



Het CO₂ Probleem

Een paper over het verminderen van CO₂ in de
atmosfeer

Rogier van Voorden
In opdracht van Joris Voorhoeve
SEN Foundation
Mei 2013

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	2
Inleiding	3
Oplossingen die meteen toepasbaar zijn	3
Uitstoot van CO ₂ door fabrieken	3
Algen en Kroos.....	4
Gebruik van Mineralen.....	5
Fabriceren van Plastic	5
Gebruik van Oceanen	6
Ideeën voor de Toekomst.....	7
Oplosmiddelen en fijne chemicaliën	7
CO ₂ laten reageren met koper.....	7
Bacteriën die CO ₂ eten.....	8
Conclusie	8
Literatuur	9
Bijlagen	11

Inleiding

De temperatuur op aarde stijgt de afgelopen decennia gestaag. Deze temperatuurstijging wordt mede veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen. Door broeikasgassen in de atmosfeer kan de warmte van zonnestrallen minder goed worden afgevoerd. De lucht wordt vervuild door verschillende broeikasgassen. Als men het over broeikasgassen heeft zijn koolstofdioxide, methaan, stikstofdioxide en zwaveldioxide de bekendste.

Koolstofdioxide (CO₂) is een stof die de afgelopen jaren steeds meer wordt uitgestoten in de atmosfeer. Er is een explosieve groei van CO₂ - uitstoot door vele oorzaken. Vooral kolen- en gascentrales stoten veel CO₂ uit. Inmiddels is de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer gestegen tot 400 ppm (parts per million). Deze concentratie is nog nooit zo hoog geweest volgens onderzoekers (Monastersky, 2013). Doordat de zware industrie, verkeer en vervoer, verwarming en elektriciteit de atmosfeer blijft vervuilen, wordt er de laatste jaren meer aandacht besteed aan manieren om de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer te verminderen.

Door de technologische ontwikkelingen die zich voor hebben gedaan in de chemie en natuurwetenschappen zijn er meer mogelijkheden met het CO₂ atoom dan vroeger. Het CO₂ atoom zit chemisch gezien lastig in elkaar. Het atoom reageert niet met andere stoffen onder normale omstandigheden en is daardoor moeilijk te gebruiken in de chemie. Door de explosieve stijging van het aantal deeltjes CO₂ in de atmosfeer zijn er maatregelen nodig om CO₂ in de atmosfeer te verminderen (Monastersky, 2013). In deze paper worden technieken besproken die men zou kunnen gebruiken om de CO₂ in de atmosfeer te verminderen. Daarnaast worden een aantal mogelijkheden beschreven die er veelbelovend uitzien, maar nog wel verder onderzoek vergen.

Oplossingen die meteen toepasbaar zijn

Hieronder zullen een aantal oplossingen worden besproken waarmee het CO₂-probleem aangepakt kan worden. De meeste oplossingen vallen onder de Carbon Capture Utilisation (CCU) techniek. Bij deze term hoort een drietal oplossingen waarmee de CO₂ in de atmosfeer wordt verminderd. CCU ziet mogelijkheden bij fabrieken, algen/kroos en mineralen. Men moet hier denken aan fabrieken in de zware industrie. Vermindering van fossiele brandstoffabrieken kunnen worden gebruikt om de uitstoot van CO₂ te beperken. Aangezien fossiele brandstoffabrieken over een hoge CO₂-uitstoot beschikken, liggen hier de meeste mogelijkheden.

Uitstoot van CO₂ door fabrieken

In de zware industrie wordt veel CO₂ uitgestoten, omdat CO₂ vrijkomt bij verbranding van fossiele energie. Met CO₂ kon tot op heden weinig gedaan worden, vooral doordat het CO₂ atoom al verzadigd is en daardoor moeilijk kan worden hergebruikt. Tevens is CO₂ een atoom waar weinig tot geen energie inzit (BMBF, 2009, 7). Toch zijn in de laatste jaren door technologische ontwikkelingen nieuwe mogelijkheden ontstaan om CO₂ te scheiden van andere restproducten. Hierdoor wordt voorkomen dat de CO₂ rechtstreeks in de atmosfeer verdwijnt.

Onderzoekers hebben aangetoond dat met behulp van nieuwe technologieën CO₂ uit het verbrandingsproces bij fabrieken kan worden gehaald. Door aan het verbrandingsproces extra katalysatoren toe te voegen, wordt het CO₂ atoom gebonden aan andere atomen waardoor een geheel nieuwe atoom wordt gecreëerd. Katalysatoren zorgen ervoor dat bepaalde atomen zich aan elkaar binden of juist loslaten. Hierdoor kunnen nieuwe scheikundige verbindingen worden gevormd waardoor de CO₂ wordt opgenomen binnen een andere stof die minder schadelijk is of hergebruikt kan worden.

Een voorbeeld hiervan zijn de staalfabrieken. Bij het proces waarin ijzer en staal wordt gefabriceerd, wordt gebruik gemaakt van ijzererts die een grote hoeveelheid zuurstof bevat. Door ijzererts te laten reageren met waterstof (H₂) en koolstofmonoxide (CO) wordt water (H₂O) en koolstofdioxide (CO₂) gecreëerd. Het is onderzoekers gelukt om tijdens deze reactie de CO₂ apart te houden van de andere stoffen. De CO₂ die vroeger zou worden uitgestoten door al het restafval te verbanden wordt nu voor

90-95% opgevangen. Hierdoor kan de CO₂ worden gebruikt voor andere doeleinden (IPCC, 2005, 112).

Vanzelfsprekend kunnen geen extra installaties bij elke fabriek die veel CO₂ uitstoot worden geplaatst. Strying & Jansen (2011) raden wel aan dat bij elke bouw van nieuwe fabrieken die veel CO₂ uitstoten nagedacht moet worden of er voldoende ruimte is voor faciliteiten waar CO₂ kan worden opgeslagen. Onderzoekers verwachten dat met de scheiding van CO₂ in de zware industrie ongeveer twee tot drie miljoen ton CO₂ minder zal worden uitgestoten in de atmosfeer (BMBF, 2009, 7).

Algen en Kroos

De natuur zorgt zelf voor benutting van CO₂ via een aantal middelen. Fotosynthese is er daar één van. Met behulp van licht, water, mineralen en CO₂ maken planten koolhydraten aan. Hiervoor wordt door de planten CO₂ vanuit de atmosfeer gebruikt. Door de enorme uitstoot van CO₂ is het natuurlijk evenwicht verstoord en neemt de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer alleen maar toe (BMBF, 2009, 11).

Onderzoekers willen gebruik maken van deze natuurlijke manier om CO₂ uit de atmosfeer te zuiveren. Met name algen en kroos zijn erg geschikt om op grote schaal CO₂ uit de atmosfeer op te nemen. Algen en kroos zijn vooral geschikt om de volgende redenen:

- Algen en kroos hebben een hoge biodiversiteit. Men kan uit veel verschillende soorten algen en kroos kiezen (BMBF, 2009, 11).
- Algen en eendenkroos hebben een hoge productiviteit. Doordat beide organismen een hoge stofwisseling hebben, groeien ze erg snel in een korte tijd. Waar normale planten dagen over doen, doen algen en kroos in een paar uur. Dit komt omdat de fotosynthese in het gehele plantje wordt doorgevoerd, in vergelijking met normale planten waar 10 tot 40% van de massa van de plant wordt gebruikt voor de fotosynthese (BMBF, 2009, 11).
- Algen en kroos leven in zowel zoet als in brak en zout water. Hierdoor kunnen algen en kroos over de hele wereld worden gekweekt (BMBF, 2009, 11).

Deze voordelen zorgen er samen ervoor dat algen en kroos op grote schaal ingezet zouden kunnen worden. Doordat 70% van de aarde bestaat uit water zouden grote drijvende eilanden van algen en kroos kunnen worden gecreëerd. Deze eilanden zouden enorme hoeveelheden CO₂ uit de atmosfeer kunnen halen. Onderzoekers hebben aangetoond dat een eiland van 40 vierkante kilometer, één megaton CO₂ per jaar uit de atmosfeer kan halen (BMBF, 2009, 8). Na ongeveer 4 weken sterven de algen en kroos. Dan komt de CO₂ weer vrij door natuurlijke afbraak. De kunst is dus, van algen en kroos andere producten te maken. Interessant gegeven is ook dat zo'n tapijt van algen snelle verdamping tegengaat.

In Nederland wordt door meerdere bedrijven al gewerkt met kroos. Door het kroos met rijk CO₂ gas te voeden, groeit het explosief. Het kroos wordt vervolgens geoogst en gebruikt als plantaardige eiwitbron. Ook wordt het kroos gebruikt als voer voor koeien. Doordat koeien kroos in plaats van soja eten scheelt dit de boer enorm in de kosten omdat kroos vanuit Nederland wordt aangeleverd, terwijl soja uit Zuid-Amerika naar Nederland komt. Ook de uitstoot van CO₂ door koeien vermindert drastisch als koeien kroos eten in plaats van soja (Algaecom, 2013).

Als men ervoor kan zorgen dat kroos de vaste voedingsbron wordt in veevoer, heeft dit ook gevolgen voor het regenwoud in Zuid-Amerika (Trouw, 2010). Boeren hoeven geen regenwoud meer te kappen om soja-akkers te creëren. Ook minder vervoer van soja naar Nederland levert een bijdrage aan het verminderen van de CO₂-productie in de wereld (Westerbeek van Eerten, 2010).

De vraag blijft wel of het produceren van kroos als voedingsbron economisch rendabel is. Bedrijven proberen te onderzoeken waar kroos nog meer voor kan worden ingezet. Een aantal Nederlandse bedrijven gebruikt kroos om biogas te ontwikkelen. Koeienmest wordt omgezet in biogas en het afvalproduct van vergisting zorgt weer voor de groei van mineralen waar kroos weer van groeit. De

boeren zijn dus ook van de schadelijke mest af met deze oplossing. In dit systeem kan een perfecte kringloop worden gevormd om CO₂ te benutten (Westerbeek van Eerten, 2010).

Gebruik van Mineralen

Naast het scheiden van CO₂ in de zware industrie en het gebruik van algen en kroos is het toevoegen van mineralen aan CO₂ ook een mogelijkheid om de CO₂ in de atmosfeer te verminderen. Het gebruiken van mineralen om de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer te verminderen wordt ook wel minerale koolstofbinding genoemd (IPCC, 2005, 322). In deze gesteenten zijn calciumoxide (CaO) en magnesiumoxide (MgO) te vinden. Er vindt een chemische reactie plaats tussen deze stoffen en de CO₂. Hieruit ontstaat calciumcarbonaat (CaCO₃, beter bekend als kalksteen) en magnesiumcarbonaat (MgCO₃). Na de chemische reactie zal de CO₂ niet langer worden uitgestoten in de atmosfeer, maar de CO₂ blijft veilig opgeslagen in de nieuwe chemische verbinding (CO₂Chem, 2012, 23).

Voorbeelden van gesteenten waar chemische reacties mee kunnen worden uitgevoerd zijn olivijn (MgSiO₄) en wollastoniet (CaSiO₃). Deze gesteenten komen over de hele wereld voor. In de natuur komt minerale koolstofbinding ook voor, maar dit proces voltrekt zich langzaam. Men probeert dit natuurlijke proces te versnellen door extra verhitting, het verhogen van druk of het vooraf prepareren van de mineralen. Tijdens de chemische reactie komt een exo-energetische reactie vrij (warmte) (CO₂Chem, 2012, 23). Het voordeel van de exo-energetische reactie is dat er geen extra energie nodig is om de chemische reactie in gang te zetten. Daarnaast kan deze warmte nog worden gebruikt voor andere chemische doeleinden (Strying & Jansen, 10, 2011).

Meerdere onderzoeken wijzen uit dat alle uitstoot van CO₂ door fossiele brandstoffen in de gehele atmosfeer kunnen worden bestreden met deze methode (bijlage 2). Er is genoeg gesteente verspreid over de hele wereld. De technologische ontwikkeling laat het toe en het kost geen extra energie (IPCC, 2005). Tevens zou men moeten kijken of de geproduceerde stoffen nuttig gebruikt zouden kunnen worden.

Fabriceren van Plastic

Wetenschappers kunnen sinds een aantal jaar plastic op een milieuvriendelijke manier ontwikkelen. Doordat wereldwijd gebruik wordt gemaakt van plastic is dit ook een interessante optie om CO₂ in te verwerken. Polymeren, polycarbonaten en polyesters worden onder meer gebruikt om verschillende soorten plastic te maken. Polymeren bestaan oorspronkelijk uit olie, maar door de huidige technologische ontwikkeling is het sinds kort mogelijk geworden om polymeren te creëren met behulp van koolstofdioxide (CO₂). Door CO₂ te laten reageren met andere polymeren kunnen hele nieuwe scheikundige verbindingen worden gecreëerd (CO₂Chem, 2012, 16).

Naast het combineren van CO₂ met polymeren kan CO₂ ook worden gecombineerd met glycerol (een bijproduct bij het creëren van biodiesel). Aan de chemische reactie die ontstaat uit glycerol en CO₂ kunnen polycarbonaten en polyester worden onttrokken. Polycarbonaten kunnen, als men ze combineert met andere polymeren, dienen als veiligheidsmaterialen in de bouw. Door CO₂ te gebruiken in het chemische bindingsproces kunnen sterkere verbindingen worden gecreëerd (CO₂Chem, 2012, 16).

De mogelijkheid om van CO₂ plastic te maken is in de laatste jaren door verschillende onderzoekers opnieuw aangetoond. Doordat CO₂ nu nog vooral als afvalstof of bijproduct wordt gezien is de commerciële waarde vrij laag. Inmiddels ontstaan bedrijven die zich specialiseren in het gebruik maken van de mogelijkheden van CO₂. Een bedrijf wat voorop loopt op het gebied van het produceren van plastic uit CO₂ is Novomer.

Novomer ontwikkelt verschillende polymeren die ook voor verschillende doeleinden worden gebruikt. Door verschillende katalysatoren toe te voegen aan het proces kunnen verschillende soorten plastic ontwikkeld worden. Men kan hierbij denken aan plastic flessen en verpakkingsmateriaal. Naast plastic kan Novomer ook verf, lijm en schuim maken met CO₂.

Novomer is in 2009 al begonnen met het commercialiseren van CO₂. Onderzoekers van Novomer kregen voldoende financiële ruimte en tijd om CO₂ te gebruiken als basisingrediënt om naast polyethers en polyesters een nieuwe vorm van polymeren te ontwikkelen (bijlage 3). Door CO₂, epoxide en een speciaal ontwikkelde katalysator te mengen wordt polipropyleen carbonaat (PPC) ontwikkeld (Patel, 2007). Deze nieuwe groep polymeren is sterker en vele malen duurzamer dan polyethers of polyesters volgens Novomer (2013).

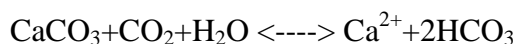
Om dit alles te stimuleren steunt het Amerikaanse ministerie van Energie Novomer met 25 miljoen dollar voor verder onderzoek. Ook multinationals hebben interesse getoond. DSM is een van de bedrijven die een nauwe band heeft met Novomer. Mede door deze steun is het Novomer gelukt om polipropyleen carbonaat (PPC) vanuit het laboratorium te commercialiseren. Samen met partners uit de chemische industrie wordt nu gekeken in welke producten PPC kan worden gebruikt (Novomer, 2013). Novomer verwacht dat binnenkort de producten al te vinden zijn in de winkels (RSC Advancing the Chemical Sciences, 2010).

Gebruik van Oceanen

Oceanen kunnen ook een deel van oplossing zijn waarmee het CO₂ probleem wordt opgelost. Oceanen vormen een natuurlijke opslag van CO₂. Oceanen hebben een eigen biologische pomp om CO₂ uit de atmosfeer te zuiveren. De CO₂ wordt meegenomen in verschillende zeestromen en belandt, gebonden aan andere stoffen, op de bodem van de oceaan. Na honderden jaren wordt dit slib weer omhoog gedreven en dient als voedsel voor plankton en micro-organismen. Het plankton zorgt door middel van fotosynthese voor zuurstof en algen in het water. Als deze algen en plankton worden opgegeten door andere dieren die leven in de oceaan, nemen zij de CO₂ in hun lichaam op. Nadat de dieren zijn doodgegaan en zij op de bodem van de oceaan belanden, begint het hele proces opnieuw (Science Daily, 2010).

Dit natuurlijke proces was in eerste instantie voldoende om de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer te verminderen. Door de verregaande industrialisatie kunnen oceanen de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer minder goed verwerken. De CO₂ bindt zich met het water (H₂O) van de oceaan, en vormt een diwaterstofcarbonaat (H₂CO₃). Omdat de oceanen zoveel CO₂ opnemen verzuren zij langzamerhand. Dit proces wordt carbonatie genoemd. Het gevolg is dat steeds minder dieren, koraal en planten voorkomen in de oceanen. **NB: connectie met Water**

Volgens Rau (2010) kan kalksteen bijdragen om verzuring van oceanen tegen te gaan. Door kalksteen te laten reageren met CO₂ en water (H₂O) ontstaat calcium bicarbonaat.



Calcium bicarbonaat kan gebruikt worden om de verzuring in de oceaan tegen te gaan. Bij deze reactie verdwijnt 97 procent van de CO₂ in de nieuw ontstane stof (Chemical Reactivity, 2011). Door kalksteen in de oceaan te dumpen zullen oceanen veel sneller de CO₂ kunnen opnemen dan via de biologische pomp.

Rau (2010) stelt voor om deze techniek te gebruiken bij fossiele brandstoffabrieken die dicht bij een oceaan zijn gebouwd. Door CO₂ en kalksteen meteen bij de fabriek met elkaar te laten reageren, wordt de uitstoot van fossiele brandstoffen drastisch beperkt. Deze oplossing is in vergelijking met het chemisch openbreken van het CO₂ atoom vele malen goedkoper en gemakkelijker uit te voeren (Stark, 2003).

Een andere mogelijkheid om de oceaan meer CO₂ op te laten nemen is het dumpen van ijzer in de oceaan. John Martin: (1988) "Give me a half tanker of iron, and I will give you an ice age". Deze uitspraak werd in de jaren 90 door meerdere onderzoekers ondersteund. Jarenlang onderzoek door verschillende instanties toonden aan dat door het dumpen van ijzer in de oceaan de groei van plankton en andere organismen in de oceanen zou stimuleren. Dit zou tot gevolg hebben dat door de

toenemende groei van plankton in de oceanen, meer CO₂ uit de atmosfeer zou kunnen worden opgenomen (Science Daily, 2007).

Ondanks de vele onderzoeken in de afgelopen jaren blijkt dat de hoeveelheid ijzer die nodig is om echt een verschil te maken in de opname van CO₂, vele malen groter is dan eerst werd gedacht. Er bestaat wel degelijk een relatie tussen het dumpen van ijzer in de oceanen en de toename van plankton, alleen zijn de hoeveelheden ijzer niet goed geschat. Onderzoekers zijn het er wel over eens dat op bepaalde stukken oceaan, het dumpen van ijzer een positief effect heeft op de verzuring van de oceaan. Tot een grotere CO₂ opname leidt dit echter niet (Science Daily, 2007).

Ideeën voor de Toekomst

De hieronder beschreven mogelijkheden zijn hoopgevend maar bevinden zich nog in de onderzoeksfase. In het laboratorium zijn de testen succesvol afgerond. Hieruit blijkt dat er de komende jaren meer onderzoek moet worden gedaan om te kijken of de oplossingen ook echt in de praktijk kunnen worden uitgevoerd.

Oplosmiddelen en fijne chemicaliën

In de chemische industrie worden methanol en ethanol vaak gebruikt als bouwstenen tijdens chemische processen. Methanol wordt gecreëerd tijdens een proces waarin koolstofmonoxide (CO) wordt gehydrogeneerd (een chemisch proces waarbij een onverzadigde binding wordt omgezet in een verzadigde binding door waterstofgas (H₂) toe te voegen). Bij dit proces wordt ook vaak koolstofdioxide (CO₂) toegevoegd. Onderzoekers trachten een katalysator te vinden die ervoor zorgt dat de CO₂ in methanol afneemt wanneer er een tekort van koolstofmonoxide is (CO₂Chem, 2012, 18). Deze katalysator moet chemisch actief, goedkoop en betrouwbaar zijn.

Naast methanol wordt ethanol ook beschouwd als bouwsteen waarmee vele andere chemicaliën en oplosmiddelen worden gecreëerd. Ethanol is vaak één van de stoffen die wordt gebruikt om benzine te produceren. Bij het creëren van ethanol wordt koolstofdioxide en waterstofgas als basis gebruikt. Als onderzoekers ervoor kunnen zorgen dat de koolstofdioxide die nodig is om ethanol te creëren op een biologisch verantwoorde manier wordt verkregen, kan men spreken van bio-ethanol. Bio-ethanol wordt tegenwoordig gezien als tegenhanger van fossiele brandstoffen en kan worden gebruikt voor het produceren van biobrandstof of elektriciteit (CO₂Chem, 2012, 18).

Mochten onderzoekers erin slagen bio-ethanol op grote schaal te fabriceren zou men grote hoeveelheden CO₂ uit de atmosfeer kunnen gebruiken om bio-ethanol te produceren. Mocht dit mogelijk blijken, zal het debat tussen voedsel of brandstof productie voor biomassa ook minder relevant worden (CO₂Chem, 2012, 19).

Ondanks het feit dat fijne chemicaliën in kleine hoeveelheden worden geproduceerd, zijn er wel degelijk mogelijkheden om de CO₂ in de atmosfeer te verminderen. Er zal weliswaar weinig CO₂ worden gebruikt in het chemische proces, maar met name het restafval zal minder CO₂ bevatten. Doordat relatief veel restafval wordt gegenereerd bij het produceren van fijne chemicaliën zijn daar wel mogelijkheden. Als men erin slaagt de hoeveelheid CO₂ te beperken bij het chemische proces heeft dit ook invloed op het restafval. Tevens kan men door gebruik te maken van vernieuwde chemische processen, met of zonder CO₂, het restafval beter recyclen (CO₂Chem, 2012, 19).

CO₂ laten reageren met koper

Nederlandse onderzoekers van de universiteit Leiden hebben aangetoond dat CO₂ uit de atmosfeer is te filteren met koper. Wanneer deze koperverbinding reageert met zuurstof en CO₂ slaat het het CO₂ atoom automatisch op. Het atoom dat de CO₂ vangt bestaat uit twee koper atomen, elk aan een kant van de verbinding. Het CO₂ atoom wordt als het ware ingeklemd tussen beide koperatomen met behulp van de zuurstofatomen. Hierdoor ontstaat een soort brug tussen de koperatomen en de CO₂. Via elektrochemie en de zuurstofatomen wordt het CO₂ atoom vervolgens gesplitst aan beide koperatomen. Hiervoor is maar een kleine hoeveelheid elektriciteit nodig volgens de onderzoekers (RSC Advancing the Chemical Sciences, 2010).

Na het toevoegen van lithium zout kan de koperverbinding weer opnieuw gebruikt worden om een CO₂ atoom op te nemen. Dit proces kan zes keer worden herhaald, daarna is er geen nieuwe chemische reactie meer mogelijk. 'Our study is purely fundamental and the findings will need a lot of additional studies before it could possibly be applied in an industrial setting,' waarschuwt Bouwman (RSC Advancing the Chemical Sciences, 2010).

Andere onderzoekers reageren enthousiast op het de Nederlandse doorbraak. "the Energy you need to put in is very low," zegt Daniel DuBois, een onderzoeker van de Pacific Northwest National Laboratory in Richland (Bullis, 2010). Een nadeel van deze techniek is dat het koper en de CO₂ alleen met elkaar reageren wanneer er een zuurstofatoom wordt bijgevoegd. Daarnaast duurt het proces van het "vernietigen" van het CO₂ atoom erg lang. Op dit moment kan dat nog niet worden versneld. Meer onderzoek is nodig, maar Bouwman is optimistisch (Bullis, 2010).

Bacteriën die CO₂ eten

Amerikaanse onderzoekers hebben bacteriën ontwikkeld die CO₂ eten. Deze bacteriën produceren isobutyraldehyde, een stof die als basis kan dienen voor meerdere chemicaliën. Het enige wat de bacteriën nodig hebben is zonlicht. Onderzoekers willen de bacteriën inzetten bij fabrieken die veel CO₂ produceren. Fabrieken filteren de CO₂ uit de lucht die ze willen uitstoten en "voeren" de CO₂ rechtstreeks aan de bacteriën. De isobutyraldehyde die de bacteriën weer produceren kan dan door de fabriek worden gebruikt om andere chemicaliën te fabriceren (RSC Advancing the Chemical Sciences, 2009).

De bacteriën zijn zo ontwikkeld dat ze automatisch reageren met CO₂. De bacteriën zijn samengesteld met genen die afkomstig zijn van *L. lactis*, *B. subtilis* en de *E. coli* bacterie. Bij de fotosynthetische reactie van CO₂ binnen de bacterie, zorgt de bacterie dat de CO₂ wordt omgezet naar pyrodruivenzuur (C₃H₄O₃). Vervolgens wordt het pyrodruivenzuur omgezet naar isobutyraldehyde (RSC Advancing the Chemical Sciences, 2009).

Een ander voordeel van de bacteriën is de snelheid waarmee ze de CO₂ opeten. 'Our process is around 10 times faster than hydrogen production and about 100 times faster than genetically engineered ethanol production' volgens James Liao (2009), verbonden aan de Universiteit van Californië. Voordat de bacterie op grote schaal kan worden ingezet, zal meer onderzoek moeten worden gedaan volgens de onderzoekers (RSC Advancing the Chemical Sciences, 2009).

Conclusie

Er zijn mogelijke oplossingen om CO₂ in de atmosfeer terug te dringen, maar zij vragen extra onderzoek voordat ze commercieel toepasbaar zijn. Onderzoekers hebben al jaren geleden aangetoond dat het CO₂-probleem op verschillende manieren aangepakt kan worden. De wetenschap is volop bezig om oplossingen te bedenken om CO₂ in de atmosfeer te verminderen. Bovenaan staat binding van atmosferische CO₂ via algen en wieren.

De mogelijkheden om CO₂-uitstoot bij fossiele brandstoffabrieken te beperken zijn veelbelovend. De vraag blijft of fabrieken de behoefte, financiële middelen en ruimte hebben om ook daadwerkelijk CO₂ op te vangen. Hier is een rol weggelegd voor de (inter)nationale politiek en het bedrijfsleven om afspraken te maken.

Door het samenwerken van verschillende wetenschappelijke disciplines zijn ook de mogelijkheden om CO₂ te verwerken in andere stoffen toegenomen. Het produceren van polymeren is daar het beste voorbeeld van. Door onderzoek financieel te ondersteunen worden de eerste plastic flessen gemaakt van onder meer CO₂, binnenkort op de markt verwacht. Novomer heeft internationaal veel aanzien en respect gewonnen door het experiment, dat in het laboratorium werkte, om te zetten naar een commercieel haalbaar plan. Hopelijk kunnen in de toekomst nieuwe plannen worden opgesteld om ook de benutting van CO₂ met koper en bacteriën te realiseren.

Literatuur

Algaecom (2013) *Projecten*, Eendenkroos pilotproject, via de website: <http://algaecom.nl/projecten/>

Bullis, K. (2010) A New Way to Make Useful Chemicals from CO₂, *A copper-based catalyst helps turn the gas into antifreeze and household cleaners*, via de website of MIT Technology Review: <http://www.technologyreview.com/news/417116/a-new-way-to-make-useful-chemicals-from-co2/>

Chemical Reactivity (2011) Removing carbon dioxide from the atmosphere, via de website: <http://chemicalreactivity.com/?p=148>

CO₂Chem (2012) Roadmap for the future of CO₂Chem and CCU, An EPSRC Grand Challenges Network

Federal Ministry of Education and Research (BMBF) Division Cultural Science, Sustainability, Environmental Law, CO₂ Utilisation Potential, *Summary of the joint seminar of BMBF and Siemens*, 2009, Bonn

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2005) Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, via de website: http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Martin, J. H. and Fitzwater, S. E. (1988) Iron-deficiency limits phytoplankton growth in the Northeast Pacific Subarctic, *Nature* 331, 341-343

Monastersky, R. (2013) Global carbon dioxide levels near worrisome milestone, *Concentrations of greenhouse gas will soon surpass 400 parts per million at sentinel spot*, International Weekly Journal of Science, via de website: <http://www.nature.com/news/global-carbon-dioxide-levels-near-worrisome-milestone-1.12900>

Novomer (2013) Overview, via de website: <http://www.novomer.com/?action=CO2>

Patel, P. (2007) Carbon-Dioxide Plastic Gets Funding, *A startup is moving ahead with an efficient method to make biodegradable plastic*, via de website van MIT Technology Review: <http://www.technologyreview.com/news/409047/carbon-dioxide-plastic-gets-funding/>

Rau, G. (2010) CO₂ Mitigation via Capture and Chemical Conversion in Seawater, Environmental Science & Technology, Lawrence Livermore National Laboratory

RSC Advancing the Chemical Sciences (2010) Recycling CO₂ to make plastic, via de website: <http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2010/July/28071001.asp>

RSC Advancing the Chemical Sciences (2010) Capturing carbon with copper, via de website:

<http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2010/January/15011001.asp>

RSC Advancing the Chemical Sciences (2009) Bacteria turn carbon dioxide into fuel, via de website:

<http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2009/November/15110901.asp>

Science Daily (2007) Iron Fertilization of Oceans: A Real Option for Carbon Dioxide Reduction? Via

de website: <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/06/070608142214.htm>

Stark, A. M. (2003) Speeding up Mother Nature's very own CO₂ mitigation process, Lawrence Livermore National Laboratory, via de website:

<https://www.llnl.gov/news/newsreleases/2011/Jan/NR-11-01-03.html>

Styring, P. & Jansen, D. (2011) Centre for Low Carbon Futures 2050, Carbon Capture and Utilisation in the green economy, *Using CO₂ to manufacture fuel, chemicals and materials*, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)

Trouw (2010) 'Voer koe geen soja uit Brazilië, maar Hollands eendenkroos', via de website:

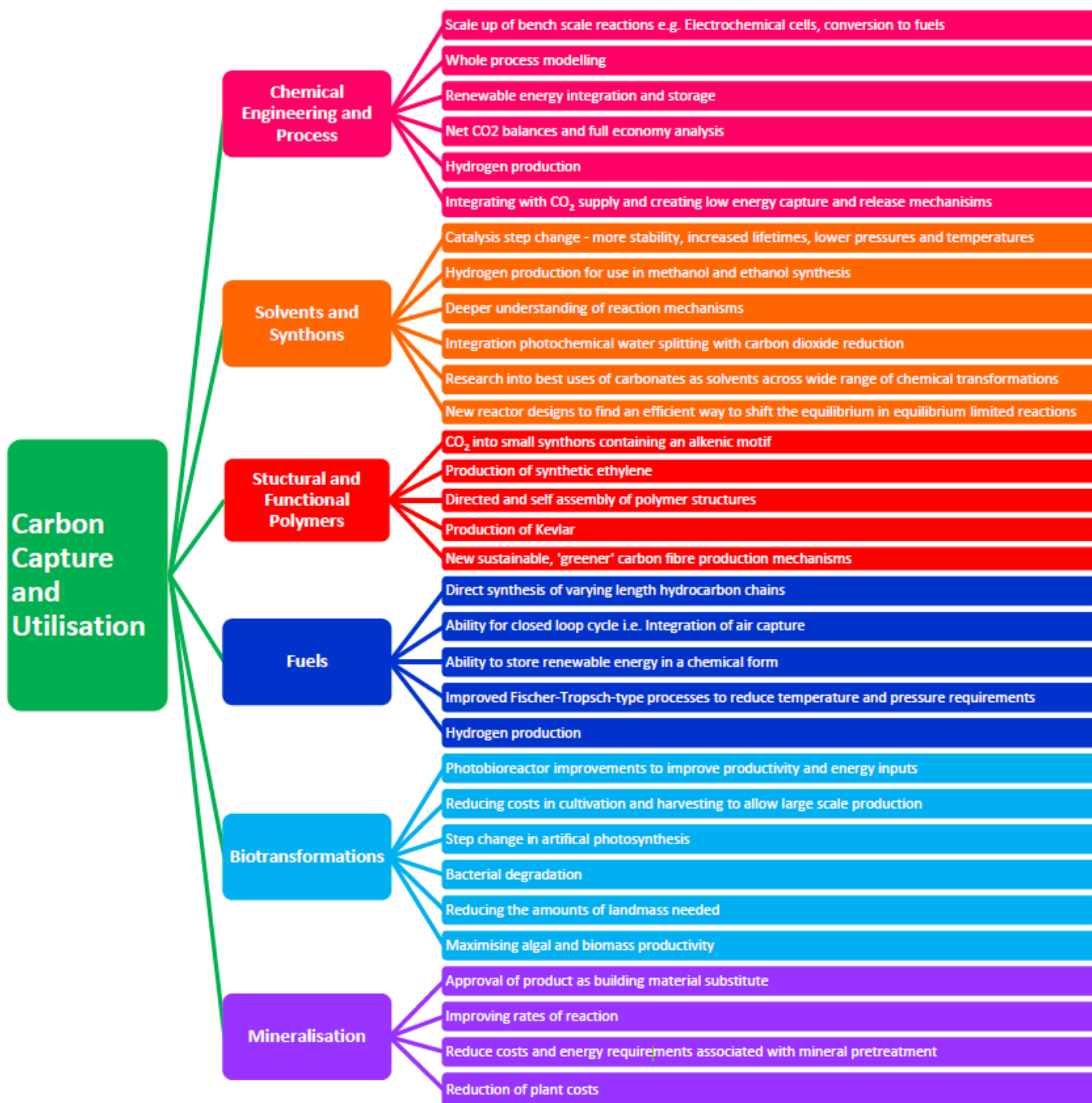
<http://www.trouw.nl/tr/nl/4324/Nieuws/archief/article/detail/1587408/2010/04/28/Voer-koe-geen-soja-uit-Brazilie-maar-Hollands-eendenkroos.dhtml>

Westerbeek van Eerten, T. (2010) 'Groene' koe kauwt op eendenkroos, Radio Nederland

Wereldomroep, via de website: <http://www.rnw.nl/nederlands/article/groene-koe-kauwt-op-eendenkroos>

Bijlagen

Bijlage 1: Verschillende mogelijkheden van Carbon Capture and Utilisation



Bron: Roadmap for the future of CO₂Chem and CCU, 2012

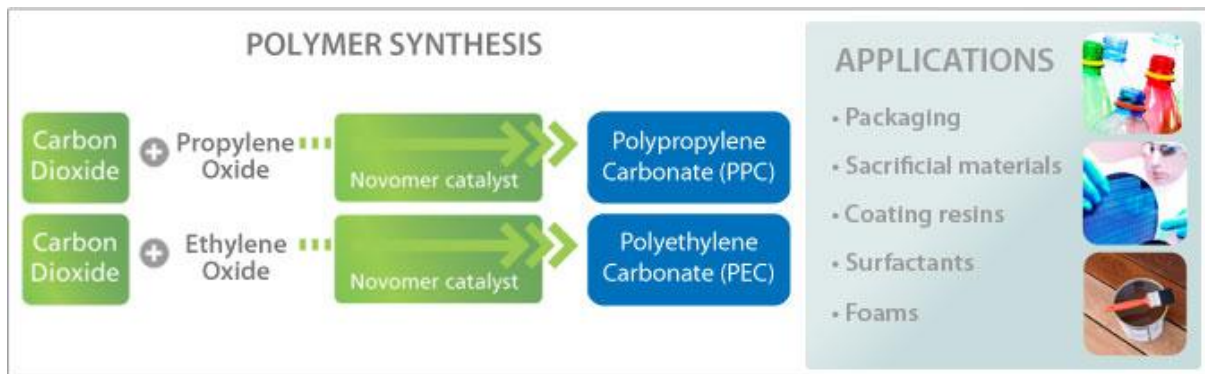
Bijlage 2: Verschillende mogelijkheden voor het verminderen van CO₂ in de atmosfeer

Table 1: Estimated potential of sequestration options (Gt CO₂)

	MIN	MAX
Oil + Gas fields / EOR+EGR	675	1,125
Coal bed methane	10	200
Saline aquifers	1,000	10,000
Mineralisation	All fossil CO₂	
Oceans (ocean acidic)	Acceptability ??	
Others (industrial use, biomass)	negligible	

Source: IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage, 2006

Bijlage 3: Polipropyleen carbonaat ontwikkelt door Novomer



Bron: Novomer, CO₂ overview, 2013