

DE CHEMISCHE WEG NAAR EEN CO₂-NEUTRALE WERELD

Johan Martens (e.a.)



Koninklijke Vlaamse Academie van België
voor Wetenschappen en Kunsten, 2015
Standpunten 39

De chemische weg naar een CO₂-neutrale wereld



KVAB Press

Uitgaven
van
de Koninklijke
Vlaamse Academie
van België
voor
Wetenschappen
en Kunsten

Standpunten nr. 39



KVAB Press

Hertogsstraat 1
1000 Brussel
Tel. 02 550 23 23
Fax 02 550 23 25
www.kvab.be
info@kvab.be



De chemische weg naar een CO₂-neutrale wereld

Johan Martens
Annemie Bogaerts
Norbert De Kimpe
Pierre Jacobs
Guy Marin
Korneel Rabaey
Mark Saeys
Sebastian Verhelst

De publicatie van dit Standpunt werd goedgekeurd door de Klasse Natuurwetenschappen op 4 november 2015.

Gedeeltelijke reproductie is toegelaten mits uitdrukkelijke bronvermelding.

© Copyright 2015 KVAB
D/2015/0455/14
ISBN 978 90 6569 158 3

Partial reproduction is permitted provided the source is mentioned.

Foto en ontwerp cover: Anne-Mie Van Kerckhoven

DE CHEMISCHE WEG NAAR EEN CO₂-NEUTRALE WERELD

INHOUDSOPGAVE

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Samenvatting | 2 |
| 2 | Executive summary | 4 |
| 3 | Het probleem: stijgende CO ₂ -concentratie in de atmosfeer eerder dan uitputting van fossiele brandstofreserves | 6 |
| 4 | Hoe kan CO ₂ -accumulatie in de atmosfeer tegengegaan worden? | 11 |
| 5 | De CO ₂ -problematiek is een timingprobleem | 19 |
| 6 | De huidige koolstofeconomie. | 25 |
| 7 | Naar een CO ₂ -neutrale wereld met een gemengde koolstof-waterstof-economie | 29 |
| 8 | Technologie voor grootschalige CO ₂ -omzetting aan puntbronnen. | 35 |
| 9 | Conclusies en aanbevelingen. | 40 |
| | Samenstelling van de werkgroep | 43 |
| | Dankwoord | 43 |

1 Samenvatting

Het chemisch element koolstof (C) is een bouwsteen van het leven. Het is van wezenlijk belang in de energievoorziening, de technologie en in alle materiële dingen die de mens produceert en verbruikt. Onze maatschappij functioneert volgens een koolstofeconomie. Het merendeel van voor de mens bruikbare koolstofverbindingen zijn afkomstig van kooldioxide (CO₂) dat door fotosynthese wordt ingebouwd in biomassa. Op een geologische tijdschaal werd fossiele biomassa omgezet tot steenkool, aardolie en aardgas. Op het eind van hun levenscyclus worden de koolstofatomen in door de mens geproduceerde goederen terug vrijgezet onder vorm van CO₂ dat in de atmosfeer terecht komt. De excessieve CO₂-emissie door antropogene activiteit is in zijn essentie een timingprobleem dat zijn meest extreme vorm aanneemt bij het aanwenden van fossiele brandstoffen voor het opwekken van energie. Fossiele koolstofverbindingen waarvan de vorming miljoenen jaren in beslag nam, worden in elektriciteitscentrales en verbrandingsmotoren in milliseconden omgezet tot CO₂ dat in de atmosfeer wordt geloosd. De natuurlijke CO₂-captatiemechanismen werken te traag om de stijgende CO₂-emissie te compenseren. De levensnoodzakelijke transitie naar CO₂-neutrale menselijke activiteit op aarde brengt dan ook enorme wetenschappelijke en technologische uitdagingen met zich mee. De huidige generatie staat voor de verpletterende verantwoordelijkheid om niet alleen de stijging van de CO₂-concentratie in de atmosfeer een halt toe te roepen, maar ook om deze tot een lager, aanvaardbaar niveau terug te dringen teneinde de door broeikasgassen veroorzaakte klimaatverandering te beperken. Er zijn meerdere scenario's die een mogelijke oplossing bieden voor het terugdringen van de CO₂-uitstoot. De Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten wil de stem van de chemie in dit debat laten horen en aangeven welke realistische oplossingen de chemie kan aanbieden.

Omwille van zijn essentiële rol zal het chemisch element koolstof een prominente plaats blijven innemen in de economie. Eerder dan het bannen van koolstof is het streefdoel om binnen afzienbare tijd een CO₂-neutrale wereld te realiseren. In dit KVAB-Standpunt is een weg uitgetekend om dit doel te bereiken. Tevens worden gangbare misvattingen weerlegd. Het complex probleem van de stijgende CO₂-concentraties in de atmosfeer wordt herleid tot zijn essentie om oplossingen te kunnen vinden.

De CO₂-uitstoot is verdeeld over puntbronnen en diffuse bronnen, elk verantwoordelijk voor ongeveer de helft van de uitstoot.

Puntbronnen zijn de schouwen van grote installaties zoals elektriciteitscentrales, raffinaderijen, hoogovens, cementovens en verbrandingsovens, waarvan er een 220-tal in Vlaanderen zijn. Het afvangen van CO₂ aan deze puntbronnen en de omzetting van deze CO₂ tot brandstoffen, chemicaliën en materialen met snelle

katalytische processen wordt technisch mogelijk. Enkele ontluikende technologieën werden reeds op industriële schaal gedemonstreerd. Andere bevinden zich nog op laboratorium- of pilotschaal. Hun implementatie kan worden gerealiseerd in een tijdsvenster van 5 tot 20 jaar mits de nodige investering in wetenschappelijk onderzoek en ontwikkeling. De massale hoeveelheden energie nodig voor deze processen van afvang en omzetting van CO₂ dienen te komen van lage-koolstof energiebronnen, en voornamelijk van de zon. Getijdenenergie, geothermische energie of kernenergie komen eveneens in aanmerking. Synthetisch methaangas, dat uit CO₂ en waterstofgas kan worden aangemaakt, is een aantrekkelijke regenerereerbare energiedrager met een reeds bestaand distributiesysteem. Methanol biedt voordelen als vloeibare brandstof en is tevens een bouwsteen voor de chemische industrie, vermits hieruit via katalyse tal van chemicaliën en kunststoffen kunnen geproduceerd worden.

De CO₂-uitstoot door diffuse bronnen is daarentegen een moeilijk op te lossen probleem, en vooral de CO₂-uitstoot door het vervoer op de weg, over water en in de lucht, waarvoor technologische doorbraken voor CO₂-captatie ontbreken. Het bannen van koolstof uit de volledige energievoorziening van de mensheid is met de huidige technologische kennis onmogelijk, maar een overstap naar een gemengde koolstof-waterstofeconomie kan de CO₂-uitstoot door de transportsector aanzienlijk beperken. De levenscyclus van de waterstofatomen in chemische verbindingen eindigt met de vorming van water, wat geen bedreiging vormt.

*"In the long history of the world, only a few generations have been granted the role of defending human life (freedom) in its hour of maximum danger.
I do not shrink from this responsibility - I welcome it."*

Deze bekende uitspraak van John F. Kennedy uit zijn inaugurale rede als president van de Verenigde Staten van Amerika (1961) kan hier passend worden aangehaald, gezien de bedreiging voor de mensheid. Destijds was het de vrijheid die werd bedreigd. De huidige en de volgende generatie kan niet om het CO₂-probleem heen en dient zich verantwoordelijk op te stellen.

2 Executive summary

The chemical element carbon (C) is a building block of life. It is essential for energy supply, technology and all things produced and consumed by man. The global society has a "carbon economy". The majority of useful carbon compounds emanate from carbon dioxide (CO₂), once incorporated into biomass via photosynthesis. On a geological time scale, fossil biomass was converted to coal, oil and natural gas. At the end of their life cycle, the carbon atoms inside man-made goods are put back in the form of CO₂ that ends up in the atmosphere. The excessive CO₂ emissions by anthropogenic activity is in fact a timing issue. It takes its most extreme form in the use of fossil fuels to generate energy. Fossil carbon compounds whose formation took up millions of years, are converted in milliseconds into CO₂, discharged into the atmosphere. The natural CO₂ capture mechanisms work too slowly to compensate for rising CO₂ emissions. The indispensable transition to CO₂-neutral human activity on earth involves tremendous scientific and technological challenges. The current generation has the overwhelming responsibility to not only stop the ongoing increase in CO₂ concentration in the atmosphere, but also to reduce it to a lower acceptable level in order to restrain climate change caused by greenhouse gases. There are several scenarios that offer a possible solution to reducing CO₂ emissions. The Royal Flemish Academy of Belgium for Science and the Arts offers the voice of the chemical sciences in this debate and tries to identify realistic chemical solutions.

Because of its vital role the chemical element carbon will keep its prominent place in the economy. Rather than to eliminate carbon, the objective is to realize a CO₂-neutral world within the foreseeable future. In this position paper, a path towards this goal is proposed. Common misconceptions are refuted. The complex problem of rising CO₂ concentrations in the atmosphere is reduced to its scientific essence in order to find solutions.

CO₂ emissions can be divided in those from point sources and diffuse sources, each responsible for about half the emissions.

Point sources are the chimneys of large installations such as power plants, refineries, blast furnaces, cement kilns and incinerators, of which there exist about 220 in Flanders. The capture of CO₂ from point sources and the conversion of this CO₂ to fuels, chemicals and materials with fast catalytic processes is becoming technically possible. Some emerging technologies are already being demonstrated on an industrial scale. Others are still at laboratory or pilot scale. Their implementation can be realized in a time window ranging from 5 to 20 years, subject to the necessary investment in scientific research and development. The massive amounts of energy needed for these processes of capture and conversion of CO₂ must come from low-carbon energy sources, mainly from the sun, but also from tidal energy, geothermal energy or nuclear energy. Synthetic methane gas,

that can be formed from CO₂ and hydrogen gas, is an attractive renewable energy source for which a distribution system currently exists. Methanol offers advantages as a liquid fuel and is also a building block for the chemical industry, as via catalysis numerous chemicals and plastics can be produced.

CO₂ emissions from diffuse sources on the other hand are a difficult problem, and CO₂ emissions from transport by road, water and air are so in particular. Technological breakthroughs for CO₂ capture are missing for these sources. It is impossible to ban carbon from the entire energy supply of mankind with the current technological knowledge, but a transition to a mixed carbon / hydrogen economy can reduce CO₂ emissions by the transport sector significantly. The life cycle of the hydrogen atoms in chemical compounds ends up with the formation of water, which is not a threat.

"In the long history of the world, only a few generations have been granted the role of defending human life (freedom) in its hour of maximum danger.

I do not shrink from this responsibility - I welcome it."

This famous statement by John F. Kennedy in his inaugural speech as president of the United States of America (1961) can be appropriately cited here, given the threat to humanity. Back then it was freedom being threatened. The current and the next generation cannot ignore the CO₂ problem and should take up a responsible attitude.

3 Het probleem: stijgende CO₂-concentratie in de atmosfeer eerder dan uitputting van fossiele brandstofreserves

De immense voorraden fossiele koolstof

Het chemisch element koolstof (afgekort als C; Engels: *carbon*) komt op aarde voor in verschillende vormen (**Kader 1**).¹ Het overgrote deel van de koolstof is geoxideerd, d.w.z. gebonden aan zuurstofatomen. Vast calciumcarbonaat (CaCO₃) is veruit de meest voorkomende vorm van koolstof en wordt vooral gevonden in kalksteen, marmer, arduin en skeletten van mariene organismen. Carbonaten zijn gedeeltelijk oplosbaar in water als bicarbonaat (HCO₃⁻), waardoor de oceanen het

| <u>Volledig geoxideerde koolstof</u> | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| In gesteenten (carbonaten) | 28.400.000 | |
| Opgelost bicarbonaat in de oceanen | 38.000 | |
| CO ₂ in de atmosfeer | 830 | |
| <u>Partieel geoxideerde koolstof (biomassa)</u> | | |
| Bodem | 1.500-2.400 | |
| Permafrost | 1.700 | |
| Mariene organismen & opgeloste organische stof | 700 | |
| Landvegetatie | 350-550 | |
| <u>Gereduceerde koolstof</u> | | |
| | <u>Reserves^a</u> | <u>Voorraden^b</u> |
| Aardolie | 98-152 | 88-123 |
| Teerzanden en schalie-olie | 75-112 | 226-297 |
| Aardgas | 76-108 | 110-136 |
| Schaliegas | 307-1.026 | 614-1.863 |
| Methaanhydraten | | 500-2.500 |
| Steenkool | 446-542 | 7.510-11.230 |
| ^a Reserves: winning is mogelijk met de huidige technologie en is economisch rendabel | | |
| ^b Voorraden: nog niet ontginbaar of ontginning nog niet economisch rendabel | | |
| Bronnen: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ ; International Energy Agency - World Energy Outlook 2014 | | |

Kader 1: Schatting van de hoeveelheden koolstof in verschillende verbindingen op aarde (in Gt C)²

¹ <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

² 1 Gt = 10⁹ t = 1 miljard ton.

tweede belangrijkste reservoir van carbonaten zijn. Het gasvormig koolstofdioxide (CO_2) vertegenwoordigt een veel kleinere hoeveelheid koolstof. CO_2 -gas in de atmosfeer lost gedeeltelijk op in water als koolzuur (H_2CO_3). Dissociatie van koolzuur in licht alkalisch oceaانwater vormt bicarbonaat (HCO_3^-).

Plantaardig leven op aarde slaagt erin geoxideerde koolstof zoals CO_2 te reduceren. Door fotosynthese wordt dankzij zonne-energie en gekatalyseerd door bladgroen (chlorofyl), CO_2 en water omgezet tot biomassa, voorgesteld met de brutoformule van koolhydraten, $(\text{CH}_2\text{O})_n$. Fossiele biomassa, die in de voorbije 2 miljard jaar in sedimenten terecht kwam, onderging onder invloed van verhoogde temperatuur en druk een verdere chemische reductie tot steenkool (koolstof in zijn elementaire vorm) en koolwaterstoffen, $(\text{CH}_x)_n$, zoals aardolie, schalie-olie en teerzanden, aardgas, schaliegas en methaanhydraten. Zuurstofatomen, gevormd door biologische reductie van CO_2 , accumuleerden als moleculaire zuurstof (O_2) in de atmosfeer. Zo werd de oorspronkelijk CO_2 -rijke aardatmosfeer geleidelijk omgezet tot gehalten die bij het begin van de industriële revolutie (tweede helft 18^{de} eeuw) overeenkwamen met 300 ppm³ CO_2 en 21 % (= 210.000 ppm) O_2 .

Onze huidige hoogtechnologische maatschappij heeft zijn succes te danken aan de aanwezigheid en consumptie van massale hoeveelheden toegankelijke en goedkope energiebronnen, met name fossiele brandstoffen. Voor aardolie wordt al decennialang gewaarschuwd voor een dreigend tekort. Uitgaande van het huidig verbruik en de gekende reserves is er nog voldoende aardolie voor ongeveer 50 jaar. Voor aardgas en steenkool is dit respectievelijk 55 en 110 jaar.⁴ Ofschoon de meeste gekende aardolie- en aardgasvelden vandaag ontgonnen worden blijft exploratie nog steeds een hoofdactiviteit van olie- en gasmaatschappijen en worden regelmatig nog nieuwe reservoirs ontdekt. Door technologische innovatie kunnen olievelden die vroeger ontoegankelijk waren, zoals in diepzee en arctisch gebied, nu wel in gebruik worden genomen. Bestaande velden worden efficiënter geëxploiteerd, wat de beschikbare reserves doet stijgen.

Belangrijk is echter dat ook nieuwe vormen van fossiele koolwaterstofvoorraden worden aangesproken. Een frappant voorbeeld is de snelle opmars van schaliegas in de Verenigde Staten van Amerika (VSA). Dit soort aardgas dat zich in het moedergesteente bevindt, wordt ontsloten door hydraulisch fragmenteren ("fraccen") van het gesteente met geavanceerde boormethoden. In 2012 was reeds 40 % van het aardgas in de VSA afkomstig van schalie.⁵ De productiemethode via fraccen wordt gezien als de drager van de energierevolutie in de VSA. Ze is

³ ppm = parts per million; 1 ppm = 1 per 1 miljoen aanwezige moleculen.

⁴ <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.

⁵ <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>.

evenwel omstreden omwille van de negatieve impact op het milieu. Een ander voorbeeld van nog onontgonnen fossiele brandstof betreft methaanhydraten, ook gekend als methaanijs.⁶ Hierin zijn methaanmoleculen individueel ingekapseld in een mantel van watermoleculen. Enorme methaan(ijs)reserves liggen op de oceaانبodem en in en onder de permafrost, in hoeveelheden groter dan het methaan aanwezig in alle aardgasvelden en schaliegas samen. Er wordt dan ook intens gezocht naar ontginningsmethoden.

De nakende uitputting van de fossiele koolstofbronnen wordt dikwijls aangehaald als argument voor de inzet van alternatieve energiebronnen zoals biomassa, windenergie en fotovoltaïsche zonnepanelen. De omvang van de beschikbare reserves verzwakt deze argumentatie. Het gecumuleerd verbruik van fossiele koolstof door de mens sinds het begin van de industriële revolutie bedraagt ca. 365 Gt, wat naargelang de geciteerde bron slechts één derde tot één zesde is van de actuele reserve (geschat op 1.000 tot 2.000 Gt), en slechts een kleine fractie omvat van de totale fossiele koolstofvoorraden (schattingen van 9.000 tot 16.000 Gt). Het is aldus een misvatting dat er uitputting dreigt van de fossiele brandstoffen.

Stijgende CO₂-concentratie in de atmosfeer

De natuur kent een natuurlijk captatiemechanisme voor CO₂: groene planten en kleinere levensvormen capteren CO₂ uit de lucht en zetten die om onder invloed van zonlicht – het proces van fotosynthese. Ook de oceanen nemen een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ op uit de atmosfeer. Door ademhaling van dierlijke organismen en celademhaling van planten wordt CO₂ weer vrijgezet in de atmosfeer. Deze vorming en captatie waren lang in een dynamisch evenwicht. Een stijgende menselijke activiteit resulteerde echter in een onevenwicht tussen CO₂-uitstoot en natuurlijke captatiemechanismen: dit dynamisch evenwicht werd verstoord door de verbranding van fossiele brandstoffen, veranderd landgebruik en ontleding van carbonaten zoals voor de productie van calciumoxide uit kalksteen in de cementindustrie. De atmosfeer bevat nu 240 Gt koolstof méér dan bij het begin van de industriële revolutie, en de CO₂-concentratie heeft de kaap van 400 ppm overschreden, een niveau dat in de laatste 450 miljoen jaar nooit eerder werd bereikt. De verhoogde CO₂-concentratie in de atmosfeer is een wereldwijd fenomeen. In tegenstelling hiermee zijn fijn stof en ozon meer lokale luchtpolluenten. De specificiteit van de CO₂-problematiek ligt in de wijdverspreide emissie en de traagheid van de captatiemechanismen (voornamelijk oplossen in oceanen en fotosynthese) waardoor de turbulent gemengde luchtmassa wereldwijd een nagenoeg uniforme CO₂-concentratie vertoont.

⁶ <http://worldoceanreview.com/en/wor-1/energy/methane-hydrates/>.

Courante misvatting rond fossiele en hernieuwbare CO₂

CO₂ is een broeikasgas waarvan algemeen wordt aangenomen dat de stijgende concentratie ervan in belangrijke mate bijdraagt tot de opwarming van de aarde. Broeikasgassen in de atmosfeer absorberen warmtestraling van het aardoppervlak en zenden ze terug zoals de ramen dit doen in een broeikas. Buiten CO₂ vertonen ook verschillende andere gassen, waaronder methaan, lachgas, gefluoreerde koolwaterstoffen en ozon deze eigenschap. Zonder de aanwezigheid van broeikasgassen zou de oppervlaktetemperatuur van de aarde gemiddeld -18°C bedragen, en geen 14°C zoals nu. Broeikasgassen zijn dus onontbeerlijk voor het leven op onze aarde, en hun concentratie is zeer kritisch.

Los van alle mogelijke voorspellingen over de effecten van een stijgende CO₂-concentratie in de atmosfeer zou het van een gebrek aan verantwoordelijkheidszin getuigen om niets te ondernemen tegen deze CO₂-toename. Europa nam reeds verschillende bindende maatregelen voor bedrijven om de CO₂-uitstoot te verminderen (**Kader 2**).⁷ Op te merken valt dat niet alle CO₂-uitstoot door de

Het EU-ETS ("Emissions Trading System") is een emissieverhandelingsstelsel tussen Europese bedrijven. Het toepassingsgebied is bepaald in bijlage 1 van Richtlijn 2003/87/EG. Het is een zogenaamd "cap-and-trade"-stelsel: de totale uitstoot wordt beperkt door een emissieplafond ("cap"). In de periode 2013-2020 daalt deze met 1,74 % per jaar voor industriële installaties. De emissierechten zelf worden verhandeld op een markt ("trade"). Dit geeft bedrijven de optie om de emissies te reduceren of emissierechten aan te kopen. Bedrijven kunnen gratis emissierechten toebedeeld krijgen door de overheid.

In Europa vallen meer dan 11.000 installaties onder de richtlijn; in Vlaanderen gaat het om ongeveer 220 installaties (voornamelijk energieproductie en industriële installaties). In totaal valt circa 45 % van de Europese CO₂-uitstoot onder dit stelsel. De verbranding van biomassa is niet opgenomen in het toepassingsgebied.

Sinds 2012 is ook een plafond ingesteld voor de totale CO₂-emissie voor luchtvaartmaatschappijen binnen het EU-ETS stelsel. De 'cap' bedraagt 95% van de historische emissies. Daar waar initieel beoogd werd om dit toe te passen op alle vluchten die vertrekken of aankomen binnen de EU, is dit voor de periode 2013-2016 beperkt tot vluchten tussen en binnen de landen van de EU. Een eventuele uitbreiding van het stelsel vanaf 2017 zal in 2016 vastgelegd worden.

Ook voor de niet-ETS-sectoren (gebouwen, transport, ...) zijn er bindende reductiedoelen voor de lidstaten. Zo dient België voor deze sectoren tegen 2020 15 % minder CO₂ uit te stoten tegenover 2005.

Kader 2: CO₂-emissierechten

⁷ http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm.

wetgever op een gelijke basis wordt behandeld, en bijvoorbeeld CO₂-uitstoot door biomassaverbranding niet is opgenomen in de regelgeving. CO₂-moleculen zijn evenwel niet te onderscheiden volgens oorsprong, of het nu om fossiele of nieuwgevormde biomassa gaat, beide bronnen dragen bij aan het broeikaseffect.

CO₂-emissie en klimaatsverandering

Het Klimaatverdrag dat eind 2015 gesloten werd in Parijs stelt dat de temperatuurstijging op aarde beperkt dient te worden tot 2°C ten opzichte van het pre-industrieel tijdperk. Er dient gestreefd te worden naar een opwarming van 1,5°C. Het is de bedoeling om tegen het einde van de 21^{ste} eeuw de economieën niet langer te baseren op fossiele brandstoffen. Volgens het *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) mag de cumulatieve CO₂-uitstoot van 2000 tot 2050 wereldwijd niet meer zijn dan 1.100 Gt om de temperatuurstijging met 75 % zekerheid te beperken tot 2°C (**Kader 3**).⁸ Schattingen van de broeikasgasemissies geven aan dat jaarlijks ongeveer 50 Gt CO₂-equivalenten uitgestoten worden – dit omvat voor 70 % CO₂, en daarnaast ook methaan en andere door menselijke activiteit ontstane broeikasgassen. Indien geen ingrijpende acties worden ondernomen, zal de drempel van 1.100 Gt CO₂ reeds veel vroeger dan in 2050 overschreden worden. Ook dient rekening gehouden te worden met

| | Gt CO ₂ |
|--|--------------------|
| Totaal uitgestoten sinds Industriële Revolutie | 1.340 |
| Toegelaten nog uit te stoten hoeveelheid tot 2050 ^a | 1.100 |
| Toegelaten nog uit te stoten hoeveelheid tot 2100 ^a | 1.900 |
| Actuele jaarlijkse uitstoot – wereld | 50 ^b |
| Actuele jaarlijkse uitstoot – Vlaanderen | 0,076 ^b |
| Actuele jaarlijkse uitstoot van CO ₂ – wereld | 35 |
| Actuele jaarlijkse uitstoot van CO ₂ – Vlaanderen | 0,066 |

^a om met een waarschijnlijke kans onder een globale temperatuurstijging van 2 °C t.o.v. het pre-industriële tijdperk te blijven

^b Gt CO₂ equivalent: uitstoot van broeikasgassen waaronder CO₂, CH₄, N₂O, gefluoreerde koolwaterstoffen, uitgedrukt in CO₂-equivalent rekening houdend met het aardopwarmingspotentieel van de gassen

Bron: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.htm>,
<http://www.milieurapport.be/>

Kader 3: Uitstoot van broeikasgassen door menselijke activiteit

⁸ C. McGLADE, P. EKINS. *Nature* 517 (2015) 187–190.

de steeds stijgende energievraag. Voorspellingen geven aan dat de energiebehoefte tussen 2010 en 2040 met 56 % zal stijgen,⁹ voornamelijk te wijten aan de economische ontwikkeling buiten de EU en de VSA. Een schatting door BP geeft aan dat in een *Business as Usual* scenario de cumulatieve uitstoot 1.790 Gt zal bedragen, ver boven de vooropgestelde hoeveelheid.¹⁰

De toelaatbare emissie tot 2050 van 1.100 Gt CO₂ komt overeen met de verbranding van 300 Gt fossiele koolstof. Tot het jaar 2100 mag de uitstoot stijgen tot 1.900 Gt CO₂ of 520 Gt fossiele koolstof. De fossiele koolstofreserves zijn hiervoor ruimschoots voldoende, zelfs zonder de bijdrage van frackinggassen of andere nieuwe bronnen (**Kader 1**). Experts waarschuwen voor het gevaar van een "koolstofzeepbel". Immers, de waarde van beursgenoteerde bedrijven die fossiele brandstoffen ontginnen is mede gebaseerd op hun reserves. Een uitdoofscenario voor het gebruik van fossiele koolstofbronnen en een evolutie naar een koolstofvrije economie zou betekenen dat een groot deel van de fossiele koolstofreserves zijn economische waarde verliest. **Een koolstof-vrije economie is echter ondenkbaar gezien de enorme meerwaarde van op koolstof gebaseerde brandstoffen, chemicaliën en kunststofmaterialen.** Een CO₂-neutrale economie, die niet de vorming van CO₂ op zich maar wel het vrijstellen in de atmosfeer vermijdt, is een meer realistische doelstelling.

4 Hoe kan CO₂-accumulatie in de atmosfeer tegengegaan worden?

Om de CO₂-accumulatie in de atmosfeer een halt toe te roepen, zijn er twee categorieën van mogelijke maatregelen: deze die de CO₂-productie of -verspreiding pogen te verminderen en deze die de CO₂-absorptie proberen te versnellen. Verminderd energieverbruik leidt onmiddellijk tot een vermindering van de CO₂-productie. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door betere isolatie van gebouwen om de klimaatregelingskosten (verwarming en airconditioning) te drukken. Daarnaast dienen in toenemende mate alternatieve energiebronnen de fossiele koolstofhoudende bronnen te vervangen.

De transitie naar lage-CO₂-energievoorziening zal decennia in beslag nemen. De ontwikkeling en implementatie van technologie voor versnelde CO₂-absorptie en vermijden van CO₂-verspreiding is hoogstnoodzakelijk.

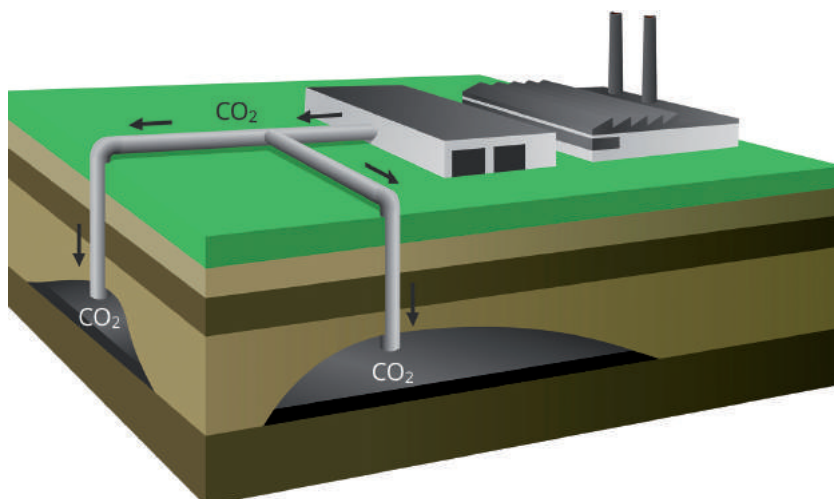
⁹ <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12251>.

¹⁰ BP Statistical Rev. of World Energy, 2012.

CO₂-sequestratie

CO₂-sequestratie omvat de afvang van CO₂ meteen na zijn vorming (captatie / *capture*) en opslag ervan, doorgaans in ondergrondse geologische reservoirs (*storage*) om verspreiding in de atmosfeer te voorkomen. Hiervoor worden vandaag reeds zogenaamde "Carbon Capture and Storage" (CCS) industriële installaties in gebruik genomen (**Kader 4**).

CCS: CO₂ gevormd in puntbronnen, wordt gecapteerd en opgeslagen in ondergrondse uitgeputte olie- en gas reservoirs



CCS-technologieën omvatten meestal het opslaan van CO₂ in ondergrondse lagen (bijvoorbeeld mijnen of reservoirs van voormalige aardoliewinning) na afscheiden van de overige rookgassen en compressie.

Kader 4: "Carbon Capture and Storage": een deel van de oplossing

CCS kan worden geïmplementeerd waar grote en geconcentreerde CO₂-emissies aanwezig zijn. De CO₂-uitstoot kan opgedeeld worden in enerzijds grote puntbronnen, zoals elektriciteitscentrales en industriële productiesites en anderzijds diffuse bronnen, zoals transport en klimaatregeling van gebouwen. Mondiaal (en ook in Vlaanderen) verloopt ongeveer de helft van de CO₂-uitstoot

| | |
|--|----|
| Uitstoot per sector - wereld | % |
| <i>Energie</i> | 26 |
| <i>Industrie</i> | 19 |
| <i>Bosbouw, landgebruik & landbouw</i> | 31 |
| <i>Transport</i> | 13 |
| <i>Gebouwen</i> | 8 |
| <i>Afval en afvalwater</i> | 3 |
| Uitstoot puntbronnen - wereld | 45 |
| Uitstoot diffuse bronnen - wereld | 55 |
| Uitstoot per sector - Vlaanderen | |
| <i>Energie</i> | 24 |
| <i>Industrie</i> | 27 |
| <i>Bosbouw, landgebruik & landbouw</i> | 5 |
| <i>Transport</i> | 21 |
| <i>Huishoudens</i> | 17 |
| <i>Handel & diensten</i> | 6 |
| Uitstoot puntbronnen - Vlaanderen | 51 |
| Uitstoot diffuse bronnen - Vlaanderen | 49 |

Bron: <https://www.vmm.be/publicaties/lozingen-in-de-lucht-2000-2013>; IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pagina 123

Kader 5: Uitstoot van broeikasgassen per sector en aandeel van puntbronnen en diffuse bronnen (%)

via puntbronnen (**Kader 5**). Dit aandeel neemt echter langzaam af ten opzichte van kleine, diffuse bronnen. Dit is voornamelijk te wijten aan de impact van de klimaatregeling van gebouwen en de transportsector. Het IPCC wijst erop dat er wereldwijd méér dan 7.500 "grote puntbronnen" zijn, met een uitstoot van elk meer dan honderdduizend ton CO₂ per jaar. Hiervan is 80 % afkomstig van elektriciteitscentrales. De energiesector en de industrie zijn samen verantwoordelijk voor ongeveer 50 % van de totale CO₂-emissie en lenen zich gezien de geconcentreerde constante uitstoot het best tot introductie van CCS-technieken. De CO₂-uitstoot van elektriciteitscentrales kan zo met 75 % worden verminderd (**Kader 6**). Deze techniek is nog maar op beperkte schaal gecommercialiseerd en

Levenscyclusanalyse is een techniek om de milieu-impact gedurende de ganse levensduur van een product in te schatten: dit gaat van ontginning van materialen, over productie en gebruik van materialen tot en met de afvalfase van het product.

Een dergelijke analyse voor de opkomende CCS-technologieën toont aan dat de CO₂-uitstoot (g CO₂ equiv/kWh) voor de verbranding van fossiele brandstoffen veel lager ligt in vergelijking met conventionele verbranding van fossiele brandstoffen:

| Technologie | Minimum schatting | Mediaan | Maximum schatting |
|---|-------------------|---------|-------------------|
| Steenkool | 740 | 820 | 910 |
| Gas (gecombineerde cyclus) | 410 | 490 | 650 |
| CCS -steenkool - poederkool | 190 | 220 | 250 |
| CCS - steenkool - IGCC (integrated gasification combined cycle) | 170 | 200 | 230 |
| CCS – Gas – Gecombineerde Cyclus | 94 | 170 | 340 |

Kader 6: "Carbon Capture and Storage": levenscyclusanalyse

is in opmars. In 2014 werd wereldwijd ca. 40 miljoen ton (0,04 Gt) CO₂ gecapteerd en ondergronds gestockeerd. In Vlaanderen werden verlaten steenkoolmijnen als potentiële CO₂-sequestratiesites voorgesteld.¹¹

Het verminderen van de verspreiding van CO₂ door het toepassen van CCS-technieken voor de energiesector en de industrie lijkt bijgevolg een evidente eerste stap. De "National Academy of Sciences" van de VSA heeft in een recente studie CCS voorgesteld als realistisch op relatief korte termijn.¹² Het idee stuit op een zekere weerstand, gezien zijn analogie met "vuil onder de mat vegen" en het mogelijke risico verbonden met deze techniek.¹³ De geringe maatschappelijke acceptatie van CCS is bijgevolg een belangrijk obstakel voor de vereiste grootschalige implementatie van de techniek. Gegeven echter de mondiale toenemende energievraag en een noodzakelijke reductie in CO₂-uitstoot, lijkt CCS een geschikte noodzakelijke, zij het tijdelijke maatregel (naast andere te nemen maatregelen), al zal op termijn meer waarde gevonden moeten worden uit de gecapteerde CO₂ dan enkel emissiereductie (door hergebruik van CO₂ – zie verder).

¹¹ K. PIESSENS, M. DUSAR. *Geologica Belgica* 7 (2004) 165-180.

¹² <http://www.nap.edu/catalog/18805/climate-intervention-carbon-dioxide-removal-and-reliable-sequestration>.

¹³ Een mogelijk risico is bv. het optreden van een groot lek: CO₂ is zwaarder dan lucht en zou door adiabatische expansie ook afkoelen waardoor zich een zwaarder dan lucht deken over de omgeving zou kunnen ontwikkelen.

Efficiënte opslag van CO₂ uit rookgassen vraagt echter het vooraf concentreren van CO₂. Hiervoor zijn verschillende technologieën beschikbaar. Koolstofdioxide kan opgevangen worden in een vloeistof (absorptie) of gevangen worden op een oppervlak (adsorptie). De technologie via absorptie wordt al meer dan 80 jaar commercieel toegepast bij de verwijdering van CO₂ uit aardgas. Hiertoe wordt het te zuiveren gas besproeid met een aminoplossing zoals mono-ethanolamine, waarbij de aminogroepen selectief reageren met CO₂ zoals in de reactie:¹⁴



Het gecapteerde CO₂ wordt vrijgezet bij hogere temperatuur via de omgekeerde reactie.

Deze techniek wordt ook gebruikt bij steenkoolcentrales, cement- en staalfabrieken, gezien de hoge CO₂-concentratie in de rookgassen. Deze commercieel toegepaste technologie heeft enkele nadelen, zoals corrosie van de uitrusting, energieconsumptie tijdens de regeneratie en de vereiste van een groot reactorvolume. Er wordt dan ook gezocht naar alternatieven waarbij CO₂ (selectief) gevangen wordt in de poriën van vaste stoffen met een hoog inwendig oppervlak zoals silica, zeolieten en metaal-organische roosters (MOFs) met aminogroepen.

CO₂ geproduceerd in puntbronnen is niet zuiver, maar verdund met andere gassen. De rookgassen van een elektriciteitscentrale gebaseerd op aardgas bevatten bijvoorbeeld typisch slechts 8% CO₂ naast waterdamp, zuurstof en inerte stikstof (73 %). Om deze CO₂ op te slaan ("carbon capture & storage"; CCS) of te gebruiken ("carbon capture & utilization"; CCU) moet een scheiding tussen CO₂ en de andere gassen gebeuren. Dit kost energie en wordt vaak uitgedrukt als een fractie van de energie die de elektriciteitscentrale produceert, de energie-penalty.

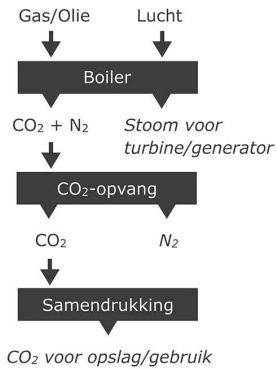
De minimale scheidingsenergie is een precies gedefinieerde waarde, afhankelijk van de concentraties. Jarenlange ervaring met scheidingsprocessen leert dat de werkelijke scheidingsenergie voor een praktisch proces typisch 3 tot 5 keer hoger ligt dan dit theoretisch minimum. Wanneer verbranding gecombineerd wordt met CO₂-scheiding worden 3 configuraties onderscheiden (zie hieronder). Ofwel wordt CO₂ afgescheiden na verbranding ("post-verbranding"), ofwel wordt stikstof afgescheiden vóór de verbranding ("oxy-verbranding"), ofwel wordt de verbranding gesplitst in 2 stappen met een scheiding in het midden ("pre-verbranding").

Voor de verschillende configuraties en voor verschillende brandstoffen werd de energie-penalty geschat, gebaseerd op de praktisch haalbare scheidingsenergie. Scheiding van CO₂ na verbranding verbruikt ongeveer 15 à 20% van de energie geproduceerd door de centrale. Deze optie is het gemakkelijkst te implementeren in bestaande centrales. Een veel lagere scheidingskost van ~10 % wordt gevonden voor een pre-verbrandingsschema

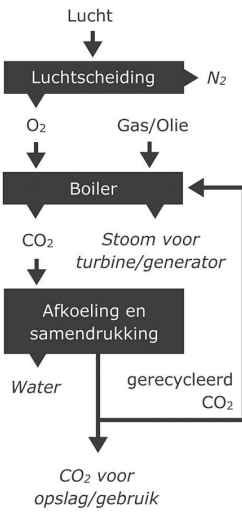
¹⁴ G.T. ROCHELLE, *Science* 325 (2009) 1652-1654.

zoals geïmplementeerd in Integrated Gasification Combined Cycle. Oxy-verbranding vertoont het hoogste extra energieverbruik (zie figuur hieronder).

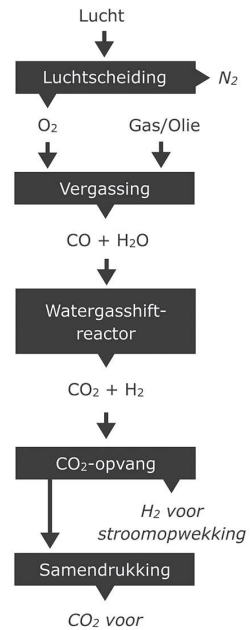
1. Post-verbranding



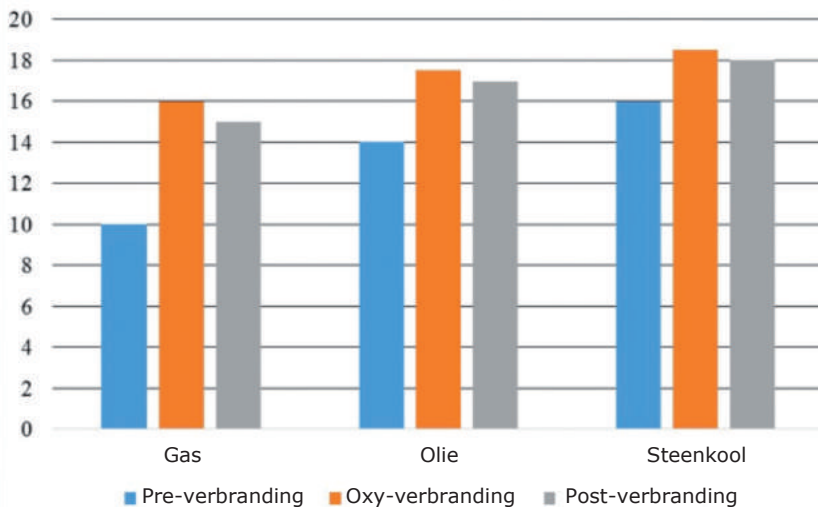
2. Oxy-verbranding



3. Pre-verbranding



Extra energieverbruik voor CO₂ scheiding (in %)

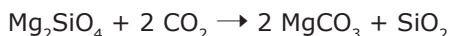


Kader 7. Concentratie van CO₂-stromen en hun energiekost

Het concentreren van CO₂ vertegenwoordigt echter een aanzienlijke energiekost (**Kader 7**). Een zeer recente studie toonde aan dat hierdoor de elektriciteitskosten door productie uit steenkool tot 64 % kan toenemen.¹⁵ In een recente studie over toepassingen in de cementindustrie in Frankrijk, wordt de haalbaarheid van CCS betwijfeld omwille van de kostprijs van het "capture"-gedeelte.¹⁶

Mineralisatie

Mineralisatie van CO₂ is een proces waarbij CO₂ reageert met mineralen zodat carbonaten gevormd worden.¹⁷ Een typisch voorbeeld wordt geïllustreerd door volgende reactie:



Dit is een zeer langzaam natuurlijk proces. In beschikbare mineralen zoals olivijn (Mg₂SiO₄) kan méér CO₂ opgeslagen worden dan de totale historische CO₂-uitstoot. Om de reactie te versnellen kan getracht worden het oppervlak van de mineralen te vergroten door ze bijvoorbeeld te verpulveren.¹⁸ De ontginning, het verpulveren en het transport van de gigantische hoeveelheid mineralen is echter zeer energie-intensief. Deze techniek wordt nog niet commercieel toegepast.

CO₂ kan ook gecaptureerd worden door reactie met nevenproducten uit de metaalindustrie. De metaaloxiden, die als zogenaamde "slakken" worden afgescheiden van het gesmolten metaal, kunnen bijvoorbeeld worden gevaloriseerd door chemische reactie met CO₂ tot op carbonaat-gebaseerde bouwmaterialen. Gedeeltelijk vervangen van sterk CO₂-vervuilende materialen door minder vervuilende materialen wordt met succes toegepast in de cementindustrie. In de productie van portlandcement is de thermische ontbinding van kalksteen tot CaO de voornaamste bron van CO₂. Toevoegen van minerale additieven die geen CO₂ vrijzetten kan per ton geproduceerde cement de CO₂-uitstoot aanzienlijk verminderen.¹³

¹⁵ S.D. SUPEKAR, S.J. SKERLOS. *Environ. Sci. Technol.* 49 (2015) 12576.

¹⁶ M. GIMENEZ. *International Cement review*, august 2015., <http://www.cemnet.com/Articles/story/157385/harnessing-co2.html>.

¹⁷ <http://www.carboncapturejournal.com/news/making-money-from-mineralisation-of-co2/3251.aspx?Category=featured>.

¹⁸ <http://www.virginearth.com/2014/01/a-letter-from-prof-olaf-schuiling-to-the-dutch-government/>.

Natuurlijke en artificiële fotosynthese

Het is evident dat intensifiëring van de natuurlijke fotosynthese een grotere hoeveelheid CO₂ uit de lucht zou kunnen capteren. Een deel van de antropogene CO₂-emissie wordt vandaag reeds geneutraliseerd door verhoogde fotosynthetische capaciteit. Een duurzaam bosbeheer, dat erop gericht is de koolstofvoorraden in bossen te vergroten of minstens te behouden, wordt door het IPCC naar voor geschoven als economisch interessante optie.¹⁹ Het actief opdrijven van de biomassaproductie bijvoorbeeld door het voeden van limiterende nutriënten zoals ijzer aan algen op zee biedt een extra mogelijkheid voor verhoogde koolstoffixatie en reductie van atmosferische CO₂. Dit behoort tot de "geo-engineering"-opties, d.w.z. doelbewuste en grootschalige interventie in het klimatologische systeem. Diverse studies ontraden echter deze route, gezien de gevolgen van dergelijke ingrepen op grote schaal te moeilijk in te schatten en mogelijke neveneffecten ongekend zijn. De captatie en omzetting van CO₂ door natuurlijke fotosynthese vergt echter enorme oppervlaktes. Om 90 % van de CO₂ geproduceerd door een 850 MW elektriciteitscentrale om te zetten is een algenfarm van ongeveer 500 km² nodig, of 2.000 keer de oppervlakte van de elektriciteitscentrale.

CO₂-captatie uit de atmosfeer en daaropvolgende omzetting tot suikers met behulp van zonlicht en plantenbladgroen wordt ons reeds miljoenen jaren door de natuur voorgedaan. Artificiële fotosynthese, d.w.z. katalytische omzetting van CO₂ en water met zonlicht tot bijvoorbeeld koolwaterstoffen, lijkt daarom een aantrekkelijk concept. De haalbaarheid van dit concept werd reeds door verschillende onderzoekscentra en bedrijven gedemonstreerd²⁰ en zal de komende decennia wellicht economisch haalbaar zijn voor omzetting van CO₂ uit puntbronnen. Toegepast op verdunde CO₂ stelt zich een intrinsiek onoverkomelijk probleem: de afvang van CO₂ uit lucht met slechts 400 ppm CO₂ kost minstens 500 € per ton gevangen CO₂. Dit is een factor 10 duurder dan de afvang uit een geconcentreerde bron.²¹

¹⁹ <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter9.pdf>.

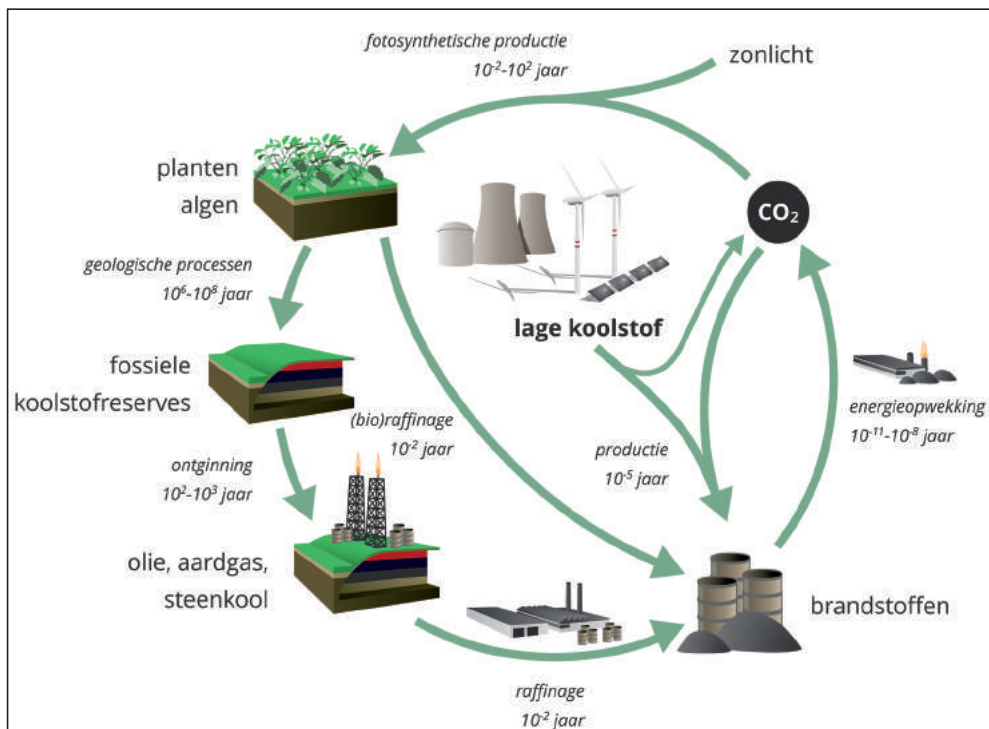
²⁰ <http://www.carbonrecycling.is/>.

²¹ <http://www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf>.

5 De CO₂-problematiek is een timingprobleem

De energiecyclus van koolstof

De excessieve uitstoot van CO₂ is het netto resultaat van fenomenen met sterk verschillende tijdsconstanten die tussenkomen in de reductie van koolstof voor energieproductie, waarin fotosynthese, fossilisatie en verbranding een cyclus vormen (**Kader 8**). Energie wordt opgewekt door verbranding van organische stoffen (brandstoffen) waarvan de C- en H-atomen reageren met luchtzuurstof tot respectievelijk CO₂ en H₂O. De vrijgekomen energie (warmte) wordt meteen verbruikt of omgezet in andere energievectoren zoals elektriciteit. De vrijgekomen CO₂ komt terecht in de atmosfeer en verspreidt zich diffuus. Door fotosynthese wordt deze terug omgezet tot biomassa. Op een geologische tijdschaal onderging biomassa een fossilisatieproces ter vorming van de fossiele koolstofvoorraden die nu worden ontgonnen en geraffineerd tot brandstoffen. In deze cyclus is verbranding het snelste proces en verloopt fossilisatie het traagst met een



Kader 8: Timing in de koolstofredoxcyclus

snelheidverschil dat kan oplopen tot een factor 10^{16} . Het onevenwicht tussen de trage CO_2 -reductie (fotosynthese en fossilisatie) en de snelle verbranding verklaart de CO_2 -accumulatie in de atmosfeer. Wagens met diesel-, benzine- en LPG-motoren rijden aldus op zonne-energie die miljoenen jaren geleden door fotosynthese werd opgeslagen in chemische bindingen, en die in de motor in milliseconden wordt omgezet tot CO_2 .

De allereerste aardoliebron werd in 1858 door Drake aangeboord in Titusville, Pennsylvania (VSA). In de voorbije 150 jaar werd het zonne-energieservoir bestaande uit fossiele koolstofverbindingen in versneld tempo aangesproken.

De trage fossilisatiestap kan worden kortgesloten door verse biomassa meteen in de cyclus te injecteren en deze in een (bio)raffinaderij te verwerken tot brandstoffen. De verkorte cyclus met chemische en/of biochemische raffinage van energiegewassen vertoont echter nog steeds een dramatisch onevenwicht in snelheid van de stappen (**Kader 8**). Enkel met processen die CO_2 snel en met hoge productiviteit terug omzetten tot brandstof kan CO_2 -accumulatie vermeden worden. Efficiënte en grootschalige processen die CO_2 in seconden chemisch reduceren tot brandstof, zijn evidente voor de hand liggende stappen in een artificieel versnelde fotosynthese. Dit soort cyclus waarin CO_2 op eenzelfde tijdschaal wordt gevormd en terug omgezet, is dan een duurzame oplossing voor het bereiken van een CO_2 -neutrale wereld. De energie voor deze snelle CO_2 -reductie moet uiteraard duurzaam opgewekt worden en komt onrechtstreeks van de zon. Een andere bron met minimale CO_2 -voetafdruk, zoals kernenergie, kan (tijdelijk) een complementaire bijdrage leveren. De ontwikkeling van technologie voor de benodigde snelle omzetting van CO_2 tot brandstof is een aanzienlijke wetenschappelijke uitdaging.²²

Verblijftijden van zonnefotonen op aarde

Het timingprobleem kan ook worden benaderd vanuit de energiezijde in termen van verblijftijden van zonnefotonen op aarde. Het energetisch vermogen dat door de zon wordt ingestraald is enorm. Eén uur zonnenschijn op de hele aarde is in theorie voldoende om de mensheid voor een vol jaar van energie te voorzien (**Kader 9**). Jammer genoeg blijven de meeste zonnefotonen minder dan één seconde op aarde. Een kleine fractie (1 %) heeft echter een langere verblijftijd omdat hun energie wordt benut om CO_2 via fotosynthese om te zetten tot biomassa. Bij verbranding ervan ontstaat warmte waarvan de straling de fotonen terug vrijzet. Sedert de verschijning van de "uitvindere" van de fotosynthese (cyanobacteriën) 3,5 miljard jaar geleden en die van de landplanten 470 miljoen jaar geleden worden zonnefotonen opgeslagen in fossiele biomassa. Verbruik van

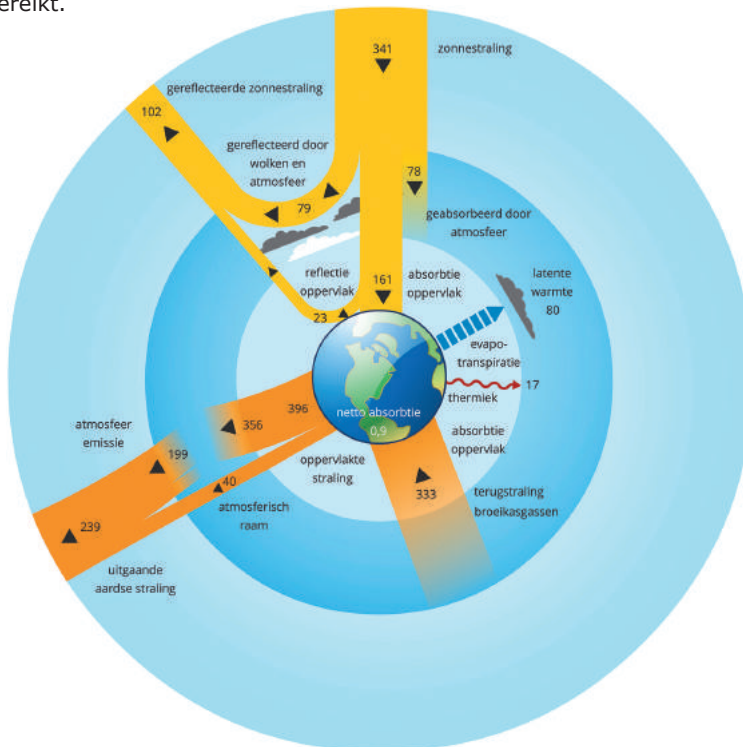
²² X. LIM. *Nature* 526 (2015) 628-630.

Per uur valt meer zonne-energie op aarde dan wat per jaar verbruikt wordt. Jammer genoeg verlaat het overgrote deel van die invallende energie nagenoeg onmiddellijk de aarde. Van de 173.000 TW (340 W/m^2) wordt 18 TW²³ door menselijke activiteit verbruikt. 29 % wordt onmiddellijk gereflecteerd door wolken, sneeuw en ijs. 23 % wordt geabsorbeerd in de atmosfeer en ongeveer 50% door het aardoppervlak.

Het merendeel van de geabsorbeerde zonne-energie wordt echter nog dezelfde dag door de aarde terug de ruimte ingestuurd onder de vorm van warmte (thermisch infrarood). Ongeveer 25 % wordt opgeslagen als latente warmte door verdamping van water. Deze gigantische hoeveelheid energie blijft wat langer op aarde en komt vrij onder de vorm van wind, regen, stormen en orkanen. Ook hydro-energie komt uit deze voorraad.

Niet meer dan ongeveer 1% van de zonne-energie wordt door fotosynthese omgezet in chemische energie in de vorm van biomassa. Ongeveer 30% hiervan wordt gecapteerd door fotosynthese activiteit van blauw-groene algen. Op een absolute schaal is deze energiestroom nog steeds gigantisch (ca. 520 TW). Ze blijft verschillende jaren opgeslagen op aarde.

De totale hoeveelheid energie van de gekende reserves aan fossiele brandstoffen wordt geschat op 38 ZJ (zettajoule). Dit is ongeveer 1 % van de energie die ons per jaar van de zon bereikt.



Globale jaarlijkse energiebalans in W/m^2 (metingen maart 2000 tot mei 2004). Naar Trenberth et al. 2008 (<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2008BAMS2634.1>)

Kader 9: Zonne-energiebalans van de aarde

²³ TW = 1 terawatt = 10^{15} W ; 1 ZJ = 1 zettajoule = 10^{21} J .

deze fossiel opgeslagen zonne-energie in de tijdspanne van enkele generaties van mensen heeft uiteraard een excessieve CO₂-uitstoot tot gevolg gehad. De uitdaging bestaat erin de energie van een groter deel van de zonnefotonen langer op aarde te houden en te benutten om aan de energiebehoefte te voldoen. Deze gecapteerde zonnefotonen kunnen dan worden ingezet voor de gewenste snelle reductie van CO₂ in de koolstofcyclus (**Kader 8**).

Capteren, opslaan en benutten van zonnefotonen

Er zijn verschillende manieren om zonnefotonen te capteren en te benutten. Natuurlijke captatie van zonnefotonen kan met de hulp van fotosynthese, wind- en waterkracht (**Kader 10**). Met fotovoltaïsche cellen, windturbines en waterkrachtcentrales kan de energie van de zonnefotonen naar elektrische energie omgezet worden. Zonnestraling fluctueert echter sterk volgens dag-nacht- en seizoenencycli en met de bewolgingsgraad. Daardoor fluctueren energieverbruik (met een piek 's ochtends vroeg) en zonne-energieproductie (gedurende de dag), volgens verschillende patronen. Grootschalige energie-intensieve processen, zoals de staalindustrie, opereren echter continu. Onevenwicht in aanbod en vraag kan tot overschotten bij productiepieken leiden en een bedreiging vormen voor de

| Energiebron | Oorsprong | Toelichting |
|-----------------------|----------------------|---|
| Zonnestraling | Zon | Kernfusieprocessen in de zon |
| Fossiele brandstoffen | Zon | Indirect van de zon: fotonen zorgen voor fotosyntheseprocessen en productie van biomassa, die op een geologische tijdschaal omgezet werd in fossiele koolstof |
| Biomassa | Zon | Indirect van de zon: fotonen zorgen voor fotosyntheseprocessen en productie van biomassa |
| Windenergie | Zon | Indirect van de zon: warmte afkomstig van de zon zorgt voor beweging van luchtmassa's |
| Kernenergie | Kernsplijting | Gecontroleerde fissie van ²³⁵ U of ²³⁹ Pu kernbrandstof |
| Geothermische energie | Aarde | 30% restwarmte van het ontstaan van de aarde/ 70% radioactief verval |
| Getijde-energie | Zwaartekracht | Rotatiesysteem maan - aarde en zeewater |
| Waterkracht | Zon en zwaartekracht | Indirect van de zon: verdamping van oceaan en verplaatsing onder vorm van neerslag naar hoger gelegen gebieden |

Kader 10: Energiebronnen: oorsprong en vorming

continuïteit van de elektriciteitsvoorziening bij sterke vraag of lage productie. Grootschalige en efficiënte opslag van zonne-energie zal dus noodzakelijk zijn om naar een niet-fossiele zonne-energie-gebaseerde economie te evolueren.

Productie van elektriciteit door fotovoltaïsche cellen gebeurt vrij efficiënt en wordt steeds goedkoper (0.12 €/kWh uit zonne-energie tegenover 0.04 à 0.06 €/kWh uit steenkool). Een probleem met zonne-energie, en elektriciteit in het bijzonder, is het gebrek aan efficiënte manieren voor grootschalige opslag. De betere batterijen bezitten vandaag een energiedichtheid (energie per kg) die tien tot honderd maal kleiner is dan deze van fossiele brandstoffen (**Kader 11**). Recent werd becijferd dat batterijen minder dan \$150 per kWh opslagcapaciteit moeten kosten om elektrische wagens competitief te maken met conventionele dieselwagens, een doelstelling die nog niet gehaald werd.²⁴ De energie-inhoud van 1 liter diesel bedraagt 40 MJ/l en kost vandaag aan de pomp niet meer dan wat bijvoorbeeld 1 liter spuitwater kost. De indrukwekkende energiedichtheid van vloeibare brandstoffen kan treffend geïllustreerd worden. Diesel tanken vergt ongeveer 3 minuten voor een 60-tal liter. Uit een eenvoudige vergelijking volgt dat 36 tankende dieselwagens een hoeveelheid energetisch vermogen opnemen dat overeenkomt met het elektrische vermogen van de kerncentrale Doel 1. Om

| Brandstof | Energietype | Specifieke energie (MJ/kg)* |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Uranium | Nucleair | 80.620.000 |
| Waterstof | Chemisch | 120 |
| Methaan (aardgas) | Chemisch | 47 |
| Diesel | Chemisch | 43 |
| LPG | Chemisch | 47 |
| Benzine | Chemisch | 43 |
| Steenkool | Chemisch | 23 |
| Methanol | Chemisch | 20 |
| Lithium-ion batterij | Elektrochemisch | 0,36-0,875 |
| Alkaline batterij | Elektrochemisch | 0,67 |
| Nikkel-metaal hydride batterij | Elektrochemisch | 0,288 |

*Lower heating values voor gasvormige, vloeistof en vaste brandstoffen, bron: <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/lower-and-higher-heating-values-hydrogen-and-other-fuels>

Kader 11: Specifieke energie of Energiedichtheid van energiedragers

²⁴ B. NYKVIST, M. NILSSON, *Nature Clim. Change* 5 (2015) 329-332.

| Molecule | Verbrandingswarmte kJ/mol C | H ₂ - equivalenten ^b | Opgeslagen fractie (%) van de H ₂ -energie ^c |
|------------------|--------------------------------|---|--|
| Waterstof | -240 ^a | | 100 |
| Methanol | -680 | 3 | 94 ^c |
| Dimethylether | -670 | 3 | 93 |
| Diesel brandstof | -640 | 3 | 89 |
| Glucose | -450 | 2 | 94 |

^a in kJ/mol H₂; ^b aantal H₂-moleculen om de betreffende molecule te produceren door hydrogenering van CO₂, e.g., 3 H₂ + CO₂ -> CH₃OH + H₂O; ^c de verbrandingswarmte van methanol, 680 kJ/mol, is 94% van de verbrandingswarmte van de 3 H₂-moleculen die vereist zijn om CO₂ te reduceren tot methanol (= 680/(240×3)).

Kader 12. Energieopslag in chemische verbindingen

met zonnecellen op het dak van de wagen de hoeveelheid energie van een volle tank met diesel te produceren, zijn maar liefst 800 uur zonlicht nodig. Zonnestraling kunnen dan ook meest compact worden opgeslagen in de chemische bindingen van de brandstofmoleculen.

“Groene” elektrische stroom, o.a. bekomen via (fotovoltaïsche) omzetting van zonlicht of via windenergie, kan water elektrolytisch splitsen in waterstofgas (H₂) en zuurstofgas (O₂). Zo wordt zonne-energie omgezet in chemische energie verankerd in de waterstofmoleculen. Deze productie van zonne-brandstof via elektro-katalytische weg haalt een zonlicht-tot-chemische-energie efficiëntie van meer dan 50 %.²⁵ Het opslaan van zonne-energie in moleculaire waterstof is dus technisch perfect mogelijk en behoorlijk efficiënt. Verschillende bedrijven zijn dan ook reeds actief in dit gebied. Groene stroom kan op analoge wijze worden gebruikt om CO₂ elektrokatalytisch in één stap om te zetten naar vloeibare brandstoffen. Optimistische techno-economische studies geven aan dat op deze manier zonne-brandstoffen zoals methanol kunnen geproduceerd worden uit CO₂ en H₂ aan een kost tussen 0.94 en 1.10 € per kilogram diesel-equivalent (equivalente energie-inhoud).²⁶ De omzetting van waterstof en CO₂ naar koolstof-verbindingen vergt relatief weinig extra energie t.o.v. de energiebehoefte voor de productie van waterstof (**Kader 12**). Eenvoudige moleculen zoals methanol, etheen en propeen kunnen op deze wijze uit CO₂ geproduceerd worden en dienst doen als bouwstenen voor de chemische industrie. Dit vraagt hoogstens minimale

²⁵ F. LI, J. LAU, S. LICHT, *Adv Science*, 2015, 1500260 (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adv.201500260/pdf>) en R.F. Service. *Science* 349 (2015) 1158-1160.

²⁶ G. CENTI, E.A. QUADRELLI, S. PERATHONER. *Energy Environ. Sci.* 6 (2013) 1711-1731.

re-engineering van de bestaande grootschalige raffinage- en/of petrochemische processen. Op te merken valt dat naast de nodige massieve waterstofvolumes, equivalente volumes zuivere zuurstof geproduceerd worden. Deze kunnen in vele stationaire verbrandingsprocessen lucht als oxidans vervangen, met een verhoogde verbrandingsefficiëntie als rechtstreeks gevolg. De op vele industriële sites voorkomende (dure) cryogene luchtscheidingsfabrieken worden dan in een waterstof-gebaseerde economie overbodig.

Door concentratie van zonnestraling met paraboolspiegels kunnen temperaturen tot 1000 °C en meer worden bereikt. Deze route heeft potentieel een nog hogere efficiëntie dan de fotovoltaïsche benadering (zonnepanelen). De productie van elektriciteit gebeurt op een vrij klassieke manier, via stoomproductie, en een generator aangedreven door een stoomturbine. De mogelijkheid om de warmte tijdelijk (bv. 's nachts) op te slaan, bv. onder de vorm van gesmolten zouten, maakt deze technologie interessant gezien ze de mogelijkheid biedt om op centraal niveau aan energiebuffering te doen met als gevolg een lagere systeem-integratiekosten.²⁷

6 De huidige koolstofeconomie

Onvervangbare koolstofverbindingen

De ganse fauna en flora bestaan voor een groot deel uit koolstofverbindingen die essentiële componenten zijn in biochemische cycli. Koolstofverbindingen behoren tot de meest gebruikte stoffen, van cosmetica over voeding en kleding tot materialen en brandstoffen. De metallurgie gebruikt bijvoorbeeld steenkool voor de productie van metalen uit erts. De aanwezigheid van koolstofatomen in materialen en chemicaliën is doorgaans essentieel. Onze huidige maatschappij is daarom koolstofgebaseerd en draait volgens een koolstofeconomie. De productie van materialen en chemicaliën is verantwoordelijk voor 5 à 10 % van de globale fossiele koolstofconsumptie. Alhoewel de vervanging van fossiele koolstofbronnen door biomassa reeds is ingezet en leidt tot vergroening van de chemische industrie, is de productie van chemicaliën momenteel nog steeds hoofdzakelijk gebaseerd op aardolie (> 90 %). De rest van de aardolie en het overgrote deel van aardgas en steenkool worden verbruikt als energiebron en daartoe verbrand tot CO₂. De vraag kan terecht gesteld worden of het verbranden van koolstofverbindingen voor energiedoeleinden een goede zaak is, gezien de onvervangbaarheid van deze verbindingen in ontelbare producten. Koolstof in materialen en chemicaliën komt uiteindelijk ook vrij als CO₂, maar slechts na de levensloop van het product, m.a.w.

²⁷ R.C. PIETZCKER et al. *Applied Energy* 135 (2014) 704-720.

na een significant langere tijdspanne dan het geval is voor brandstoffen. Bovendien dragen vele van die materialen bij tot belangrijke energiebesparingen, zoals isolatiematerialen en lichtere wagens door het gebruik van kunststoffen. LCA geeft aan dat voor elke ton CO₂ die de chemische industrie voor dergelijke toepassingen uitstoot, er drie ton CO₂ uitgepaard wordt.

Levenscyclusanalyse

Gezien de grootschaligheid van de energie-omzettingen is een gedetailleerde levenscyclusanalyse (LCA) van de verschillende energieproductieprocessen noodzakelijk voor een gefundeerde aanpak van het CO₂-emissieprobleem. Alhoewel er een aanzienlijke spreiding zit op de geschatte waarden hebben alle energieproductieprocessen, inclusief de hernieuwbare, immers een aanzienlijke CO₂-voetafdruk (**Kader 13**). De CO₂-voetafdruk van elektriciteitsproductie met fotovoltaïsche cellen, windturbines, waterkrachtcentrales en kernenergie volgt uit de productieprocessen van de betrokken materialen en installaties en het transport, allen op koolstof gebaseerd in de huidige koolstofeconomie. Dit verklaart bijvoorbeeld de op het eerste zicht tegenstrijdige conclusie uit een recente studie aan UGent²⁸ dat voor Vlaanderen de kernuitstap de CO₂-uitstoot zou doen toenemen met 60 %, zelfs indien het aandeel van hernieuwbare energie tegen

| CO₂-uitstoot per energietechnologie; LCA emissie [CO₂-equiv (g/kWh)] | | | |
|---|---------|---------|---------|
| | Minimum | Mediaan | Maximum |
| Steenkool | 740 | 820 | 910 |
| Biomassa- co-verbranding met steenkool | 620 | 740 | 890 |
| Gas (gecombineerde cyclus) | 410 | 490 | 650 |
| Biomassa | 130 | 230 | 420 |
| PV (zonnepanelen) | 18 | 48 | 180 |
| Geothermisch | 6.0 | 38 | 79 |
| Geconcentreerde zonnekracht | 8.8 | 27 | 63 |
| Waterkracht | 1.0 | 24 | 2200 |
| Wind offshore | 8.0 | 12 | 35 |
| Nucleair | 3.7 | 12 | 110 |
| Wind onshore | 7.0 | 11 | 56 |

Bron: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

Kader 13: Levenscyclusanalyse (LCA) van de verschillende energieproductieprocessen

²⁸ <http://www.ceem.ugent.be/publications/CO2%20na%20de%20kernuitstap%2025062015.pdf>.

2030 opgetrokken wordt tot 57 %. Indien het aandeel hernieuwbare energie in 2030 beperkt zou blijven tot 28 % zouden extra aardgascentrales nodig zijn om de vereiste elektriciteit op te wekken. De CO₂-uitstoot door deze elektriciteitscentrales zou hierdoor oplopen van de huidige 15 miljoen ton tot 37 miljoen ton in 2030. Voor kwantificatie van de transitie van een op fossiele koolstof gebaseerde economie naar een economie met alternatieve energievormen dient daarom de CO₂-uitstoot per geproduceerde kWh als criterium te worden gehanteerd (door het beleid).

Energiedensiteit van brandstoffen

Omwille van de stijgende energiebehoefte van een groeiende wereldbevolking en haar welvaart, de enorme energetische voordelen van fossiele brandstoffen en afwezigheid van een direct beschikbaar grootschalig alternatief is het verbannen van fossiele energie in de komende 20-30 jaar utopisch. Voor transportdoeleinden zijn vloeibare brandstoffen omwille van hun hoge energiedensiteit (**Kader 11**) tot nader order niet te evenaren, zeker voor het vrachtvervoer op de weg, te water en in de lucht. Maar zelfs voor de personenwagens blijft de vraag of volledige substitutie van fossiele brandstoffen in een paar decennia wel mogelijk is.

Rechtstreekse energievoorziening door de zon is alleen mogelijk voor specifieke toepassingen zoals zonneboilers, maar kan geen globale oplossing bieden voor alle energievoorziening gezien het verspreide karakter van deze energiebron en de grote vereiste oppervlakte voor captatie van zonnestraling. Neem bijvoorbeeld de energiebehoefte van het Vlaamse wegtransport (**Kader 5**), verantwoordelijk voor 21 % van de broeikasgasuitstoot. In 2013 verbruikten benzine- en dieselvoertuigen samen 186 PJ (1 petajoule = 10¹⁵ Joule). Het wegtransport alleen al verbruikte daarmee 19 keer zoveel als de geproduceerde energie met wind, waterkracht en zonnepanelen in dat jaar.²⁹ Het illustreert hoe moeilijk Vlaanderen op korte tot middellange termijn met zonnefotonen van energie kan worden voorzien.

De H/C-verhouding van brandstoffen

De huidige brandstoffen voor motorvoertuigen vertonen verschillen in H-tot-C-atoomverhoudingen (**Kader 14**). De molecuule methaan (CH₄), het hoofdbestanddeel van aardgas en CNG (*compressed natural gas*), bevat vier H-atomen en slechts één C-atoom. De daaruitvolgende H/C-atoomverhouding in methaan (=4) bereikt hier een maximale waarde voor organische verbindingen. LPG (*liquefied petroleum gas*) bestaat uit lichte alkanen en heeft een gemiddelde H/C-verhouding van 2,6. Benzine en diesel zijn met een H/C-verhouding van 1,8 tot 2,0 onderling

²⁹ <http://emis.vito.be/rapporten-energiebalans-vlaanderen>.

| Brandstof | H/C verhouding |
|------------------------|-----------------------|
| CNG (aardgas) | 4 |
| LPG | 2,6 |
| Benzine | 1,8 |
| Diesel ^a | |
| - <i>Conventioneel</i> | 1,8 |
| - <i>Biodiesel</i> | 2,0 |
| Steenkool | < 1 |

Bron: Energy Fuels 2013, 27, 237–246

Kader 14: H/C-verhouding van brandstoffen

vergelijkbaar. Lange alkanen en de alkylketens van vetzuuresters (hoofdbestanddeel van de eerste generatie biodiesel) hebben een H/C-verhouding iets hoger dan 2. Steenkool dat voor meer dan 90 % (gewichtspcent) uit koolstof bestaat en ongeveer 4-5 % gewichtspcent waterstof heeft een H/C-verhouding kleiner dan 1 en bevat het laagste aantal H-atomen.

De massadichtheid van brandstoffen is voornamelijk afhankelijk van de massa van de aanwezige moleculen. CNG is gasvormig en heeft een lage massadensiteit. Onder de vloeibare brandstoffen is er een aanzienlijk verschil in dichtheid tussen LPG, benzine en diesel (**Kader 15**). Diesel is de meest dense brandstof en heeft de hoogste energie-inhoud per liter. Een liter benzine bevat slechts 89 % van de energie-inhoud van een liter diesel, en LPG slechts 72 % (**Kader 15**). Diesel en benzine hebben een vergelijkbare theoretische CO₂-prestatie (uitstoot bij volledige verbranding, g CO₂ / MJ) (**Kader 15**). De hogere performantie van dieselmotoren zorgt er echter voor dat er minder CO₂ per gereden km wordt uitgestoten. LPG is op het vlak van theoretische CO₂-vorming superieur aan diesel en benzine. CNG is met slechts 58,5 g CO₂ / MJ het minst milieubelastend. Het gebruik van aardgas (CNG) en LPG in plaats van benzine of diesel geeft dan ook een lagere CO₂-uitstoot per gereden kilometer.³⁰

Hoogwaardige dieselbrandstof bestaat voornamelijk uit lange alkanen, met formule CH₃-(CH₂)_n-CH₃ (n = 16 voor cetaangetal 100). De H/C-verhouding is afhankelijk van het aantal methyleengroepen (-CH₂-) in de ketens. Inkorten van bijvoorbeeld 20 naar 10 koolstofatomen per keten verhoogt de H/C-verhouding van 2,1 naar 2,2, of een met ca. 5 % verlaagde CO₂-uitstoot. Verhogen van de H/C-verhouding door het aanpassen van de ketenlengte van de alkanen is

³⁰ <http://www.ecoscore.be/nl/hoe-bereken-je-de-co2-uitstoot-uit-het-brandstofverbruik>.

| | Densiteit (g/l) | C- gehalte (g/kg) | C- gehalte (g/l) | Energie- gehalte (MJ/kg) | Energie- gehalte (MJ/l) | CO ₂ - uitstoot (g CO ₂ /MJ) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Diesel | 835 | 862 | 720 | 43 | 36 | 74 |
| Benzine | 750 | 870 | 642 | 43 | 32 | 73 |
| LPG | 550 | 825 | 454 | 47 | 26 | 64 |
| CNG (Methaan) ^a | - | 750 | - | 47 | - | 58,5 |

^a, er bestaan verschillende soorten CNG, met verschillende samenstelling; hier wordt zuiver methaan beschouwd.
Bron: <http://www.ecoscore.be/nl/hoe-bereken-je-de-co2-uitstoot-uit-het-brandstof-verbruik> en <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/lower-and-higher-heating-values-hydrogen-and-other-fuels>

Kader 15: CO₂-prestatie van de courante brandstoffen

technisch mogelijk via aanpassen van de raffinagetechniek, en kan op korte termijn een – zij het bescheiden – bijdrage leveren tot de verlaging van de CO₂-uitstoot van het wegverkeer, en zeker van het zwaardere vervoer waarvoor elektrische alternatieven niet meteen een oplossing bieden.

De impact van de H/C-verhouding van fossiele brandstof komt ook tot uiting in de koolstofvoetafdruk van de verschillende soorten elektriciteitscentrales. Zo stoten gascentrales significant minder CO₂ uit per geproduceerde kWh vergeleken met steenkoolcentrales (**Kader 13**). De omschakeling van steenkool naar fossiele brandstoffen met hogere H/C-verhouding, en vooral naar aardgas, leidt ook daar tot een verminderde CO₂-uitstoot. Zo heeft de VSA de Kyotodoelstellingen gehaald door de substitutie van steenkool met schaliegas. Het overschot van de Amerikaanse steenkoolproductie wordt geëxporteerd naar Europa.

7 Naar een CO₂-neutrale wereld met een gemengde koolstof-waterstofeconomie

Gezien het CO₂-emissieprobleem vormen waterstofatomen (H) in brandstoffen een valabel alternatief voor koolstofatomen (C). Bij oxidatiereacties van moleculen bestaande uit C- en H-atomen wordt respectievelijk CO₂ en water (H₂O) gevormd. Water als reactieproduct is onschadelijk, terwijl de geproduceerde waterdamp zelfs kan worden opgevangen en gecondenseerd voor gebruik. Waterdamp is wel net als CO₂ een broeikasgas, maar de aardatmosfeer bevat reeds dermate veel waterdamp (2.6 %, of 26.000 ppm) dat de toegevoegde hoeveelheid waterdamp door verbrandingsprocessen amper een verschil uitmaakt. De twaalfmaal lagere

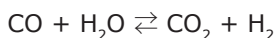
massa van het H-atoom in vergelijking met het C-atoom geeft bij H-rijke brandstoffen een aanzienlijke winst in brandstofgewicht. Waterstofgas (H₂) is dan ook het pluimgewicht onder de brandstoffen (14 keer lichter dan lucht) en heeft uitsluitend water als verbrandingsproduct. Wat remt de overstap van een koolstof-naar een waterstofeconomie dan af?

Waterstofgas als energiedrager

Het belangrijkste probleem met waterstof is de opslag en het transport. Waterstofgas wordt immers pas vloeibaar bij extreem lage temperatuur (-253°C). Samendrukken om méér moleculen in een gegeven volume te verzamelen is de enige optie. H₂ is een bijzonder kleine molecuule wat een risico vormt op lekken in reservoirs en pijpleidingen met waterstofgas onder druk. Het is geen evidentie om een uitgebreid netwerk van pijpleidingen voor waterstofgasdistributie te realiseren. Samendrukken bij een druk van honderden malen de atmosferedruk wordt toegepast voor opslag in voertuigen, maar zelfs bij die druk blijft de hoeveelheid waterstof die in de tank kan worden opgeslagen beperkt. Koelen in combinatie met samendrukken helpt om de energiedensiteit te verhogen maar brengt een meerkost met zich mee. Heel wat onderzoek werd reeds geïnvesteerd in de zoektocht naar materialen die grote hoeveelheden waterstof reversibel kunnen binden. Opslaan van de H₂-moleculen in nauwe poriën of door chemisch binden door vorming van metaalhydriden zijn opties. De vereiste capaciteit voor praktische toepassing werd ondanks intensief onderzoek niet gehaald en een doorbraak is onwaarschijnlijk geworden. Interessanter is om H₂ handelbaar te maken door dit te combineren met CO₂, waarbij CO₂ als bouwsteen gebruikt wordt.

CO₂ opgewerkt tot brandstof met behulp van waterstof

De “water-gas-shift (WGS) evenwichtsreactie” laat toe via een bestaande katalytische technologie uit de petroleumraffinagesector CO in CO₂ om te zetten en *vice versa*:



De eenvoudigste manier om CO₂ in een brandstof om te zetten is door deoxygenering tot CO, hetgeen kan verwezenlijkt worden door katalytische reductie met H₂ (omgekeerde WGS) of met een niet-gekatalyseerd energie-intensief thermisch proces. Het gevormde CO kan verbrand worden tot CO₂ en fungeert als energievectoor. Alhoewel de energievereisten van de katalytische CO-reductie hoog zijn, wordt hoge temperatuurstoom als bijproduct aangemaakt. De WGS-reactie zelf is een elegante manier om H₂ grootschalig katalytisch aan te maken uit CO. Uit aardgas (of LPG) kan een CO-rijk mengsel door “steam reforming” of (katalytische) pyrolyse geproduceerd worden.

Gedeeltelijke chemokatalytische reductie van CO₂ levert methanol of hogere alcoholen, lichte carbonzuren of zelfs synthetisch methaan. Het zijn prominente kandidaten voor toekomstige grootschalige toekomstige brandstofsynthese.

Gecapteerde CO₂ als chemische bouwsteen

Vanuit CO₂ is het mogelijk om een waaier aan verbindingen te synthetiseren voor toepassing in brandstoffen, chemicaliën en materialen.³¹ Het gebruik van CO₂ kan worden ingedeeld in drie categorieën, meer bepaald (1) de productie van brandstoffen, (2) de productie van chemicaliën en materialen, en (3) het technologisch gebruik van CO₂ zonder omzetting. Nieuwe brandstoffen zijn het meest geschikte doel voor de omzetting van grote hoeveelheden CO₂. De brandstoffenmarkt is in tonnage immers 12 tot 14 maal groter dan die van chemicaliën. Direct gebruik van CO₂-gas zonder omzetting is vrij beperkt.

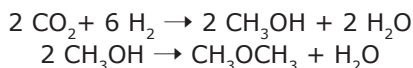
De chemische industrie beschikt over katalytische technologie om een alsmaar groeiend aantal chemische verbindingen te produceren door het aanbrengen van chemische groepen en koppeling van (gefunctionaliseerde) bouwstenen. Dit kan zelfs uit een beperkt aantal bouwstenen, met name synthesegas (mengsel van koolmonoxide (CO) en H₂), lichte olefines, aromaten en alkanen. Zo kan CO₂ bijvoorbeeld omgezet worden in anorganische carbonaten (pulp en plastics), waardevolle chemicaliën zoals ureum (meststof), en zelfs farmaceutische eindproducten (salicylzuur). CO₂ kan op industriële schaal omgezet worden tot mierenzuur (voedings-, voeder- en lederindustrie), organische carbonaten en polycarbonaten (bouwmaterialen, autofabricage, CD's en optische materialen), (poly)carbamaten (kunststoffen) en acrylaten (plastics).³² Toch dient benadrukt te worden dat de diversiteit aan eindproducten uit CO₂ verder uitgebreid kan worden (via gericht wetenschappelijk onderzoek) en telkens moet ge-(re)-engineerd worden naar grootschalige duurzame proceschemie.

Methanol, dimethylether, synthetisch methaan of mierenzuur?

Methanol (CH₃OH) is naast bulk-chemische grondstof een geschikte energiedrager met een hoog octaangetal, aangewezen voor gebruik in de benzinemotoren. Het wordt aangemaakt met een grootschalige katalytische technologie (Cu/ZnO/alumina katalysator). Hetzelfde geldt voor de korte carbonzuren, mierenzuur en azijnzuur. Chemische reductie van CO₂ tot methanol vergt drie moleculen H₂ per molecule CO₂. Dimethylether (DME) wordt uit methanol gewonnen door zuurgekatalyseerde dehydratatie. Het is een geschikt vervangmiddel voor koolwaterstoffen in dieselbrandstof, LPG en LNG.

³¹ M. ARESTA, A. DIBENEDETTO, A. ANGELINI, *Chem. Rev.* 114 (2014) 1709-1742.

De reacties voor de synthese van methanol en dimethylether vanuit CO₂ en H₂ verlopen als volgt:



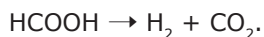
Verder kan methanol via zeoliet-katalyse worden omgezet tot lichte olefines (ethyleen en propyleen), BTX aromaten en allerhande koolwaterstoffen. Het is daarom een technologie die de brug maakt tussen methanol-ex-CO₂ en de klassieke petrochemische technologieën.³² In de huidige context is methanol vooreerst een geschikte bron van energie, en omwille van het beperkt explosiegevaar veel veiliger dan aardgas, waterstofgas en benzine. Methanoldampen zijn echter giftig en kunnen blindheid veroorzaken. Methanol is een eenvoudig transporteerbare vloeistof en heeft een hoge volumetrische energiedensiteit, dubbel zoveel als vloeibaar waterstof. Methanol heeft echter slechts ongeveer de helft van de volumetrische energiedensiteit van benzine en diesel. DME-dampen zijn zeer explosief (vandaar hun geschiktheid als diesel-substituut).

Synthetisch methaan (en andere lichte koolwaterstoffen), bekomen door reactie van CO₂ met waterstofgas, is equivalent met aardgas waarvoor de infrastructuur voor distributie via pijpleidingen reeds aanwezig is.

Occasioneel wordt in de literatuur gewag gemaakt van het gebruik van mierenzuur (methaanzuur), een zeer corrosieve vloeistof, als alternatieve brandstof of als energievecteur. Enkelen hebben in deze context reeds gesproken van een mierenzuur-gebaseerde economie. Via enkele niet altijd duurzame chemische stappen is mierenzuur afleidbaar van CO₂:

- CO₂ → (omgekeerde WGS) → CO; NaOH + CO → NaOOCH (Na-zout van mierenzuur); wordt uit zout vrijgezet (tot 80 % waterige oplossing) met zwavelzuur (en vorming van equivalente hoeveelheden Na₂SO₄)
- CH₃OH + CO → carbonylatie (iridiumkatalyse) → HCOOCH₃ (methylformiaat) → hydrolyse (H₂O) → HCOOH (mierenzuur) + CH₃OH.

Op voorwaarde dat een duurzame mierenzuursynthese ontwikkeld wordt, zou dit laatste als chemische energievecteur gebruikt kunnen worden. Door verhitting kan waterstofgas op geschikte wijze vrijgezet worden:



³² G. OLAH, G. SURYA PRAKASH, A. GOEPPERT, *J. Am. Chem. Soc.*, 133 (2011) 12881-12898.

De koolstofcyclus van de CO₂-neutrale wereld

Het kortsluiten van de koolstofenergiecyclus (**Kader 8**) via katalytische reductie van CO₂ tot brandstoffen kan een oplossing bieden voor het CO₂-emissieprobleem. Geproduceerd CO₂ dient dan te worden opgevangen en omgezet tot brandstoffen, chemicaliën en materialen. Het probleem is tweeledig en vergt een oplossing voor de CO₂-omzetting aan CO₂-puntbronnen en voor de diffuse CO₂-emissie, die beiden ongeveer even groot zijn (**Kader 5**). In een CO₂-neutrale wereldeconomie wordt fossiele koolstof niet langer als energiebron aangewend en is de koolstof-energiecyclus (**Kader 8**) op zijn kortst. Dan wordt alle door menselijke activiteit gevormde CO₂ meteen terug omgezet naar brandstoffen, chemicaliën en materialen zonder vrijzetten van extra CO₂ in de atmosfeer. Dit concept van "Carbon Capture and Utilisation" (CCU) geniet ook een gunstiger maatschappelijke acceptatie dan CCS.

In tegenstelling tot de natuurlijke koolstofcyclus, gebaseerd op de fotosynthese met atmosferische CO₂, en extreem trage conversie tot fossiele brandstoffen, dient de chemische koolstofcyclus uitgevoerd te worden met snelle chemische reductiereacties om een duurzame en veilige op koolstof en waterstof gebaseerde energiebron te genereren. Een dergelijk proces draagt substantieel bij aan de vermindering van de CO₂-uitstoot in de atmosfeer. De grootste uitdaging om dit doel te bereiken is evenwel het vinden van de enorme hoeveelheid (duurzame!) energie nodig om CO₂, het meest geoxideerde eindproduct van koolstofverbindingen, terug om te zetten naar brandstof en chemische bouwstenen. Ze moet worden aangeleverd onder vorm van fotonen, warmte bij hoge temperatuur, elektronen uit elektriciteit of chemische verbindingen.

De energie voor de huidige industriële chemische processen is meestal afkomstig van fossiele brandstoffen die in de toekomst zullen worden uitgesloten als bron van energie voor de conversie van CO₂ tot brandstoffen. Waterstofgas, dat in het hier geschetste toekomstig energiescenario een sleutelrol speelt, wordt momenteel voornamelijk geproduceerd uit steenkool of aardgas via "steam reforming" (reactie met stoom) en de WGS-reactie. Waterstofgas zal in de toekomst uit energiebronnen met lage CO₂-uitstoot moeten worden geproduceerd. Volgende energiestrategieën die quasi koolstofvrij zijn, kunnen uitgewerkt worden:

- Direct gebruik van zonnefotonen in artificiële fotosynthese. De omzetting van CO₂ (en water) tot synthesesgas, methanol, koolwaterstoffen, mierenzuur, met behulp van zonnefotonen kan enerzijds beroep doen op bestaande grootschalige duurzame katalytische technologie, terwijl een aantal stappen, waarvoor reeds intense research gebeurt, zich nog in het 'proof-of-concept' stadium bevinden.
- In de chemische industrie wordt het merendeel van de energie aangewend als thermische eerder dan als elektrische energie. Het gebruik van elektriciteit om CO₂ direct om te zetten tot nuttige chemicaliën is dan ook eerder beperkt tot bijvoorbeeld de elektrochemische omzetting van CO₂ tot methanol of mierenzuur.

- Watersplitsing is geschikt om waterstofgas te leveren met duurzame primaire energiebronnen. De omzetting van elektrische energie naar chemische energie in waterstofgas (H₂) gebeurt in geavanceerde elektrolytische cellen, met een efficiëntie van ongeveer 70 %.³³ De elektriciteitskost vertegenwoordigt 80 % van de kosten om waterstofgas langs deze weg te produceren. Deze technologie staat het dichtst bij grootschalige commercialisering. Watersplitsing in H₂ en O₂ via elektrolyse is een industrieel toegepaste techniek. In Denemarken wordt bijvoorbeeld een tijdelijk overschot aan windenergie gebruikt voor de elektrolyse van water; de gegenereerde waterstof wordt achteraf met brandstofcellen gebruikt voor elektriciteitsproductie, ofwel verder omgezet tot methaan.³⁴ De CO₂ opgevangen aan puntbronnen kan zo met behulp van dergelijk milieuvriendelijk geproduceerd H₂-gas katalytisch omgezet worden tot nieuwe brandstoffen.

Koolstof-vrij geproduceerd waterstofgas is geschikt om in een transitieperiode CO₂ aan puntbronnen om te zetten. Voor diffuse bronnen lijkt een chemische weg naar een oplossing momenteel minder evident. Elektrificatie van het wagenpark en overschakelen op CNG voor het vrachtvervoer op de weg zijn aangewezen. Voor de vervanging van kerosine als brandstof voor het luchtverkeer en de zware brandstof voor de scheepvaart is er nood aan nieuwe concepten. Voor klimaatregeling van gebouwen, de tweede grote bijdrage aan de diffuse CO₂-uitstoot, is de ontwikkeling van duurzame technologieën reeds in een zeer ver gevorderd stadium.

De bottleneck voor de CO₂-conversie aan puntbronnen is de grote behoefte aan elektriciteit uit energiebronnen met beperkte CO₂-uitstoot. Buiten de zon zijn er niet veel alternatieven voor grootschalige energievoorziening, tenzij via kernenergie, geothermische energie en getijdenenergie (**Kader 10**). Naast de lage CO₂-uitstoot van deze elektriciteitsproductie (zie Levenscyclusanalyses in **Kader 13**) biedt kernenergie ook mogelijkheden om waterstofgas te produceren. De mogelijkheden van kernenergie voor elektrolytische en thermochemische productie van waterstof worden onderzocht in het Europees SNETP initiatief (*Strategic Nuclear Energy Technology Platform*).

Elektrolyse van water kan zowel bij lage als hoge temperatuur uitgevoerd worden, maar is efficiënter bij hoge temperatuur gezien de stoomvorming. De huidige generatie kernreactoren kunnen lage-temperatuur-elektrolyse aan, maar dit is economisch onrendabel. Enkel in de daluren, wanneer de elektriciteitsvraag laag is, biedt dit mogelijkheden. Andere reactortypes zoals de *Gas Fast Reactor* (GFR) maken het mogelijk om hoge-temperatuur-elektrolyse van water uit te voeren. Veelbelovend is de nieuwe generatie van kernreactoren (generatie IV). De ontwikkeling van deze reactoren kadert in het strategisch SET plan (Strategic

³³ http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser_0-Logos_0_0.pdf.

³⁴ *Fuel Cells Bulletin* (3) 2014 8-9.

Energy Technology) van de Europese Commissie. Thermochemische splitsing van water tot waterstof- en zuurstofgas in "Very High Temperature Reactors" (temperaturen hoger dan 800 °C) wordt voorgesteld (zie hoger).

8 Technologie voor grootschalige CO₂-omzetting aan puntbronnen

Nood aan technologische ontwikkeling en wetenschappelijke doorbraak

Aangezien ongeveer 50 % van de wereldwijde totale CO₂-uitstoot gebeurt aan puntbronnen (**Kader 5**) en het energetisch voordeliger is te werken met geconcentreerde CO₂-stromen (**Kader 7**), is het logisch de CO₂ van puntbronnen eerst te capteren en te converteren. Het ontwikkelen van technologie om CO₂ op te vangen en om te zetten naar nuttige chemische verbindingen verdient hoge prioriteit. Grootschalige katalytische technologie voor methanolproductie uit CO/CO₂ en waterstofgas is beschikbaar in de petrochemie, mits eventuele re-engineering van bepaalde processtappen.

Voor de omzetting van CO₂ kunnen in principe ook tal van technieken aangewend worden, zoals chemokatalyse, elektrokatalyse, fotokatalyse, plasmatechnologie en biokatalyse. Hieronder worden enkele opkomende technologieën besproken en wordt de status waarin dit onderzoek en de industriële ontwikkeling zich bevinden toegelicht. **Kader 16** biedt een overzicht van de stand der techniek. Het merendeel van deze technologieën is nog niet commercieel beschikbaar, en sommige bevinden zich nog op laboratorium- of pilotschaal.

Productie van synthesegas

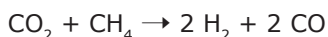
Synthesegas (CO en H₂) en korte olefinen zijn samen met aromaten de belangrijkste bouwstenen in de petrochemie. Synthesegas wordt industrieel gemaakt door vergassing van steenkool of uit aardgas (steam reforming). Met behulp van katalysatoren en thermische energie kan getracht worden om CO₂ om te zetten naar dit waardevolle synthesegas, dat verder kan worden omgezet tot brandstoffen en chemicaliën. In onderstaande wordt de dry reforming toegelicht, en de methanolsynthese, waarin synthesegas in een tussenstap wordt geproduceerd waarna methanol wordt geproduceerd.

Dry reforming

Dry reforming betreft de reactie van CO₂ en methaan, met vorming van waterstof en koolmonoxide. Ze kan rechtstreeks toegepast worden in rookgassen.³⁵ Twee

³⁵ C. SONG. *Catal. Today* 115 (2006) 2–32.

broeikasgassen worden tegelijkertijd omgezet met een netto reductie van broeikasgasemissies indien de benodigde energie afkomstig is van energiebronnen die weinig CO₂ produceren.³⁶



De reactie is zeer endotherm (vereist veel warmte) en vindt pas plaats bij hoge temperaturen (ongeveer 800 tot 1000°C). De onderzochte katalysatoren zijn vaak gebaseerd op nikkel.³⁷ Een nadeel van de technologie is dat zowel methaan als het geproduceerde CO omgezet kan worden tot vaste koolstof. Als deze afgezet wordt op het katalysatoroppervlak, deactiveert de katalysator. Implementatie van de laatste katalysator-design concepten, zoals stabilisatie van kleine nikkelmetaal-deeltjes met alkalimetaaloxides op de drager, laat vandaag toe deactivatie door koolstof-vorming te voorkomen. Deze technologie is echter momenteel nog niet commercieel beschikbaar. Alternatieve processen zoals Chemical Looping Reforming bieden de mogelijkheid om drie keer meer CO₂ om te zetten per kg CH₄ (CH₄ + 3 CO₂ -> 4 CO + 2 H₂O) en worden momenteel op laboratoriumschaal ontwikkeld.

Synthese van methanol

Omwille van de hoge energiedensiteit van methanol is dit een ideale kandidaat als toekomstige alternatieve brandstof. De synthese van methanol uit synthesegas is daarom zeer aantrekkelijk, mede omdat het reeds een commercieel proces is. Methanol kan ook gesynthetiseerd worden in een tweetrapsproces met behulp van twee opeenvolgende reactoren. In de eerste reactor wordt CO₂ omgezet tot CO via de omgekeerde WGS-reactie, waarna het water wordt afgescheiden. In een tweede reactor wordt methanol uit CO en H₂ geproduceerd. Ook de directe synthese van methanol uit CO₂ en H₂ wordt ontwikkeld. Door de ongunstiger evenwichtsconversie en het positief effect van de druk van de twee reactieven worden processen bij zeer hoge druk (500 atm) overwogen.

Elektro(kata)lyse

Met behulp van elektriciteit en een katalysator kan CO₂ omgezet worden tot méér gereduceerde verbindingen zoals CO, methaan, methanol, mierenzuur en andere chemische stoffen. Een typisch elektrochemisch systeem bestaat uit twee elektrodes: CO₂ en protonen worden aan de kathode omgezet tot de gewenste reactieproducten, en water wordt geoxideerd tot O₂ aan de anode. Dit proces kan gestuurd worden via de aangelegde elektrische potentiaal en de reactietemperatuur.

³⁶ S. YOKOTA, K. OKUMURA, M. NIWA. *Appl. Catal. A* 310 (2006) 122–126.

³⁷ D. PAKHARE, J. SPIVEY. *Chem. Soc. Rev.* 43 (2014) 7813–7837.

Vaak is er een hoge overpotential (d.w.z. verschil tussen de minimale thermodynamische potentiaal en werkelijke spanning) nodig om de reactie voldoende snel aan te drijven en het elektriciteitsverbruik is ook hoog. Indien de elektriciteit echter afkomstig is van CO₂-neutralere energievormen, biedt dit mogelijkheden om aan puntbronnen opgevangen CO₂ om te zetten tot brandstoffen.

Verskillende types van katalysatoren werden reeds getest voor deze reacties. Goudgebaseerde katalysatoren worden als standaard voor deze reactie beschouwd. Omwille van de kostprijs wordt er gezocht naar alternatieven. Zo werden momenteel al zilverkatalysatoren ontwikkeld die met 92 % selectiviteit CO₂ kunnen omzetten tot CO.³⁸ Het geproduceerde CO kan dan bijvoorbeeld in Fischer-Tropsch-syntheseprocessen aangewend worden. Zeer recent werd ontdekt dat ook veel goedkopere koper- en kobaltkatalysatoren gebruikt kunnen worden als elektrokatalysator.³⁹ Deze technologie wordt nog niet op grote schaal toegepast. Momenteel wordt er in IJsland met behulp van geothermische energie jaarlijks ongeveer 5 miljoen liter methanol geproduceerd: de geothermische energie wordt gebruikt om elektriciteit te produceren, waarbij H₂O en CO₂ via elektrolyse en hydrogenatie omgevormd worden tot synthese gas, dat vervolgens omgezet wordt in methanol.⁴⁰

Plasmatechnologie

Plasma, ook wel de vierde aggregatietoestand genoemd, is een geïoniseerd gas. Het wordt tot stand gebracht door inbrengen van warmte of elektrische energie in een gas. Daardoor gaat het gas opsplitsen in ionen en vrije elektronen. Er ontstaat ook een elektrisch veld waarin vooral de elektronen (door hun lage massa) worden versneld. Door botsingen met gasmoleculen en atomen vormen zich nieuwe deeltjes. Plasma is een "chemische cocktail" van atomen, moleculen, vrije elektronen en ionen, alsook geëxciteerde deeltjes, radicalen en fotonen. Hoewel plasma's nog niet commercieel worden ingezet voor CO₂-omzetting is deze technologie wel veelbelovend. Het gas zelf kan immers bij kamertemperatuur blijven, maar het reactiemedium wordt "geactiveerd" door de hoogreactieve deeltjes. Hierbij worden thermodynamisch ongunstige reacties, zoals CO₂-splijting in CO en O₂, synthese gasvorming of de synthese van methanol uit CO₂ en CH₄ mogelijk bij milde omstandigheden (atmosfeerdruk en kamertemperatuur) daar waar ze klassiek veel strengere reactieomstandigheden vereisen. Plasma kan opgewekt worden met elektriciteit, en bovendien snel aan- en uitgeschakeld worden. Het kan modulair worden ingebouwd en is ook veelbelovend voor

³⁸ Q. LU, J. ROSEN, Y. ZHOU, G.S. HUTCHINGS, Y.C. KIMMEL, J.G. CHEN, F. JIAO. *Nat. Commun.*, 2014, 5, 3242.

³⁹ <http://newscenter.lbl.gov/2015/08/27/soaking-up-carbon-dioxide-and-turning-it-into-valuable-products/>.

⁴⁰ <http://www.carbonrecycling.is/>.

de tijdelijke opslag van zonnefotonen en elektriciteit, bijvoorbeeld tijdens piekmomenten in de productie van duurzame energie. De energie-efficiëntie van plasmaprocessen (elektrische energie naar chemische energie) is momenteel nog vrij laag en het bijhorende elektriciteitsverbruik bijgevolg hoog.

Biokatalyse

Met biokatalyse kan vanuit CO₂ rechtstreeks een waaier aan chemische verbindingen worden geproduceerd, zoals de microbiële synthese van ethanol of methaan uit CO₂ en H₂. Eveneens gekend zijn de productieprocessen voor carbonzuren (met 1 tot 8 C-atomen) uit CO₂. De productie van mierenzuur, azijnzuur, propionzuur en boterzuur (1 tot 4 C-atomen) kan rechtstreeks gebeuren vanuit CO₂ met homoacetogene micro-organismen zoals *Clostridium ljundahlii* of *Moorella thermoacetica*. Dit kan ook rechtstreeks aangedreven worden door elektrische stroom in zogenaamde microbiële elektrosynthese, wat enkel nog maar op laboratoriumschaal bestaat. Om verder te gaan tot 6 à 8 C-atomen, wat attractieve precursoren zijn voor vloeibare brandstoffen via Kolbesynthese, wordt zogenaamde omgekeerde beta-oxidatie toegepast met *Clostridium kluyverii*, een proces dat reeds sinds de tweede wereldoorlog gekend is. Organismen zoals *Cupriavidus necator* worden momenteel op pilotschaal geëvalueerd voor de productie van polyhydroxyboterzuur, een biopolymeer. Dit proces loopt op afgassen uit de bioraffinage.

Fotokatalyse en artificiële fotosynthese

Daar waar in een klassieke verbrandingsreactie de brandstof en zuurstof reageren tot CO₂ en H₂O, doen planten en algen net het omgekeerde. Zij maken koolstofverbindingen uit CO₂ en H₂O met behulp van zonlicht via fotosynthese. Fotosynthetische CO₂-conversie door algen en cyanobacteriën is mogelijk. Deze verbruiken CO₂ en produceren olie, die geëxtraheerd kan worden en omgezet in brandstoffen en chemicaliën. Algen worden meestal in open vlaktes of in fotobioreactoren gekweekt, met behulp van zowel zonlicht als kunstlicht. Voordelen zijn de hoge productiviteit per oppervlakte en het feit dat er geen bijkomende energie voor het kweken van de algen nodig is. Echter, ook voor deze techniek zijn er verschillende uitdagingen: er is veel energie nodig om de algen te "ontwateren" en de olie te extraheren. In open vlaktes is er een aanzienlijk verlies door verdamping, wat een constante waterflux vereist. Zowel de energie-efficiëntie (zonne-energie naar chemische energie) als de productiviteit (kg biomassa/m³ s) voor fotosynthetische processen zijn lager dan voor (elektro)chemische processen.

Veel onderzoek wordt besteed om natuurlijke fotosynthetische systemen na te bootsen ('artificiële fotosynthese') om op deze manier brandstoffen uit CO₂ te maken met nagestreefde rendementen superieur aan deze in de natuur. De reductie van CO₂ kan leiden tot verschillende producten zoals CO, methanol of methaan.

In fotokatalytische systemen valt het licht op een halfgeleidermateriaal. Hierdoor ontstaan elektronen en gaten die naar het oppervlak migreren, waar ze de energie leveren voor oxidatie- en reductiereacties. In foto-elektrochemische systemen zijn de oxidatie- en reductie reacties ruimtelijk gescheiden. Enkel met zeer dure fotovoltaïsche elementen en katalysatoren benadert de efficiëntie die van fotovoltaïsche panelen. Met courante materialen is het rendement van de omzetting van zonlicht naar zonnebrandstof nog ver van competitief.

| Techniek | Maturiteit ^a | Benodigde tijd tot eerste commercialisatie in jaren |
|---|-------------------------|---|
| Synthese van polycarbonaten en polyolen | D | 5 |
| Methanolsynthese via directe hydrogenatie van CO ₂ | D | 5 |
| Methanolsynthese via indirecte hydrogenatie van CO ₂ | L-P | 8-10 |
| Synthese van brandstoffen via indirecte hydrogenatie | L-P | 8-10 |
| Synthese van anorganische carbonaten via mineralisatie | D | > 10 |
| Carbonatatie van beton | P-D | 5-10 |
| Dry reforming | P | < 10 |
| Elektrolytische synthese van mierenzuur | L-P | > 10 |
| Fotokatalyse & foto-elektrokatalyse | L | > 10 |
| Synthese van syngas | P | < 10 |
| Plasmatechnologie | L | > 10 |
| Biokatalyse | D | 5 |

^a, L = laboratoriumschaal; P = pilotschaal; D = industriële demonstratie.
Bron: <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/valorisation-chimique-co2-etat-lieux-2014-rapport-final.pdf>

Kader 16: Mogelijke technologieën voor synthese van brandstoffen uit opgevangen CO₂ aan puntbronnen

9 Conclusies en aanbevelingen

Aanbeveling 1. De eindigheid van de fossiele koolstofreserves is geen imminent probleem gezien de immense omvang van de voorraden en de tijdschaal van honderden jaren waarop het probleem van uitputting zich zal stellen. Een veel acuter probleem is de almaar stijgende CO₂-concentratie in de atmosfeer die de klimaatsverandering veroorzaakt. Maximale inspanningen om deze CO₂-concentratie in de atmosfeer te verlagen dienen uitgestippeld te worden.

Aanbeveling 2. Niet de CO₂-productie *in se* maar de lozing van dit broeikasgas in de atmosfeer moet drastisch worden teruggedrongen om de klimaatdoelstellingen te halen. Vermijden van productie van dit broeikasgas is immers niet haalbaar. In de onmisbare koolstofeconomie hebben koolstofhoudende verbindingen omwille van hun uitzonderlijke energiedensiteit en materiaaleigenschappen blijvend hun plaats. Met de onvervangbaarheid van koolstofverbindingen in ontelbare producten kan CO₂-productie niet worden vermeden. De wereld moet evolueren naar een gemengde koolstof-waterstof-economie. In dergelijk scenario is het vermijden van de (netto) lozing en verspreiding van antropogene CO₂ in de atmosfeer haalbaar.

Aanbeveling 3. "Carbon Capture and Storage" (CCS) aan puntbronnen, die verantwoordelijk zijn voor de helft van de CO₂-lozing in de atmosfeer, is een tijdelijke maar noodzakelijke tussenmaatregel op het pad naar een CO₂-neutrale wereld. CCS verdient aanbeveling op Europees niveau. Voor Vlaanderen met zijn dichte populatie en sterke industrialisatie en beperkt oppervlak is CCS wellicht minder aangewezen voor een grootschalige implementatie. De geringe maatschappelijke aanvaarding van CCS is een uitdaging voor het beleid.

Aanbeveling 4. Levenscyclusanalyse (LCA) en bepaling van de CO₂-voetafdruk zijn onontbeerlijke instrumenten om energieproductiesystemen correct op hun milieueffect te evalueren. Alle energiebronnen, ook de zogenaamd hernieuwbare, hebben een significante CO₂-emissie omwille van de verbruikte materialen, transport en onderhoud. Voor de transitie van een op fossiele koolstof gebaseerde economie naar een economie met alternatieve energievormen dient het beleid de uitstoot van CO₂ per geproduceerde kWh eveneens als criterium te hanteren.

Aanbeveling 5. Het onderscheid tussen hernieuwbare en niet-hernieuwbare energie werkt contraproductief voor het uitwerken van oplossingen. Integratie van energieopwekkingsystemen, eerder dan geleidelijke vervanging van niet-hernieuwbare door hernieuwbare, is de aangewezen weg naar een CO₂-neutralere wereld. Voor CO₂-captatie en zijn omzetting in hernieuwbare koolstofhoudende energiedragers in grootschalige industriële installaties dient de koolstofcyclus te worden kortgesloten door het inzetten van energiebronnen die weinig CO₂-emissies veroorzaken (zoals zonne-energie, windenergie, getijdenenergie, geothermische energie en kernenergie).

Aanbeveling 6. Algemene belasting van de CO₂-uitstoot is noodzakelijk om de investeringen in CO₂-recuperatie en katalytische omvorming tot hernieuwde energiedragers economisch rendabel te maken. Er is bijvoorbeeld geen wetenschappelijke basis voor het onderscheiden van hernieuwbare koolstof uit biomassa en fossiele bronnen. Elk koolstofatoom uit biomassa – vers of fossiel – wordt uiteindelijk een CO₂-molecule in de atmosfeer na doorlopen van de levenscyclus. Alle uitgestoten CO₂, ongeacht de herkomst, dient op eenzelfde basis behandeld te worden. Algemene taxatie is een eenvoudiger en transparanter model dan selectieve subsidiëring zoals bijvoorbeeld met groenestroomcertificaten. Het dient met voortschrijdend inzicht voortdurend bijgesteld.

Aanbeveling 7. Het dicht netwerk van chemische industrie in Vlaanderen dient aangegrepen te worden om een voortrekkersrol spelen in de ontwikkeling en het uitrollen van CCU (Carbon Capture and Utilization) cycli. Vlaanderen heeft in zijn geschiedenis reeds verschillende malen een pioniersrol gespeeld, zoals in de ontwikkeling van intensieve landbouw in de 18^{de} eeuw, de industrialisatie van de textielsector in de 19^{de} eeuw en de uitbouw van een wereldpositie voor de chemische industrie (cfr. haven van Antwerpen) in de 20^{ste} eeuw. De uitdaging voor de 21^{ste} eeuw is evident.

Aanbeveling 8. Voor klimaatregeling van gebouwen (verwarming en airconditioning), de tweede grote bijdrage aan de diffuse CO₂-productie, is de ontwikkeling van duurzame technologieën reeds zeer ver gevorderd. Implementatie moet onverwijld worden doorgezet. De productie van isolatiematerialen vanuit fossiele grondstoffen produceert CO₂, maar vermindert energieverbruik. De netto impact houdt in dat voor elke CO₂-molecule die wordt uitgestoten in de productie van isolatiematerialen, er nu reeds drie of meer bespaard worden in hun toepassing. Wij verwijzen naar het Standpunt *Energiezuinig (ver)bouwen* van de Academie, gepubliceerd in oktober 2015.

Aanbeveling 9. Het ontwikkelen van technologieën om CO₂ op te vangen en om te zetten tot nuttige brandstoffen, chemische bouwstenen en materialen verdient hoge prioriteit. Voor de vervanging van kerosine voor het luchtverkeer en de zware brandstof voor de scheepvaart is er nood aan nieuwe wetenschappelijke doorbraken. Wetenschappelijk onderzoek in deze richtingen moet worden aangemoedigd.

Aanbeveling 10. Gezien de gigantische opdracht die voor ons ligt, is het ook bijzonder belangrijk dat de economische aspecten van alle voorgestelde technologieën grondig worden geanalyseerd vooraleer men keuzes maakt op een grotere schaal, dit in het bijzonder in het belang van het bereiken van een globale oplossing.

Samenstelling van de werkgroep

Johan Martens (KNW, KU Leuven)

Annemie Bogaerts (KNW, UAntwerpen)

Norbert De Kimpe (KNW, UGent)

Pierre Jacobs (KNW, KU Leuven)

Guy Marin (KTW, UGent)

Korneel Rabaey (Jonge Academie, UGent)

Mark Saeys (UGent)

Sebastian Verhelst (UGent)

KNW = Klasse Natuurwetenschappen

KTW = Klasse Technische Wetenschappen

Dankwoord

De auteurs van dit werk zijn de heer Tim Lacoere erkentelijk voor het grafisch ontwerp en de opmaak van de figuren in kaders 4, 8 en 9, die de tekst verhelderend illustreren.

Dank aan de heren Jan Kretzschmar, Luc Sterckx en Stan Ulens (Reflectiegroep Energie) voor hun constructieve feedback. De heer Steven Heylen willen we danken voor het opzoekwerk van cijfergegevens.

Bijzondere dank gaat uit naar de heer Bert Seghers van KVAB voor de organisatie en opvolging van de werkvergaderingen en redactionele optimalisatie, en naar mevrouw Nathalie Boelens en mevrouw Inez Dua.

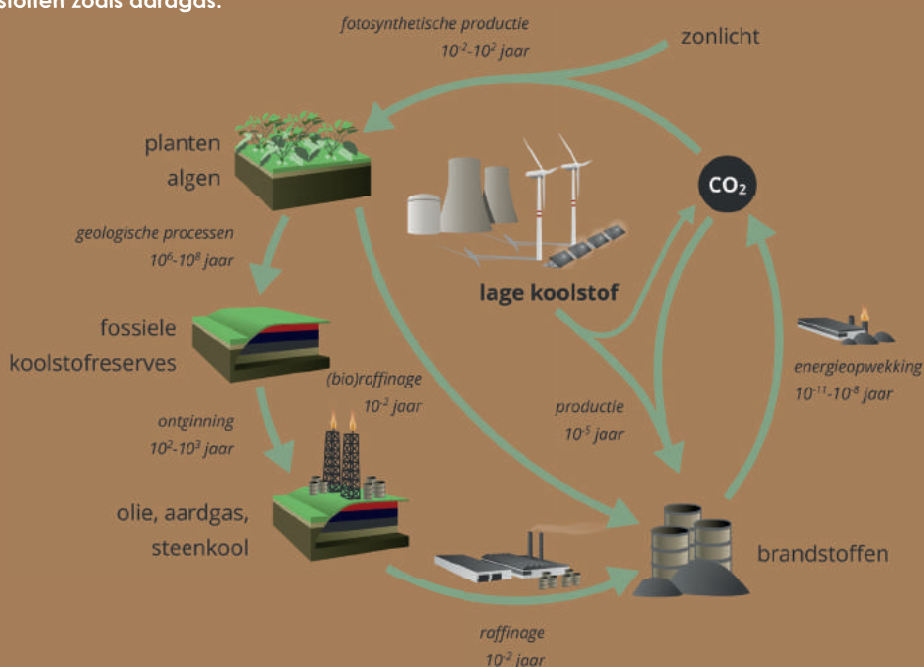
RECENTE STANDPUNTEN (vanaf 2013)

17. Hendrik Van Brussel e. a. – *De maakindustrie, motor van welvaart in Vlaanderen*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2013.
18. Hubert Bocken (ed.) – *De gerechtelijke hervorming. Een globale visie*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2013.
19. Georges Van der Perre, Jan Van Campenhout e.a. – *Van Blended naar Open Learning? Internet en ICT in het Vlaams hoger onderwijs*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2013.
20. Jan Velaers – *Federalisme/confederalisme, en de weg er naar toe...*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2013.
21. Karel Velle – *Archieven, de politiek en de burger*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2013.
22. Etienne Aernoudt, Dirk Fransaeer, Egbert Lox, Karel Van Acker – *Dreigende metaalschaarste? Innovaties en acties op weg naar een circulaire economie*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2014.
23. Roger Marijnissen, Francis Strauven – *Voor een verantwoord beheer van ons kunstpatrimonium*, KVAB/Klasse Kunsten, 2014.
24. Jan Eeckhout, Joep Konings – *Jeugdwerkloosheid*, Denkersprogramma Klasse Menswetenschappen, 2014.
25. Pascal Verdonck e. a. – *Medische Technologie, als motor voor innovatieve gezondheidszorg*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2014.
26. Charles Hirsch, Erik Tambuyzer e. a. – *Innovatief ondernemerschap via spin-offs van kenniscentra*, KVAB/Klassen Natuurwetenschappen en Technische wetenschappen, 2014.
27. Giovanni Samaey, Jacques Van Remortel e. a. – *Informaticawetenschappen in het leerplichtonderwijs*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen en Jonge Academie, 2014.
28. Paul Van Rompuy – *Leidt fiscale autonomie van deelgebieden in een federale staat tot budgettaire discipline?* KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2014.
29. Luc Bonte, Paul Verstraeten e. a. – *Maatschappelijk verantwoord ondernemen. Meedoen omdat het moet, of echt engagement?* KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2014.
30. Piet Van Avermaet, Stef Slembrouck, Anne-Marie Simon-Vandenbergen – *Talige diversiteit in het Vlaams onderwijs: problematiek en oplossingen*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2015.
31. Jo Tollebeek – *Metamorfozes van het Europese historisch besef, 1800-2000*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2015.
32. Charles Hirsch, Erik Tambuyzer e.a. – *Innovative Entrepreneurship via Spin-offs of Knowledge Centers*, KVAB/Klassen Natuurwetenschappen en Technische wetenschappen, 2015.
33. Georges Van der Perre en Jan Van Campenhout (eds.) – *Higher education in the digital era. A thinking exercise in Flanders*, Denkersprogramma KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2015.
34. Georges Van der Perre, Jan Van Campenhout e.a. – *Hoger onderwijs voor de digitale eeuw*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2015.
35. Hugo Hens e. a. – *Energiezuinig (ver)bouwen: geen rechttoe rechtaan verhaal*, KVAB/Klasse Technische wetenschappen, 2015.
36. Marnix Van Damme – *Financiële vorming*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2015.
37. Els Witte – *Het debat rond de federale culturele en wetenschappelijke instellingen (2010-2015)*, KVAB/Klasse Menswetenschappen, 2015.
38. Irina Veretennicoff, Joos Vandewalle e.a. – *De STEM-leerkracht*, KVAB/Klasse Natuurwetenschappen en Klasse Technische wetenschappen, 2015.

De volledige lijst met standpunten en alle pdf's kunnen worden geraadpleegd op www.kvab.be/standpunten

DE CHEMISCHE WEG NAAR EEN CO₂-NEUTRALE WERELD

Koolstofdioxide (CO₂) ontstaat door verbranding van biomassa en van fossiele brandstoffen. De actueel te hoge CO₂-emissie is in essentie een timingprobleem: brandstoffen worden op enorme schaal verbrand waardoor in een fractie van een seconde de koolstofverbindingen terug omgezet worden in CO₂ en H₂O. Het natuurlijke proces om uit CO₂ opnieuw bruikbare stoffen te maken is daarentegen traag tot uiterst traag. Bovendien is de globale uitstoot van CO₂ vandaag groter dan wat de natuur kan opvangen. Door de broeikaswerking van CO₂ stijgt de temperatuur op aarde. Onze generatie staat voor de verantwoordelijkheid om deze stijging van CO₂-concentratie halt toe te roepen. In een CO₂-neutrale wereld wordt de uitgestoten CO₂ opgevangen vooraleer die in de lucht terecht komt en gerecycleerd tot nieuwe bruikbare grondstoffen, met speciale aandacht voor brandstoffen zoals aardgas.



De industriële Vlaamse CO₂-emissies komen hoofdzakelijk uit een 200-tal schoorstenen van elektriciteitscentrales, raffinaderijen, en industriële ovens. Door chemische technologie kan deze CO₂ afgevangen en terug omgezet worden in nuttige verbindingen. Hiervoor is weliswaar veel, soms zeer veel energie nodig, die van alternatieve energiebronnen (die geen CO₂ uitstoten) moet komen. Verschillende technologieën worden hiervoor ontwikkeld en kunnen op fermijn bijdragen tot de oplossing van de CO₂- en klimaatproblematiek.

Dit Standpunt kwam tot stand dankzij een werkgroep binnen de schoot van de Klasse Natuurwetenschappen van de KVAB. De auteurs zijn Johan Martens (KVAB, KU Leuven, werkgroepvoorzitter), Annemie Bogaerts (KVAB, UAntwerpen), Norbert De Kimpe (KVAB, UGent), Pierre Jacobs (KVAB, KU Leuven), Guy Marin (KVAB, UGent), Korneel Rabaey (Jonge Academie, UGent), Mark Saeys (UGent) en Sebastian Verhelst (UGent).