Y. (2009). Dry reforming of methane in an atmospheric pressure plasma fluidized bed with Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. *Catalysis Today* 148, 275-282.

Wijffels, R.H. , Barbosa, M.J. , Eppink, M.H.M. (2010). Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 4, 287-295.

Zuijlen, C.L. van, Lensink, S.M. (2015). Eindadvies basisbedragen SDE+ 2016. ECN Beleidsstudies.

[illegible]

## 7 BIJLAGEN

## 7.1 BIJLAGE 1: VRAGENLIJST VOOR INTERVIEWS

### Inputs van het proces

- Voor welk type afgas wordt het proces toegepast? Kan het ook voor andere afgassen ingezet worden?
- Vertrekt het proces effectief van CO<sub>2</sub> of van CO?
- Welke is de minimale/maximale benodigde concentratie van CO<sub>2</sub> voor uw proces?
- Welke andere componenten in de afgasstroom hebben een negatief effect op het proces?
- Welke voorbehandeling of conditionering is nodig?
- Welke zijn de minimale/maximale hoeveelheden CO<sub>2</sub> voor een economisch gunstig proces?
- Welke energiebron wordt gebruikt (licht, elektriciteit, waterstof, ...)?
- Welke inputs buiten CO<sub>2</sub> en energie zijn er nodig voor uw proces (katalysator, substraten)?

## Proceskenmerken

- Wat is het principe?
- Wat is het eindproduct en voor welke toepassing is het bedoeld (biobrandstof, chemicalie, bouw materiaal, ...)?
- Wat zijn de processtappen?
- Wat is de massabalans?
- Wat is de reële opbrengst van CO<sub>2</sub> in het product (uitgedrukt in kg CO<sub>2</sub> per kg product)?
- Wat is het energieverbruik per kg product?
- Kan het proces gebruik maken van hernieuwbare energie?
- Kan het makkelijk af- en aangezet worden (bv. in functie van elektriciteitskost)?

## Status

- Wat is de huidige schaalgrootte van het proces?
- Welke zijn de voornaamste technologische uitdagingen voor commercialisatie?
- Wat is de tijdslijn tot commercialisatie?

## Economische aspecten

- Wat is het markt volume van het product wereldwijd (uitgedrukt in kton/jaar)?
- Van welke CO<sub>2</sub> kostprijs wordt uitgegaan (zonder/met voorbehandeling van afgas)?
- Van welke productprijs wordt uitgegaan?

## Varia

- Wat is het aantal VTE in uw onderzoeksgroep actief in CCU?
- Welke zijn de voornaamste niet-technologische uitdagingen van het proces?
- Welke acties of evoluties zijn nodig om CCU sneller en vlotter ingang te doen vinden?

[illegible]

| Aspect                                                     | Actie nodig (zo ja, welke)? |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Financiering                                               |                             |
| Regelgeving (milieunormen, ...)                            |                             |
| Beleid (subsidies, beleidskader, koolstofbelasting)        |                             |
| Markt (de marktwaaarde van CO <sub>2</sub> -uitstoot...) ) |                             |





DEPARTEMENT  
LEEFMILIEU,  
NATUUR &  
ENERGIE

Koning Albert II laan 20, bus 8  
1000 BRUSSEL  
**[www.lne.be](http://www.lne.be)**