



WP 5.3: Trendanalyse CCU technologieën in toekomstig energiesysteem

Finaal rapport

Jan Duerinck

Studie uitgevoerd in opdracht van Interreg Vlaanderen-Nederland:
2019/Unit SEB/R/

Augustus 2019



VITO NV

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)
Bank 375-1117354-90 ING
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

SAMENVATTING

Het objectief van de trendstudie is om te onderzoeken hoe de diverse technologieën die in het EnOp-project worden ontwikkeld kunnen bijdragen tot het realiseren van een koolstofarme maatschappij waarbij op grootschalige wijze gebruik wordt gemaakt van intermitterende hernieuwbare energie. Deze intermitterende energie wordt voornamelijk opgewekt door zon- en windenergie. Bij grootschalige toepassingen kan het intermitterende karakter van zon- en wind energie problematisch worden, waarbij grote overschotten van elektriciteit ontstaan in de zomermaanden terwijl er in de winter zeer kritische tekorten kunnen ontstaan.

De trendanalyse is een technisch-economische analyse waarbij met behulp van het TIMES model scenario's worden ontwikkeld die ons hier meer inzichten over verschaffen. Het model dat gebruikt wordt is grotendeels gebaseerd op de Belgische situatie, maar de conclusies kunnen doorgetrokken worden naar landen met gelijkaardige klimatologische omstandigheden.

In de loop van het EnOp project is duidelijk gebleken dat verschillende technologieën zich nog in een zeer experimenteel stadium bevonden (TRL 1-2) terwijl van andere technieken duidelijk werd dat ze economische valorisatiemogelijkheden hadden, doch met een beperkt potentieel. Daarom is deze trendanalyse beperkt tot de evaluatie van de Synplasma technologie waarbij syngas wordt geproduceerd op basis van elektriciteit.

Om deze technologie te evalueren werd een TIMES model opgezet met een zeer fijnmazige tijdsresolutie waarin de elektriciteitssector en drie CO₂ intensieve industriële sectoren worden voorgesteld: de staalindustrie, de cementindustrie en de zware petrochemische industrie. In dit model werd een CCU waardeketen opgebouwd, vertrekkende van het afvangen van CO₂ bij de cement- en staalindustrie, die op alternatieve wijze de basiscomponenten van de petrochemische industrie maakt. Met dat model werden scenario's ontwikkeld waarbij tegen 2050 de CO₂ uitstoot met 80% en met 90% werden verminderd t.o.v. een referentiejaar (2014).

Deze scenario's leren ons dat de integratie van een CCU waardeketen aanzienlijk kan bijdragen tot de realisatie van een lage-koolstof-maatschappij. In een 80% reductie scenario schatten we een CO₂ prijs van €135-€200/ton CO₂, in 2050, afhankelijk van de aannames m.b.t. de technologieontwikkeling. Dit is aanzienlijk hoger dan de huidige ETS handelsprijs, maar van dezelfde orde van grootte als de impliciete CO₂-prijs die men kan berekenen voor een aantal beleidsmaatregelen die momenteel in uitvoering zijn voor niet ETS sectoren, zoals de renovatie van gebouwen en de productie van biobrandstoffen voor de transportsector.

Goedkope hernieuwbare energie is de sleutel tot succes. Dit blijkt bijzonder uit een extra sensitiviteitsonderzoek waarbij we het profiel voor zonnestraling van Spanje hebben toegepast in hetzelfde model. De capaciteitsfactor voor zonne-energie ligt in Spanje twee maal hoger dan in België, en dit wordt niet enkel verklaard door de intensiteit, maar tevens door een groter aantal operationele uren. Dit heeft een grote impact op het systeem. Door deze ingreep daalt de CO₂ prijs van €135 /ton tot €18/ton.

INHOUD

| | |
|---|------------|
| Samenvatting | I |
| Inhoud | II |
| Lijst van tabellen | III |
| Lijst van figuren | IV |
| Lijst van afkortingen | V |
| HOOFDSTUK 1. Inleiding | 1 |
| 1.1. <i>Kader</i> | 1 |
| HOOFDSTUK 2. Methodologie | 2 |
| 2.1. <i>TIMES model</i> | 2 |
| 2.2. <i>Marginale CO₂ kost als uniek criterium</i> | 3 |
| 2.3. <i>Modelbeschrijving</i> | 3 |
| 2.3.1. <i>Basisstructuur</i> | 4 |
| 2.3.2. <i>CO₂-afvang</i> | 10 |
| 2.3.3. <i>CO₂ valorisatie</i> | 11 |
| HOOFDSTUK 3. Scenario varianten | 13 |
| 3.1. <i>Varianten</i> | 13 |
| 3.1.1. <i>CO₂ uitstoot</i> | 13 |
| 3.1.2. <i>Boekhoudkundige verrekening (ACC)</i> | 14 |
| 3.1.3. <i>Technologiekenmerken (ST-IT)</i> | 14 |
| 3.1.4. <i>Zonnestraling (S)</i> | 14 |
| 3.1.5. <i>Overzicht van de scenario's</i> | 15 |
| HOOFDSTUK 4. Resultaten | 16 |
| 4.1. <i>Bespreking van het centraal scenario</i> | 16 |
| 4.1.1. <i>Elektriciteitsproductie</i> | 16 |
| 4.1.2. <i>Integratie van de CCU waardeketen</i> | 17 |
| 4.1.3. <i>Socio economische kenmerken</i> | 17 |
| 4.2. <i>Marginale CO₂ prijs in alle scenario's</i> | 18 |
| HOOFDSTUK 5. Besluit | 20 |
| Literatuurlijst | 21 |

LIJST VAN TABELLEN

| | |
|---|----|
| Tabel 1 : Leercurven voor hernieuwbare elektriciteitsproductie (EUR/kW geïnstalleerd vermogen) | 4 |
| Tabel 2: Techno-economische karakteristieken van de CCU waardeketen in het model | 7 |
| Tabel 3: Optimistische technologiekenmerken | 9 |
| Tabel 4: Inschatting van de eenheidskosten EUR/ton voor het afvangen van CO2 Kosten | 10 |
| Tabel 5: Definitie van de scenario's | 15 |
| Tabel 6: Productiecapaciteiten van de CCU waardeketen | 17 |

LIJST VAN FIGUREN

| | |
|---|----|
| Figuur 1: Modelstructuur om de potentiële impact van de plasma technologie te analyseren | 6 |
| Figuur 2: Vergelijking van Fischer Tropsch productie van Olefinen met klassieke nafta krakers. | 11 |
| Figuur 3: Evolutie van de CO2 uitstoot in het Low Carbon(80% reductie en het Xlow carbon (90% reductie)scenario's | 13 |
| Figuur 5: Elektriciteitsproductie in het 80% ST-CCU-ACC scenario | 16 |
| Figuur 4: Operationele uren in het 80% ST-CCU ACC scenario | 17 |
| Figuur 6: Marginale CO2 prijs in 80% reductie scenario's | 18 |
| Figuur 7: Marginale CO2 prijs bij 90 % reductie scenario's | 19 |

LIJST VAN AFKORTINGEN

| | |
|-----|-------------------------|
| DAC | Direct Air Capturing |
| MTO | Methanol to Olefins |
| FT | Fischer Tropsch reactie |
| CCU | Carbon Capturing & Use |
| TGR | Top gas recycling |
| ST | Standard Technology |
| ACC | ACCCounting |
| WKK | Warmte kracht koppeling |

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

1.1. KADER

De bestrijding van de klimaatopwarming vereist de ontwikkeling van een koolstofarme economie wat ongetwijfeld één van de grootste maatschappelijke uitdagingen is sinds de industriële revolutie. De industriële revolutie heeft een historische periode ingeleid van sterke economische groei met een toename van welvaart en levenscomfort. De grote uitdaging is nu om een koolstofarme economie te ontwikkelen waarin welvaart en levenscomfort verder kunnen blijven stijgen. We kunnen de probleemstelling in economische termen als volgt uitdrukken: hoe moeten we de schaarse middelen zo efficiënt mogelijk inzetten om de klimaatopwarming te bestrijden. Dit is een macro-economische vraagstelling die moet beantwoord worden vanuit een volledige systeembenadering. Dit is de focus van deze trendanalyse.

Binnen EnOp worden diverse technologieën ontwikkeld waarin CO₂ wordt omgezet naar nuttige componenten. Deze technologieën zijn zeer verscheiden. Vanuit de systeembenadering zijn de volgende kenmerken belangrijk:

- 1) het potentieel om op grootschalige wijze CO₂ om te zetten naar nuttige componenten. In de loop van het project is duidelijk geworden dat met bepaalde technologieën wel nuttige componenten kunnen worden geproduceerd, doch met een beperkt potentieel qua volume. De jaarlijkse CO₂ uitstoot in België bedraagt ongeveer 100 miljoen ton en deze zou dus moeten teruggebracht worden tot 10 miljoen ton of minder. In de systeemanalyse willen we ons beperken tot potentiële bijdragen die uitgedrukt worden in miljoen ton.
- 2) De maturiteit van de technologie. Een systeemanalyse is gebaseerd op de technologische en economische karakteristieken van een technologie. Deze moeten dus gekend zijn of moeten minstens binnen zeker marges kunnen ingeschat worden. Voor technologieën op laag TRL niveau (TRL 1-3) is dit problematisch.

De technologische en economische parameters van de technologieën werden in werkpakket 5.4 bepaald. Omwille van het laag TRL niveau van de meeste technologieën werd besloten deze analyse te beperken tot plasmatechnologieën waarbij CO₂ met behulp van elektriciteit wordt omgezet naar syngas. Hierop passen we een systeemanalyse toe waarmee we kunnen onderzoeken wat de potentiële bijdrage kan zijn van deze technologieën in het realiseren van de lage koolstofeconomie. Daarbij bekijken we hele waardeketen. De EnOp technologieën hebben betrekking op de omzetting van CO₂ naar nuttige moleculen. In de systeemanalyse bekijken we eveneens welke CO₂ bronnen het meest geschikt blijken en bekijken we eveneens in welke toepassingen de moleculen de grootste toegevoegde waarde leveren. Dit veronderstelt eveneens het gebruik van technologieën die we niet zelf onderzoeken maar waarvoor we ons baseren op de vakliteratuur.

HOOFDSTUK 2. METHODOLOGIE

2.1. TIMES MODEL

Het TIMES model is een generieke software om een energiesysteem voor te stellen en scenario's te ontwikkelen. Met het TIMES model is het mogelijk om een systeemconfiguratie te ontwikkelen die aan bepaalde, door de gebruiker bepaalde, voorwaarden moet voldoen en dit tegen de laagst mogelijk systeemkost. Mathematisch bekeken is TIMES een lineair programmeringsmodel met als objectieffunctie de som van alle kosten (investeringen, brandstof, variabele kosten...) en dit voor de hele scenario horizon. TIMES wordt gebruikt om scenario's te ontwikkelen met een horizon van 20-100 jaar. Toekomstige kosten worden verdisconteerd naar het basisjaar. TIMES opereert vanuit het perspectief van de centrale planner die over alle informatie beschikt, nu zowel als in de verre toekomst. Dit laatste wordt ook wel omschreven als het "Perfect Foresight" paradigma.

De relevantie van een dergelijke benadering in een vrije markt werd veelvuldig bediscussieerd en bekritiseerd. De "Perfect Foresight" benadering zou naïef zijn want niemand kan de toekomst voorspellen en de centrale planner zou niet overeenstemmen met de vrije markt waarin juist heel veel beslissingsnemers opereren. Het is nuttig om even bij deze kritieken stil te staan om de beperkingen van deze trendanalyse te kaderen.

De perfect foresight hypothese is naïef want de mogelijkheden om de toekomst te voorspellen zijn beperkt.

De perfect foresight hypothese houdt in dat investeringsbeslissingen in TIMES worden geëvalueerd over de volledige levensduur van de uitrusting. In andere modellen worden soms een "limited" foresight benadering gebruikt. Maar "limited foresight" benaderingen gaan er impliciet van uit dat de toestand niet zal wijzigen na de investeringsbeslissing. Dat is in feite een zeer arbitraire aanname die bovendien minder geschikt is om lange termijn scenario's te ontwikkelen met als ultieme doelstelling om de CO₂ uitstoot tegen 2050 met pakweg 90% te reduceren. Een limited foresight beslissing zou er dan op gebaseerd zijn dat de CO₂ uitstoot in de komende vijf jaar met 20% moet gereduceerd worden zonder er rekening mee te houden dat die in de volgende periode nog eens met 20% naar beneden moet.

We kunnen de ontwikkeling van nieuwe technologieën niet voorspellen

We kunnen de toekomst in zijn geheel niet voorspellen en met de betrekking tot de ontwikkeling van nieuwe technologieën kunnen we dat helemaal niet. Van sommige EnOp technologieën die we vandaag nog niet kunnen evalueren kan later blijken dat ze een zeer groot potentieel hebben. Reken daarbij nog dat niet alleen in het EnOP project nieuwe technologieën worden ontwikkeld, maar dat wereldwijd honderden, zo niet duizenden onderzoeksteams bezig zijn nieuwe technologieontwikkeling. Het zou verbazen als al deze onderzoeksteams niet succesvol zouden zijn. De scenario's die met TIMES worden ontwikkeld hebben daarom weinig of geen voorspellende waarde. In het beste geval kan men concluderen dat op basis van de huidige kennis een bepaald scenario de beste oplossing weergeeft.

De vrije markt reageert niet zoals door TIMES wordt voorspeld.

Dit moeten we nuanceren omdat hier ook onvolmaaktheden van de vrije markt spelen. Er kan aangetoond worden dat, onder voorwaarde van perfecte informatie, de oplossing van een zuivere

concurrentiële markt eveneens leidt tot een minimalisering van alle kosten. Dit is juist één van de basisideeën waarop de vrije markt steunt. Er is dus zeker geen groot conflict tussen een TIMES oplossing en de vrije markt. Verklaringen voor verschillen moeten dus ook gezocht worden in het bestaan van andere marktvormen (monopolie, monopolistische concurrentie...) en interventies van de overheid. TIMES resultaten blijven hun richtinggevende waarde behouden.

2.2. MARGINALE CO₂ KOST ALS UNIEK CRITERIUM

Het huidige klimaatbeleid steunt op verschillende pijlers. Een emissiehandel systeem stuurt de zware industriële sectoren en voor niet ETS sectoren worden vanuit een Europees beleid afzonderlijke doelstellingen opgelegd met betrekking tot energie-efficiëntie en de reductie van broeikasgassen. Daarnaast worden nog eens afzonderlijke doelstellingen opgelegd over het gebruik van hernieuwbare energie.

In principe zouden we EnOp technologieën kunnen evalueren ten opzichte van deze verschillende doelstellingen. EnOp staat bovendien als afkorting voor energieopslag, wat laat vermoeden dat de technologieën zouden geëvalueerd worden met betrekking tot hun capaciteit om energie op te slaan, wat dan rechtstreeks in verband kan worden gebracht met de productie van hernieuwbare- maar intermitterende energie.

Maar, vanuit macro-economische efficiëntie overwegingen kan best een duidelijk onderscheid gemaakt worden tussen doel en middelen. Het uiteindelijke doel is de realisatie van een koolstofarme maatschappij en hernieuwbare energie en energie-efficiëntie kunnen daartoe bijdragen. Afzonderlijke criteria stellen leidt tot suboptimale oplossingen. Bovendien kunnen er conflicten zijn. Bepaalde technologieën kunnen goed scoren met betrekking tot de integratie van hernieuwbare energie, maar slecht scoren op het vlak van energie-efficiëntie. Voor het beleid kunnen er goede redenen zijn om een afzonderlijke doelstelling voor hernieuwbare energie en energie-efficiëntie op te leggen. Het gaat hem daarbij dikwijls om redenen die niet in het model worden voorgesteld (NIMBY, technologiebevordering).

In TIMES kunnen we op twee manieren met een CO₂ prijs rekenen. De eerste optie bestaat er in om CO₂ taks in te voeren. Minimaliseren van de kosten leidt dan tot minder CO₂ intensieve oplossingen. Een tweede methode bestaat er in om in het model een CO₂ beperking in te voeren. Elke beperking heeft een kostprijs en het model berekent deze schaduwprijs. Deze methodes zijn equivalent, d.w.z. dat als we de schaduwprijs van een CO₂ beperking als een CO₂ taks invoeren we identiek dezelfde modeloplossing vinden. Deze eigenschap van lineaire programmeringsmodellen laat ons toe om de CO₂-prijs van een koolstofarme economie te bepalen via het opleggen van een CO₂-beperking.

2.3. MODELBESCHRIJVING

Het opzet is om het potentiële impact van de plasma technologie voor de productie van syngas te analyseren in een lage koolstofeconomie waarin koolstofvrije elektriciteit gebaseerd is op intermitterende energiebronnen. Hiervoor hebben we een specifieke modelstructuur opgezet met de volgende kenmerken (zie Figuur 1 en Tabel 1 voor de technische en economische parameters)

In de basisopstelling (relevant voor het referentiejaar) beschouwen we de elektriciteitssector en drie CO₂ intensieve sectoren, namelijk de staalindustrie, de cementindustrie en de zware petrochemische

industrie voor de productie van olefinen op basis van nafta. Onderliggende cijfers zijn gebaseerd op de Belgische economie.

Het basismodel wordt verder uitgebreid met een specifieke CCU waardeketen. Deze omvat het afvangen van CO₂, de productie van syngas en de productie van afgeleide producten die bestaande productieroutes kunnen vervangen of die tegen marktprijzen kunnen verkocht worden. De CCU waardeketen is optioneel. In Figuur 1 wordt de modelstructuur voorgesteld.

2.3.1. BASISSTRUCTUUR

→ Elektriciteitssector

De elektriciteitsvraag van de sectoren die niet in het model worden weergegeven neemt sterk toe van 86 TWh in 2016 tot 150 TWh in 2050. Die stijging reflecteert een elektrificatie van energiediensten in andere sectoren: warmtepompen voor gebouwenverwarming, elektrificatie van de transportsector, elektrificatie van warmtevraag in bepaalde industriële sectoren.

Na 2030 kan elektriciteit worden geproduceerd met windmolens op land en op zee, zonnepanelen, en gasinstallaties. Een industriële warmtevraag (buiten de gemodelleerde sectoren) wordt geleverd door gasgestookte WKK installaties. In het model is ook de optie voorzien om warmte te leveren met elektrische boilers. Voor de hernieuwbare productie werd rekening gehouden met een verdere daling van de investeringskosten (Tabel 1)

Tabel 1 : Leercurven voor hernieuwbare elektriciteitsproductie (EUR/kW geïnstalleerd vermogen)

| | | Levensduur | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------|---------|------------|------|------|------|------|
| Wind op land | EUR/kW | 30 | 1270 | 1190 | 1100 | 1000 |
| Wind op zee | EUR/kW | 30 | 3000 | 2700 | 2400 | 2100 |
| PV | EUR/kW | 20 | 1200 | 950 | 500 | 350 |
| Batterijopslag | EUR/kWh | 10 | 150 | 100 | 75 | 50 |

Voor opslag van elektriciteit zijn er drie opties. De bestaande pompcentrales blijven behouden zonder mogelijkheid tot capaciteitsuitbreiding. Daarnaast kan elektriciteit opgeslagen worden in batterijen. Dat gebeurt met een zeer hoge efficiëntie, maar omwille van de hoge kostprijs kunnen batterijen enkel ingezet worden binnen een periode van 24 uur¹. Daarnaast is er seizoensopslag. De karakteristieken van deze technologie zijn gebaseerd op een waterstof cyclus (elektrolyse, opslag onder de vorm van waterstof, brandstofcel) met een globaal rendement van 42%.

→

¹ De impact van stokeringskost op de prijs van elektriciteit wordt mede bepaald door het aantal cycli. In een dag-nacht systeem kunnen batterijen tot 365 keer per jaar geladen en ontladen worden. Om de zomer winter cyclus te overbruggen zouden batterijen dus 365 keer duurder uitvallen.

→ **Industrie Een exogene vraag naar staal, cement, ethyleen en propyleen worden constant verondersteld op het niveau van de huidige productie.**

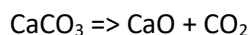
Staal

Staal wordt geproduceerd volgens het klassieke hoogovenproces zoals dat in de site van Arcelor Mittal in Gent wordt toegepast. Daarbij zijn er verschillende emissiebronnen die we als volgt kunnen situeren: Eerst worden cokes geproduceerd(1), die vervolgens samen met ijzererts versinterd worden(2). De sinter wordt in de hoogoven geladen waar met behulp van bijkomende koolstofbron onder de vorm van cokes of steenkoolpoeder een chemische reactie plaatsgrijpt waarbij ijzererts wordt gereduceerd tot ruwijzer (3). In deze stap wordt hoogovengas geproduceerd, een laagcalorisch gas met een zeer hoge CO₂ verbrandingswaarde. Het hoogovengas wordt gedeeltelijk gevaloriseerd in de site (4) en met het overschot wordt elektriciteit opgewekt (5). In de staalfabriek wordt het koolstofgehalte in het ruwe ijzer verlaagt door zuurstof te injecteren waarbij CO en CO₂ worden gevormd (6). Dan wordt het staal gegoten en worden de gietblokken na uitharding in de warme walserij bij middel van hefalkovens opnieuw opgewarmd om walsen mogelijk te maken (7). Nadien komt de koude walserij waarbij.

In het model voor de staalsector is ook de optie voorzien om het overschot aan hoogovengas te recyclen in het proces (top gas recycling) zodat er geen elektriciteit meer mee wordt opgewekt. Dit is tevens een energie en CO₂ besparende maatregel. Alternatieve CO₂ vrije productiewijzen op basis van waterstof werden niet in het model opgenomen.

Cement

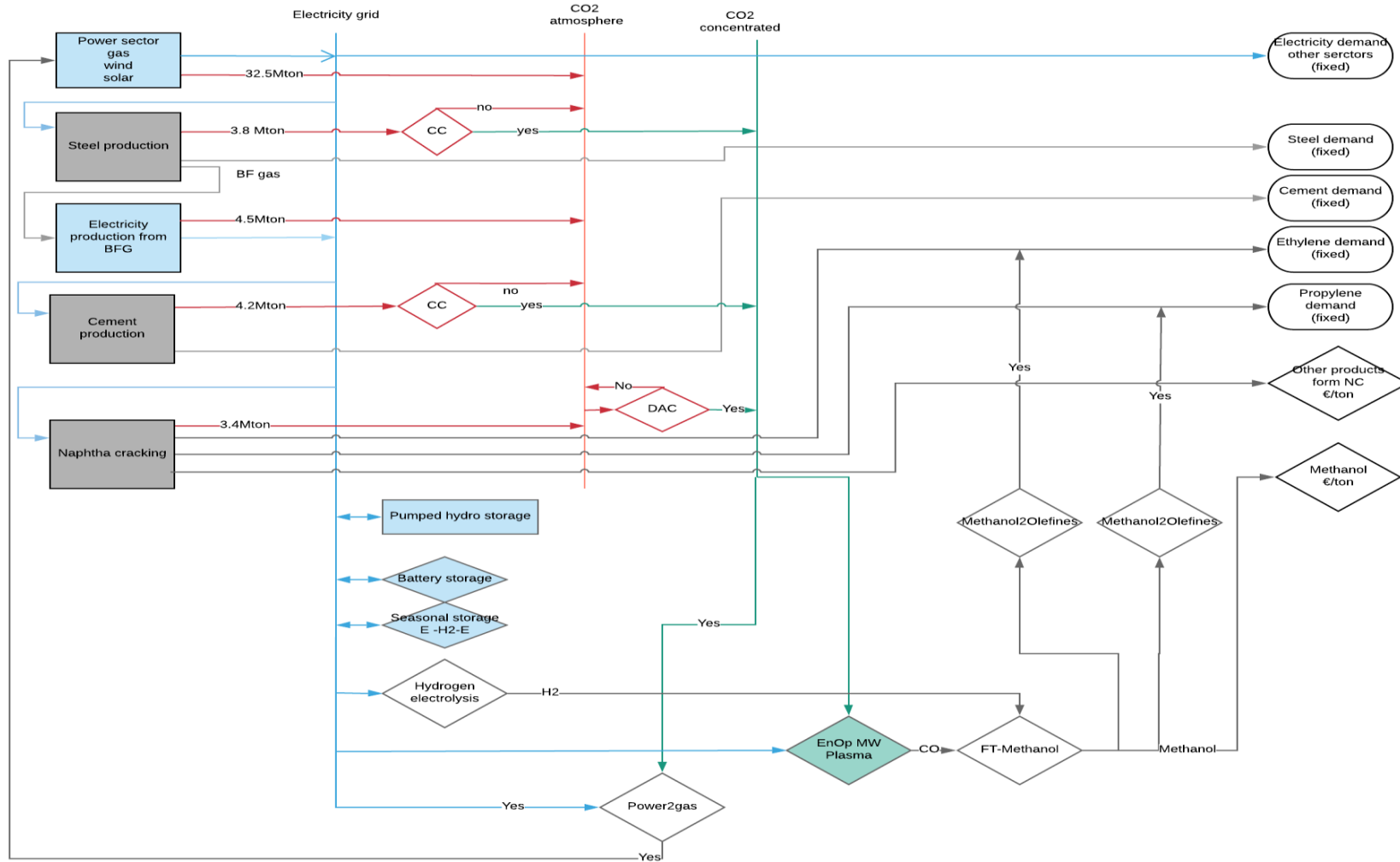
In het proces om cement te produceren wordt calciumcarbonaat (CaCO₃) omgezet in calciumoxide volgens de reactie



De CO₂-emissies die uit deze reactie voortkomen zijn procesemissies en onvermijdelijk. Daarnaast zijn er ook nog CO₂ emissies van de verbranding van fossiele brandstoffen. De concentratie van CO₂ emissies is daardoor aanzienlijk hoger dan bij andere productieprocessen.

Ethyleen en propyleen

Ethyleen en propyleen zijn de belangrijkste olefinen en zijn de bouwstenen voor de productie van kunststoffen. In België worden ethyleen en propyleen in bepaalde verhoudingen geproduceerd in naftakrakers. Bondig samengevat bestaat het proces uit het opwarmen van de grondstof in kraakovens tot zeer hoge temperaturen. Hierbij treden allerlei chemische reacties op wat resulteert in een mengeling van gasvormige en vloeibare componenten. Nadien volgt een complex proces van scheiden en recupereren waarbij naast ethyleen en propyleen nog een aantal bijproducten (butadieen, benzeen) en recuperatiebrandstof worden gevormd. De recuperatiebrandstof is de energiebron om het proces draaiende te houden. Nafta is in België de belangrijkste grondstof maar ander alternatieven zoals propaan en dieselolie zijn ook mogelijk. In België zijn er vier naftakrakers operationeel, waarvan drie bij TAO (Total Antwerp Olefins) en één bij BASF.



Figuur 1: Modelstructuur om de potentiële impact van de plasma technologie te analyseren

Tabel 2: Techno-economische karakteristieken van de CCU waardeketen in het model

| Technology | Output | Capacity unit | Input | value | Unit | Lifetime | Capex : € / unit | | | | Operating cost | |
|---|----------|-------------------|-------|-------|-----------------|----------|------------------|------|------|------|----------------|-------------|
| | | | | | | | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 | | |
| CO2 capture-direct air | CO2 | ton CO2/year | ELC | 1.26 | GJ/ton | 20 | 1300 | 1177 | 833 | 463 | 24 | €/ton CO2 |
| | | | LTH | 7.26 | GJ/ton | | | | | | | |
| CO2 capture Cement post combustion | CO2 | ton CO2/year | ELC | 0.54 | GJ/ton | 20 | 250 | 200 | 175 | 150 | 5 | €/ton CO2 |
| | | | LTH | 5.4 | GJ/ton | | | | | | | |
| CO2 capture Cement oxifuel combustion | CO2 | ton CO2/year | O2 | 0.3 | ton/ton | | 35.24 | 35 | 35 | 35 | 0.7 | €/ton CO2 |
| | | | ELC | 0.53 | GJ/ton | | | | | | | |
| CO2 capture Steel plant Top gas recycling | CO2 | ton CO2/year | ELC | 0.54 | GJ/ton | 20 | 250 | 200 | 175 | 150 | 5 | €/ton CO2 |
| | | | LTH | 3.8 | GJ/ton | | | | | | | |
| Oxygen production | O2 | ton/year | ELC | 0.72 | GJ/ton O2 | 30 | 200 | 200 | 200 | 200 | | |
| Microwave plasma reactor | CO | ton CO/year | CO2 | 1.57 | ton/ton | 15 | 1500 | 1178 | 847 | 532 | 110 | €/ton CO |
| | | | ELC | 40.96 | GJ/ton | | | | | | | |
| Gliding arc plasma reactor | CO | ton CO/year | CO2 | 1.57 | ton/ton | 15 | 1116 | 877 | 631 | 396 | 102 | €/ton CO |
| | | | ELC | 34.9 | GJ/ton | | | | | | | |
| Methanol production catalytic | Methanol | ton methanol/year | H2 | 27.6 | GJ/ton | 20 | 918 | 918 | 918 | 918 | 21.75 | €/ton CH3OH |
| | | | CO2 | 1.4 | ton/ton | | | | | | | |
| | | | ELC | 2.32 | GJ/ton | | | | | | | |
| | | | LTH | 3.8 | GJ/ton | | | | | | | |
| Methanol synthesis from syngas | Methanol | ton methanol/year | CO | 0.88 | ton/ton | 20 | 500 | 500 | 500 | 500 | 13.4 | €/ton |
| | | | H2 | 17.71 | GJ/ton | | | | | | | |
| | | | ELC | 2.32 | GJ/ton | | | | | | | |
| | | | LTH | 1.41 | GJ/ton | | | | | | | |
| Hydrogen production – electrolyser | H2 | kW | ELC | 1.43 | GJ/GJ | 15 | 1200 | 900 | 750 | 550 | 29 | €/kW |
| Power to gas | Gas | kW | CO2 | 0.05 | ton/GJ | 20 | 1374 | 1074 | 924 | 674 | 28 | €/kW |
| | | | ELC | 1.33 | GJ/GJ | | | | | | | |
| Fischer Tropsch Olefins production | CO | ton olefins/year | | 7.13 | ton/ton olefins | 30 | 900 | 900 | 900 | 900 | 15 | |
| | H2 | | | 173 | GJ/ton ethylene | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|------------------|--------|------------------|-------|-----------------|-----|-----|-----|----|----------------|--|
| | ELC | | 0.3024 | GJ/ton ethylene | | | | | | | | |
| | | | | Ethylene | 1 | Ton | | | | | | |
| | | | | Propylene | 1.57 | Ton | | | | | | |
| | | | | LTH | 100 | GJ/ton ethylene | | | | | | |
| Olefin from methanol - max prop yield | Methanol | ton olefins/year | 2.54 | ton/ton olefins | 30 | 276 | 276 | 276 | 276 | 15 | €/ton methanol | |
| | ELC | | 0.15 | ton/ton methanol | | | | | | | | |
| | | | | Ethylene | 0.357 | Ton | | | | | | |
| | | | | Propylene | 0.643 | Ton | | | | | | |
| Olefin from methanol - max ethyl yield | Methanol | ton olefins/year | 2.75 | ton/ton olefins | 30 | 276 | 276 | 276 | 276 | 15 | €/ton methanol | |
| | ELC | | 0.15 | ton/ton methanol | | | | | | | | |
| | | | | Ethylene | 0.476 | Ton | | | | | | |
| | | | | Propylene | 0.524 | Ton | | | | | | |

Tabel 3: Optimistische technologiekenmerken

| Technology | Output | Capacity unit | Input | value | unit | Lifetime | Capex : € / unit | | | | Operating cost | |
|---------------------------------------|----------|-------------------|-------|-------|---------|----------|------------------|------|------|------|----------------|----------|
| | | | | | | | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 | | |
| Hydrogen production by solar | H2 | kW | SUN | 1 | | 25 | 3000 | 1900 | 700 | 500 | 5 | |
| HE Microwave plasma reactor | CO | ton CO/year | CO2 | 1.57 | ton/ton | 15 | 1500 | 1178 | 847 | 532 | 110 | €/ton CO |
| | | | ELC | 30 | GJ/ton | 15 | | | | | | |
| LC Microwave plasma reactor | CO | ton CO/year | CO2 | 1.57 | ton/ton | 15 | 580 | 522 | 370 | 205 | 110 | €/ton CO |
| | | | ELC | 40.96 | GJ/ton | 15 | | | | | | |
| HE Methanol synthesis from syngas | Methanol | ton methanol/year | CO | 0.88 | ton/ton | 20 | 250 | 250 | 250 | 250 | 13.4 | €/ton |
| | | | H2 | 17.71 | GJ/ton | | | | | | | |
| | | | ELC | 2.32 | GJ/ton | | | | | | | |
| | LTH | | | 1.41 | GJ/ton | | | | | | | |
| HE Hydrogen production – electrolyser | H2 | kW | ELC | 1.18 | GJ/GJ | 15 | 1200 | 900 | 750 | 550 | 29 | €/kW |

2.3.2. CO₂-AFVANG

Cementindustrie

In de cementindustrie hebben we in het model twee opties om CO₂ af te vangen: 1) een post combustion techniek waarbij CO₂ bij middel van amines wordt gevangen uit de rookgassen en 2) Oxi-brandstofverbranding. Hierbij wordt de noodzakelijk proces warmte opgewekt door de verbranding van fossiele brandstoffen met zuivere zuurstof in plaats van atmosferische lucht. De rookgassen bevatten dan voornamelijk CO₂ en water. Dat laatste kan gemakkelijk afgescheiden worden door condensatie. Als de fossiele brandstof ook zwavel en stikstofcomponenten bevat kunnen de rookgassen ook NO_x en SO₂ bevatten. Daarmee werd in de analyse geen rekening gehouden.

Staalsector

Door de verscheidenheid aan emissiebronnen is het in de staalindustrie zeer moeilijk om alle CO₂-emissies op te vangen. In het model is dit beperkt tot de CO₂-emissies die in de TGR unit bij de hoogovens worden afgescheiden van de CO-stroom die gerecycleerd wordt. Het CO₂-potentieel is hierdoor beperkt tot 4.5 Mton.

Atmosferische CO₂

Atmosferische lucht is een quasi onuitputtelijke bron van CO₂. Bij middel van DAC (direct air capturing) kan CO₂ uit de lucht gefilterd worden. Om een significante hoeveelheid CO₂ te capteren is omwille van de lage concentratie een grote luchtstroom nodig wat een impact heeft op de dimensies en de kostprijs van de installaties. Daarnaast zijn er echter ook een aantal voordelen op het vlak van effectiviteit, flexibiliteit en zuiverheid van de CO₂. Voor een zero emissie scenario zou de effectiviteit van CO₂ afvang in industriële installaties 100% moeten zijn, maar voor geldt enkel de hoeveelheid CO₂ die men afvangt. De uitgangconcentratie is onbelangrijk. Men kan de DAC installaties laten werken wanneer het goed uitkomt, bijvoorbeeld als de stroomprijs laag is. En tenslotte is de concentratie luchtpolluenten in atmosferische lucht bijzonder laag zodat een zeer zuiver product kan bekomen worden.

De technische economische parameters voor deze opties worden in Tabel 2 weergegeven. Omdat deze gegevens beter te interpreteren wordt in Tabel 4 een inschatting gemaakt van de eenheidskosten in functie in functie van het jaar en de operationele uren. Op basis van de gehanteerde aannames is DAC een stuk duurder dan de andere opties. Als de kosten verder zouden kunnen zakken wordt DAC een valabel alternatief op de andere opties.

Tabel 4: Inschatting van de eenheidskosten EUR/ton voor het afvangen van CO₂ Kosten

| | 2025 | | 2050 | |
|-------------------|------|------|------|------|
| Operationele uren | 4000 | 8760 | 4000 | 8760 |
| DAC | 330 | 178 | 183 | 111 |
| Cement-Amine | 85 | 55 | 67 | 47 |
| Cement-Oxi | 38 | 25 | 38 | 25 |
| Staal | 79 | 49 | 61 | 41 |

2.3.3. CO₂ VALORISATIE

→ Productie van syngas

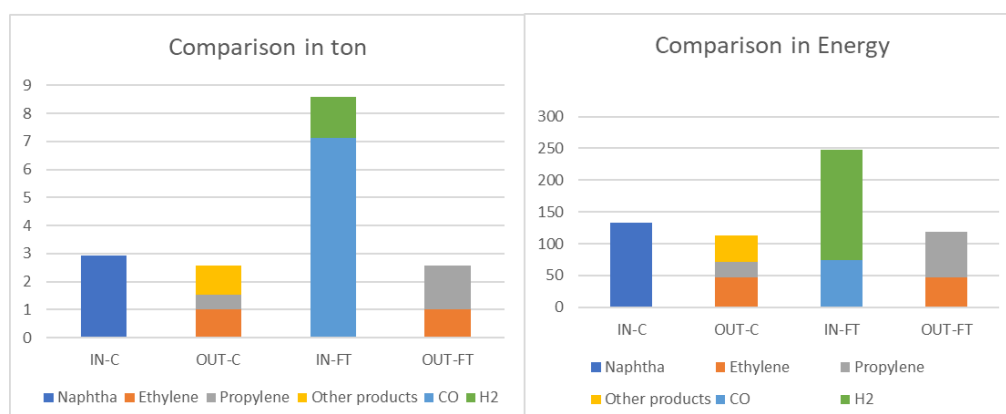
De centrale technologie in de valorisatieketting is de microgolf plasma reactor die door DIFFER wordt ontwikkeld. Met deze technologie wordt CO₂ omgezet in koolstofmonoxide (CO). In een later fase is het de bedoeling om, mits toevoeging van methaan, een mengeling te maken van CO en waterstof, beter gekend als syngas. Omdat hier nog geen operationele gegevens beschikbaar zijn, zijn er van uitgegaan dat syngas bekomen wordt door toevoeging waterstof (H₂) op basis van elektrolyse. Syngas is een belangrijke grondstof in de organische chemie. Het kan verder worden omgezet in methanol of het kan de grondstof zijn voor de productie van synthetische brandstoffen en olefinen. In het model is de productie van methanol een belangrijk element in de waardeketen.

→ Productie van methanol

De toepassingen van methanol zijn bijzonder uitgebreid. De waardeketen voor methanol wordt voorgesteld door de optie om methanol te verkopen aan gangbare marktprijzen of verder te verwerken (zie supra). De productie van methanol op basis van syngas is een **breed** toegepaste technologie. Het verschil met de traditionele productie ligt in de wijze waarop het syngas wordt geproduceerd. Bij fossiele methanol wordt het syngas geproduceerd uitgaande van aardgas wat gepaard gaat met een CO₂ uitstoot van ½ ton CO₂ per ton methanol.

→ Productie van olefinen op basis van syngas (FT synthese).

Met Fischer Tropsch reacties kunnen ook olefinen geproduceerd worden. Het proces wordt voor zover wij weten in de praktijk niet toegepast maar is wel gepatenteerd in de US. (US 2014/0128486 A1). Het betreft hier een sterk exotherm proces. In Figuur 2 wordt de prestaties van de Fischer Tropsch productieroute vergeleken met de klassieke productieroute. De materiaalbalans en de energiebalans suggereren een comparatief nadeel voor de Fischer Tropsch route. Het proces kan dan ook maar competitief zijn als CO en H₂ beschikbaar zijn tegen een lage kostprijs en de warmte kan gevaloriseerd worden.



Figuur 2: Vergelijking van Fischer Tropsch productie van Olefinen met klassieke nafta krakers.

→ **Productie van olefinen op basis van methanol (MTO)**

Methanol kan ook aangewend worden als grondstof voor de productie van ethyleen en propyleen. Deze technologie wordt commercieel aangeboden en is competitief als syngas goedkoop kan geleverd worden. Onder meer in China wordt syngas geproduceerd op basis van steenkool en wordt methanol aangewend als intermediair product voor de productie van ethyleen en propyleen. In 2008 werd in België een demonstratieplant gebouwd bij Total Feluy.

Het proces verbruikt 2.6 ton methanol per ton olefinen en de energetische efficiëntie bedraagt ongeveer 80%. Een ander voordeel voor deze productieroute is dat methanol onder atmosferische omstandigheden vloeibaar is waardoor het goedkoop massaal kan gestockeerd worden.

HOOFDSTUK 3. SCENARIO VARIANTEN

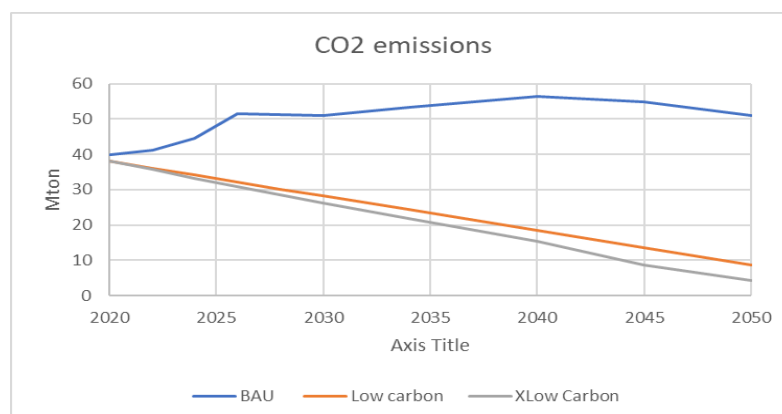
3.1. VARIANTEN

Met het model ontwikkelen we een aantal low carbon scenario's die ons toelaten om de impact van bepaalde aannames in te schatten. De scenario's verschillen in de volgende parameters:

- CO2 reductie
- Boekhoudkundige benadering
- Technologie kenmerken
- Weercondities

3.1.1. CO₂ UITSTOOT

De gezamenlijk CO₂ uitstoot van de elektriciteitssector, de staalindustrie, de cementindustrie en de nafta crackers bedroeg in 2014 43.7 Mton. In een BAU scenario, waarbij de elektriciteitsproductie zou gebaseerd zijn op aardgas en hernieuwbare energiebronnen zou dit verder oplopen tot 56 Mton in 2040 om nadien, als gevolg van leercurven voor hernieuwbare energieproductie terug te dalen tot 51 Mton. In een low carbon scenario worden de uitstoot verminderd met 80 % t.o.v. de uitstoot in 2014 en in het Xlow carbon scenario wordt de uitstoot verminderd met 90 %.



Figuur 3: Evolutie van de CO₂ uitstoot in het Low Carbon(80% reductie en het Xlow carbon (90% reductie)scenario's

3.1.2. BOEKHOUDKUNDIGE VERREKENING (ACC)

Methanol wordt op industriële wijze geproduceerd uit aardgas en bij deze productie wordt per ton methaan $\frac{1}{2}$ ton CO₂ geëmitteerd. De industriële productie van methanol werd in de basisstructuur niet opgenomen² maar methanol wordt verkocht aan marktprijzen³.

Modelmatig kunnen nu twee benaderingen worden toegepast. Ofwel gaan we er van uit dat de productie van methanol op basis van syngas additionele productie betreft. Dit komt er op neer dat we stellen dat de vraag naar methanol zich aanpast aan het aanbod. De andere benadering is dat we stellen dat deze methanol fossiele methanol zal vervangen. In dit geval gaan we er van uit dat de vraag naar methanol niet bepaald wordt door de productiewijze maar door de kenmerken van het product. Op CO₂ vlak verkrijgen we zo een win-win situatie omdat er naast de afvang van CO₂ boekhoudkundig ook mag gerekend worden met een besparing van $\frac{1}{2}$ ton CO₂ per ton methanol. Bij de resultaten bekijken we scenario's waar deze boekhoudkundige correctie al dan niet wordt toegepast.

Bij de productie van olefinen hebben we een gelijkaardig "probleem". De verhouding waarin ethyleen en propyleen worden geproduceerd is verschillend bij nafta krakers, FT synthese en MTO, waarbij bij de alternatieve productiemethodes een overmaat aan propyleen wordt geproduceerd. Als we dit overschot niet valoriseren zouden we de alternatieve productiewijzen sterk benadelen. Daarom nemen we aan dat dit overschot aan marktprijzen kan verkocht worden. Analoog als bij methanol reken we hier al dan niet met een boekhoudkundige correctie van 1 ton CO₂/ton propyleen. Dit cijfer is bediscussieerbaar omdat het gebaseerd op is op een arbitraire allocatie van de emissies van naftakrakers aan de verschillende outputproducten.

3.1.3. TECHNOLOGIEKENMERKEN (ST-IT)

Naast de technologiekenmerken die in Tabel 2 worden weergegeven hebben we een tweede set van technologiekenmerken gedefinieerd met meer optimistische aannames. (Zie Tabel 3)

Rechtstreekse productie van waterstof met zonenergie heeft het potentieel om de kost van de waterstof sterk te reduceren. De technologie werd ontwikkeld aan de KU Leuven. De aannames over de investeringskosten zijn echter arbitrair.

Voor de Microgolf-plasma-technologie hebben we twee varianten opgenomen. In de eerste variant stijgt de efficiëntie: het elektriciteitsverbruik daalt van 49GJ naar 30 GJ/ton CO. In de tweede variant blijft de efficiëntie van de technologie ongewijzigd maar wordt de investeringskost verlaagd.

Voor de synthese van methanol hebben we een variant ingevoerd met verlaagde investeringskosten.

Ten slotte hebben we aangenomen dat de efficiëntie van de elektrolyse van waterstof zou kunnen verbeteren.

3.1.4. ZONNESTRALING (S)

Tenslotte hebben we twee scenario's ontwikkeld waarbij we het zonprofiel hebben gewijzigd. Hierbij zijn we uitgegaan van zonprofiel in Spanje. Dit is uiteraard een louter theoretische oefening zonder

² We hebben voor deze optie gekozen omdat in België geen methanol wordt geproduceerd op industriële schaal.

³ Voor een correcte CO₂ verrekening gebruiken we een marktprijs voor methanol en niet voor bio-methanol.

enige realiteitswaarde. Ze is bedoeld als illustratie van het risico dat een overgang naar een koolstofarme economie, gebaseerd op intermitterende energiebronnen, een impact kan hebben op de lokalisatie van de industriële activiteiten. Eenzelfde zonnepaneel wekt in Spanje immers twee maal zoveel elektriciteit op als bij ons, en dat door een grotere intensiteit van de zonnestraling, maar tevens door het groter aantal uren zonneschijn, waardoor de operationele condities veel gunstiger zijn.

3.1.5. OVERZICHT VAN DE SCENARIO'S

In Tabel 5 worden de scenario's samengevat die in een 80% reductie en in een 90% reductie variant werden uitgerekend. Het ST-CCU-ACC scenario met 80 % reductie beschouwen we als een centraal scenario, waarvan de resultaten in het volgende hoofdstuk in meer detail worden besproken.

Tabel 5: Definitie van de scenario's

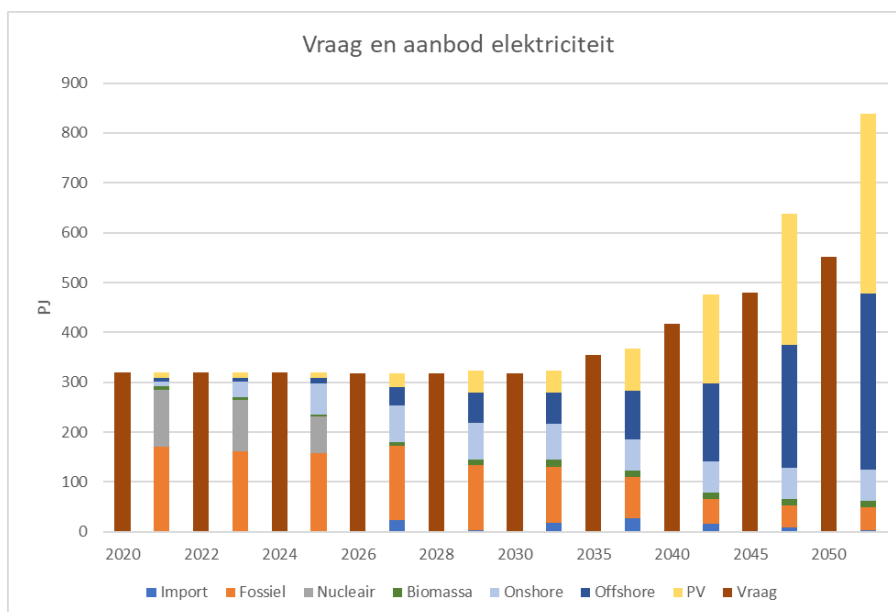
| | NO_CCU | ST-CCU | ST-CCU-ACC | IT-CCU-ACC | IT-CCU-ACC-S |
|---------------------------|--------|--------|------------|------------|--------------|
| Standaard technologieset | | X | X | X | X |
| Boekhoudkundige correctie | | | X | X | X |
| Verbeterde technologieset | | | | X | X |
| Spaans zonprofiel | | | | | X |

HOOFDSTUK 4. RESULTATEN

4.1. BESPREKING VAN HET CENTRAAL SCENARIO

4.1.1. ELEKTRICITEITSPRODUCTIE

De exogene vraag en de productie van elektriciteit, die ook de endogene vraag afdekt, worden in Figuur 4 weergegeven. De endogene component omvat de stroom voor de CCU waardeketen alsook voor de productie van warmte die oorspronkelijk met WKK installaties wordt opgewekt. Zonnepanelen en offshore windenergie zijn de belangrijkste productie technologieën. In het model wordt onshore wind energie beperkt door ruimtelijke omstandigheden. Verder is er nog een klein aandeel biomassa. Het betreft hier lokaal en duurzaam geproduceerde biomassastromen.

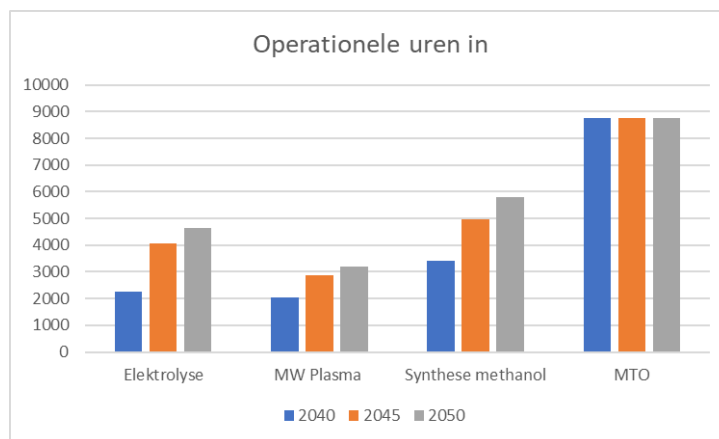


Figuur 4: Elektriciteitsproductie in het 80% ST-CCU-ACC scenario

In 2050 wordt de stroom hoofdzakelijk geproduceerd door 106 GW zonnepanelen, wat 3.5 % van de beschikbare oppervlakte zou opeisen, 30 GW offshore windinstallaties en 9 GW onshore wind installaties. Er zijn ook nog 15 GW gasinstallaties, waarvan 10 GW met open cyclus (gasturbines) en 5 GW Steg installaties. Korte termijn opslag in batterijen blijkt ook belangrijk te zijn. In 2050 zou er een opgestelde capaciteit staan van 0.4 PJ (wat overeen komt met de opslagcapaciteit van 1.4 miljoen Tesla's). Lange termijn opslag van elektriciteit via de waterstof cyclus komt niet voor in dit scenario. Deze functie wordt overgenomen door de CCU waardeketen. De opslagcapaciteit voor methanol bedraagt in 2050, 0.73 Mton. In energietermen uitgedrukt geeft dit 16 PJ.

4.1.2. INTEGRATIE VAN DE CCU WAARDEKETEN

Het model zoekt een delicaat evenwicht tussen investeren in opslagfaciliteiten in verschillende stadia en investeren in productiecapaciteiten. Dit evenwicht resulteert in operationele uren voor de verschillende technologieën in de CCU waardeketen. Figuur 5 illustreert de operationele uren in het 80% ST-CCU-ACC scenario en Tabel 6 geeft de productiecapaciteiten van dit scenario. Deze figuur geeft een representatief beeld voor de andere scenario's. De MW plasma technologie is een technologie met beperkte investeringskosten wat zich vertaalt in beperkte operationele uren. De variabiliteit van het elektriciteitsaanbod van intermitterende energiebronnen wordt in deze technologie maximaal gevaloriseerd. De elektrolyse gebruikt ook veel elektriciteit, maar door de hogere investeringskosten wordt toch geopteerd voor meer draaiuren. Bij de synthese van methanol speelt de elektriciteitsprijs een marginale rol. De operationele uren worden eerder bepaald door het aanbod van CO en H₂. De productie van olefinen profiteert dan weer van de goedkope opslagmogelijkheden van methanol. Hierdoor kan bespaard worden op de productiecapaciteiten. Om die reden is methanol dan ook een zeer aantrekkelijk intermediair product.



Figuur 5: Operationele uren in het 80% ST-CCU ACC scenario

Tabel 6: Productiecapaciteiten van de CCU waardeketen

| Capaciteiten | Unit | 2040 | 2045 | 2050 |
|-------------------|---------------|------|------|------|
| Elektrolyse | GW | 1.25 | 2.42 | 4.30 |
| MW Plasma | Mton CO | 2.01 | 5.22 | 9.60 |
| Synthese methanol | Mton methanol | 1.39 | 3.48 | 6.03 |
| MTO | Mton methanol | 0.54 | 1.97 | 4.00 |

4.1.3. SOCIO ECONOMISCHE KENMERKEN

In het centraal scenario wordt over een periode van 30 jaar (2020-2050) een globale uitstootvermindering gerealiseerd van 910 Miljoen ton CO₂. De gemiddelde kostprijs bedraagt 120 EUR /ton CO₂. De additionele kost t.o.v. een BAU scenario loopt op tot 7.3 miljard EUR per jaar in 2050. Gerekend met een gemiddelde groei van 1% per jaar zou dit betekenen dat de additionele kosten van het low carbon scenario in 2050, 1.26 % van het bruto nationaal product zouden

bedragen. Dit lijkt niet onoverkomelijk maar het veronderstelt wel dat er vanaf nu jaarlijks gemiddeld 6 miljard wordt geïnvesteerd, eerst in hernieuwbare energie en in een latere fase ook in de ontwikkeling van de CCU waardeketen.

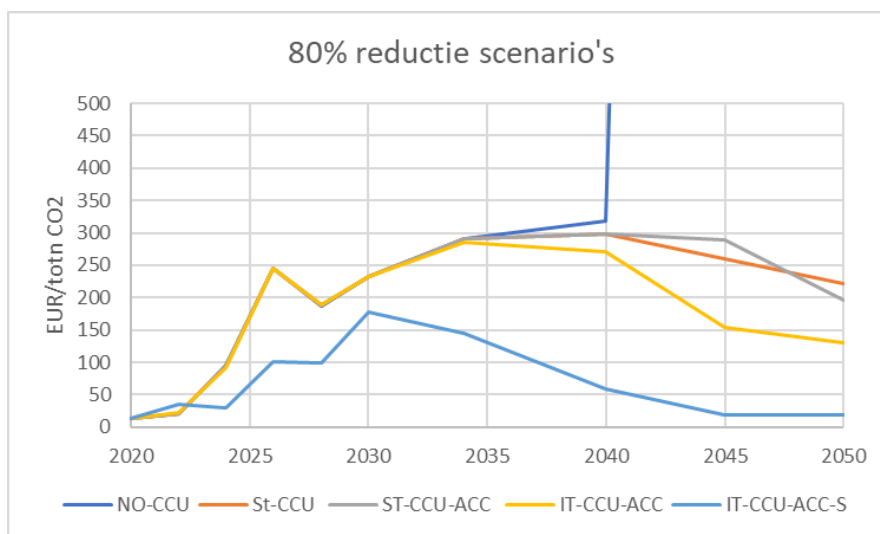
4.2. MARGINALE CO₂ PRIJS IN ALLE SCENARIO'S

De elektriciteitssector kan in alle scenario's in principe CO₂ vrij functioneren als er maar voldoende wordt geïnvesteerd in opslagcapaciteiten. Zonder CCU technieken zijn er in het model echter geen alternatieven voor de cementindustrie en voor de productie van olefinen en is er slechts een beperkte reductie mogelijk in de staalsector. Dat is niet voldoende om het 80% reductie te realiseren. De marginale CO₂ prijs gaat daardoor in 2040 naar oneindig.

Verder valt op dat de CO₂ prijs in alle andere scenario's na 2040 daalt. Het effect van de leercurven is blijkbaar sterker dat de bijkomende reductie die tussen 2040 en 2050 moet gerealiseerd worden. De boekhoudkundige correctie blijkt in eerste instantie weinig impact te hebben op de marginale CO₂ prijs. Dit komt omdat er vrijwel geen methanol of propyleen wordt verhandeld op de markt.

De impact van verbeterde technologieën heeft wel een significante impact. Vanaf 2040 zien we meer CCU activiteiten en daalt de marginale CO₂ prijs tot € 150 per ton in 2045. In dit scenario wordt er wel propyleen verhandeld en heeft de boekhoudkundige correctie wel een impact.

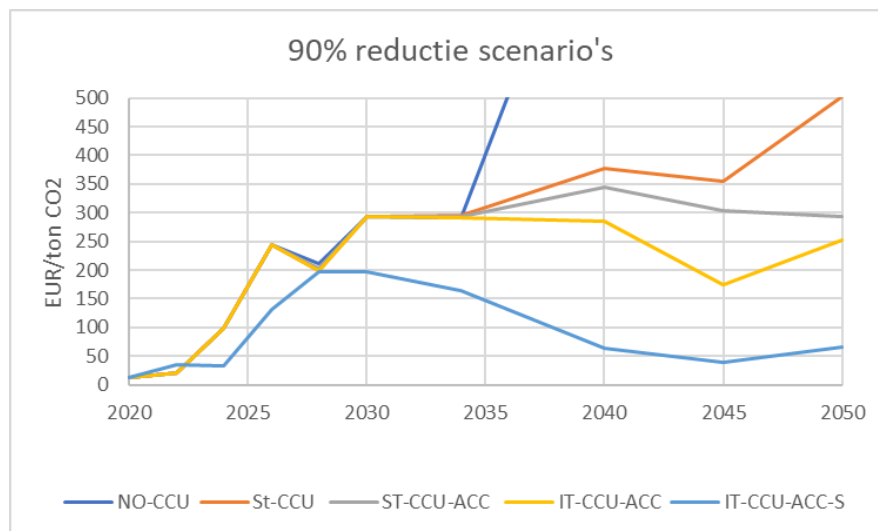
Tenslotte valt op hoe groot de impact is van het zonneprofiel. De CO₂ prijs daalt in 2045 tot €18 per ton. Dat wil zeggen dat die CCU keten onder die omstandigheden competitief zou zijn bij de huidige ETS prijzen. Anderzijds moeten we ook stellen dat er nog steeds een CO₂ prijs is, d.w.z. ondanks alle leercurven de CCU technologieën nog steeds een duwtje moeten krijgen om competitief te zijn tegenover de traditionele productiewijzen.



Figuur 6: Marginale CO₂ prijs in 80% reductie scenario's

De 90% reductie scenario's geven een ander beeld. De boekhoudkundige correctie geeft nu wel een significant voordeel. De marginale CO₂ prijs zakt in 2050 immers van €500 per ton tot €300 per ton.

Nadere analyse van de resultaten leert ons echter dat de CO₂ prijs in het st-CCU scenario niet wordt bepaald door de CCU waardeketen, maar eerder door een gebrek eraan. De goedkopere industriële CO₂ bronnen in het model zijn dan volledig uitgeput. Er moet beroep worden gedaan op het veel duurdere DAC. Bovendien zijn de meest rendabele valorisatiemogelijkheden uitgeput. De vraag naar ethyleen en propyleen zijn volledig ingevuld. Het surplus aan propyleen wordt aan marktprijzen verkocht. Maar voor ethyleen zijn er geen andere valorisatiemogelijkheden. Deze limieten spelen uiteraard ook in de andere 90% reductie scenario's.



Figuur 7: Marginale CO₂ prijs bij 90 % reductie scenario's

Om die reden menen we dat de 80% reductie scenario's een betere inschatting geven van het potentieel om CCU technologieën in te zetten. In 2050 vinden we dan een CO₂ prijs van ongeveer €200/ton CO₂ met de standard technologiekenmerken en €135/ton CO₂ met de meer optimistische technologiekenmerken.

De scenario's met het Spaanse zonprofiel roepen een aantal vragen op. Goedkope hernieuwbare elektriciteit is de sleutel tot een succesvolle implementatie van de CCU waardeketen en waar die aanwezig is zullen de nieuwe activiteiten zich gemakkelijker ontwikkelen.

HOOFDSTUK 5. **BESLUIT**

Het objectief van deze studie was om te onderzoeken of de microgolf Plasma technologie in een CCU waardeketen een bijdrage kan leveren tot het realiseren van een low carbon scenario en de integratie van massale hoeveelheden intermitterende hernieuwbare energie. Daarvoor werd in een TIMES omgeving een optimalisatiemodel ontwikkeld met een hoge tijdsresolutie waarin de variabiliteit van het hernieuwbare energieaanbod goed wordt voorgesteld. Met dat model werden dan scenario's ontwikkeld die ons meer inzichten verschaffen. Deze scenario's hebben enkel een analytische waarde, geen voorspellende. Daarvoor is de wereld veel te veel in verandering. De technologische evolutie staat niet stil. Nieuwe denkrichtingen en technologieën zullen een bijdrage leveren in de bestrijding van de klimaatopwarming. Bovendien zijn er andere opties die in het model niet mee geëvalueerd werden: de energie-efficiëntie kan wellicht nog beter, andere hernieuwbare energiebronnen, zoals (diepe) geothermie kunnen aangewend worden.

Niettemin blijkt uit de scenario's dat de ontwikkeling van een CCU waardeketen een belangrijke bijdrage kan leveren tot het realiseren van een low-carbon scenario. Op basis van deze scenario's schatten we de marginale kostprijs die via een CCU waardeketen kan gerealiseerd worden in de orde van grootte €135-€200/ton CO₂. Deze cijfers gelden voor de specifieke Belgische context, die o.i. in weinig verschilt van de Nederlandse context. Goedkope hernieuwbare energie blijkt een cruciale parameter.

Voor de ontwikkeling van een CCU waardeketen kunnen ook enkele adviezen geformuleerd worden. De belangrijkste kostencomponenten zijn het afvangen van CO₂ en de energiekost om een CO₂ molecule op te breken. Naast energetische toepassingen kunnen ook niet-energetische toepassingen worden bekeken waarbij de molecule niet wordt opgebroken.

De keuze van het eindproduct heeft een belangrijke impact op de marginale CO₂ prijs. Een win-win situatie kan ontstaan met een selectie van eindproducten waarvan de productie op fossiele wijze gepaard gaat met een significante CO₂ uitstoot. In die zin lijkt power to gas niet de beste keuze.

Vloeibare producten hebben het voordeel dat ze gemakkelijk kunnen gestockeerd worden. Dat is een aantrekkelijke kenmerk als producten voor een langere periode moeten opgeslagen worden. De CCU waardeketen zal wellicht geen grote rol spelen in het overbruggen van dag-nacht cyclus. Daarvoor bestaan er andere oplossingen, zoals opslag in batterijen. De CCU waardeketen kan daarentegen wel een belangrijk rol spelen in het overwinnen van de zomer-winter cyclus als alternatief op seizoensopslag voor elektriciteit.

LITERATUURLIJST

Unites States Patent Application Publication, US 2014/0128486, date May 8, 2014

Rodrigues, N., Murillo, R., Abanades, J.C., CO₂ capture from cement Plants using oxyfired precalcination and/or calcium looping, *Environmental Science and Technology* (2012), 46, 2460-2466

Van Rooij, G.J., Akse, H.N., Bongers, W.A. & Van De Sanden, M.C.M. (2018) Plasma for elektrification of chemical industry: a case study on CO₂ reduction. *Plasma Physics and Contolled Fusion*, 60(1), 1-7. [014019]

Barker, D.J., Turner, S.A., Napier-Moore, P.A., Clark M., Davison, J.E., CO₂ capture in the Cement Industry, *Energy Procedia* 1 (2009) 87-94

Roussanaly, S., Fu, C., Voldsund, M., Anantharaman, R., Spinelli, M. & Romano M., Techno-economic analysis of MEA CO₂ capture from a cement kiln – impact of steam supply scenario, *Energy Procedia* 114 (2017) 6229-6239

HELMETH: Integrated High Temperature Electrolysis and Methanation for effective power to gas conversion, Project proceedings <http://www.hemeth.eu/index.php/technologies/high-temperature-electrolysis-cell-soec>

Boulamanti, A., Moya, J.A., Production costs of the chemical industry in the EU and other countries : Ammonia, methanol and light olefins, *Renewable and sustainable energy reviews* 68 (2017) 1205-1212

Ren, T., Patel, M.K., Blok, K., Steam cracking amd methane to olefins: Energy use, CO₂ emissions and production costs, *Energy* 33 (2008) 817-833

Pérez-Fortes, M., Schöneberger, J.C. Boulamanti, A., Tzimas, E., Methanol syntheis using captured CO₂ as raw material : Techno-economic and environmental assessment, *Applied Energy* 161 (2016) 718-732

Aninic, B., Gorianec, D., Comparision between two methods of methanol production from carbon dioxide, *Energy* 77 (2014) 279-289

Jarvis, S.M., Samsatli, S., Tecnologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 85 (2018) 46-68

Poncelet, K., Höschle, H., Delarue, E., Virag, A., D'Haeseleer, W., Selecting representative days for capturing the implications of integrating intermittent renewables in generation expansion planning models, *IEEE transactions on power systems*