

**Wat we weten  
Wat we niet weten en  
Hoe we proberen  
De wereldwijde milieuveranderingen  
beter te begrijpen**

Inleiding op onderzoeksvragen,  
uitdagingen en uitvoering voor het  
CarboSchools project







**Wat we weten  
Wat we niet weten  
En hoe we proberen de  
wereldwijde milieuveranderingen beter te  
begrijpen**

Een inleiding op onderzoeksvragen, uitdagingen en uitvoering voor  
„CarboSchools“ projecten

---



[www.carboschools.org](http://www.carboschools.org)



EUROPEAN COMMISSION  
DIRECTORATE-GENERAL  
Joint Research Centre



Deze publicatie wordt financieel ondersteund door het EU 6e Kaderprogramma voor Onderzoek en Technologische Ontwikkeling

CarboEurope IP (Contract GOCE-CT-2003-505572) en CarboOcean IP (Contract 511176-2)  
Het Gezamenlijke Onderzoekscentrum (GOC) van het Directoraat-Generaal

## Carboschools: Docenten en Onderzoekers als partners bij het thema milieuveranderingen

CarboEurope en CarboOcean zijn grote onderzoeksprojecten die de invloed van menselijke activiteit op onze huidige en toekomstige leefomgeving bestuderen. Als zodanig hebben ze niet alleen een contractuele maar ook een morele verplichting met de resultaten van dit onderzoek bij te dragen aan de publieke discussie over wereldwijde milieuveranderingen ('global change').

Als toekomstige burgers en uitvoerders van beslissingen zijn met name jonge mensen betrokken bij, en bezorgd over de veranderingen in het milieu. Zij moeten op de hoogte zijn van de stand van het onderzoek, zodat ze weloverwogen keuzes voor de toekomst kunnen maken.

Om dit te bereiken hebben CarboEurope en CarboOcean de krachten gebundeld met het Gemeenschappelijk Onderzoekscentrum van de Europese Commissie. Dit om het initiatief van Carboschools te promoten en de verbinding tussen wetenschappers, docenten in het voortgezet onderwijs en hun leerlingen te subsidiëren.

Algemene projecten om dit partnerschap aan te moedigen zijn:

- leren van de wetenschap, gebaseerd op practica en actueel onderzoek,
- innovatieve interdisciplinaire benadering,
- discussie over milieuveranderingen, gebaseerd op kennis uit de eerste hand,
- vanuit persoonlijk perspectief en binnen de Europese context naar oplossingen zoeken.

Om een duurzaam partnerschap tussen school en onderzoek te vestigen willen CarboEurope en CarboOcean:

- bijdragen aan het ontwikkelen van proefprojecten,
- expliciete erkenning van deelname van wetenschappers in schoolprojecten als een waardevol onderdeel van hun beroepsuitoefening,
- aanmoedigen van wetenschappers om deel te nemen in schoolprojecten. Dit als integraal onderdeel van hun training als toekomstige wetenschappers,
- bijdragen aan de ontwikkeling, en het voorzien in bronnen voor schoolprojecten via de website [www.carboschools.org](http://www.carboschools.org).



*Ernst-Detlef Schulze*

*CarboEurope  
Coordinator*



*Annette Freibauer*

*CarboEurope  
wetenschappelijk  
coördinator*



*Christoph Heinze*

*CarboOcean  
Coordinator*



*Andrea Volbers*

*CarboOcean  
wetenschappelijk  
coördinator*



*Manfred Grasserbauer*

*Directeur, GOC -  
Instituut voor Milieu en  
Duurzaamheid*



## Wat vind je in dit boekje?



Veel materiaal van hoge kwaliteit laat zien wat we over de wereldwijde milieuverandering wéten. Dit boekje nodigt je uit om te ontdekken wat we niét weten en hoe onderzoekers werken aan een beter begrip omtrent milieuverandering, in het algemeen én in het kader van 2 grootschalige Europese programma's.

Elke geïnteresseerde in klimaatonderzoek zal daarom hier nuttige informatie vinden, maar bovenal is dit boekje bedoeld als gereedschap om docenten op middelbare scholen interdisciplinaire projecten over dit onderwerp aan te bieden. Die docenten zijn vervolgens in staat om kennis over te dragen en om jonge mensen aan te moedigen vragen te stellen, hun belangstelling te vergroten en de wil om te werken aan de uitdaging die wereldwijde milieuverandering ons biedt.

Daarom richten we ons meer op het gegeven dat nieuwe kennis ontstaat door onderzoek, dan op de kennis zelf. Projectonderwijs heeft de kracht kennis uit verschillende disciplines samen te brengen. Voor leerlingen voegt dit iets extra's toe en het intensiveert het begrip van het behandelde probleem.

Milieuverandering verandert onze manier van denken en hoe we beslissingen nemen. We moeten leren om te gaan met de complexiteit, globalisering, en de onderlinge afhankelijkheid van allerlei systemen. Het doel van dit boekje is:

- Het interdisciplinaire karakter van onderzoek te laten zien (tegenover de traditionele verdeling in verschillende specialisaties);
- De noodzaak een beeld van het geheel te krijgen (tegenover de tendens tevreden te zijn met de benadering van een deel);
- Verschillende maten van onzekerheid te tonen (tegenover de visie dat wetenschap en waarheid synoniem zijn);
- Stimuleren van de vaak grillige manier waarop kennis wordt vergaard: Niet noodzakelijk via een rechte lijn, maar in een creatief proces met omwegen en zelfs dwaalsporen;
- Het grote verband duidelijk maken tussen mondiale zaken, gemeenschappelijke besluiten en dagelijkse persoonlijke keuzes.

**Veel succes met jullie projecten!**

*Philippe Saugier*  
*CarboSchools coördinator*







## Inhoud

### Wat we weten en wat we niet weten

9

Een overzicht van 17 pagina's naar wereldwijde milieuverandering (‘Global Change’).  
De kernvragen en manieren om antwoorden te zoeken.

1. toekomstvoorspelling?
2. kernvragen over natuurlijke processen
3. de dringende vraag met betrekking tot koolstof: de natuurlijke put
4. hoe gaan we met deze vragen om?
5. Wat doen we om het probleem op te lossen?

### CarboEurope

26

Van 2004 tot en met 2008 zijn er honderden wetenschappers uit zeventien Europese landen die proberen de koolstofbalans van Europa vast te stellen. In 5 pagina's een overzicht van een groot internationaal wetenschappelijk programma over de koolstofcyclus.

1. Wat zijn onze doelen?
2. Waar baseren we ons op?
3. Hoe gaan we te werk?

### CarboOcean

31

De koolstofcyclus in de zee als equivalent van CarboEurope. Van 2005 tot en met 2009 reist een vloot oceanografische onderzoeksschepen, samen met vrachtschepen die zijn uitgerust met meetinstrumenten, boeien, onderwater-apparatuur etc, over de wereldzeeën om de mariene koolstofcyclus te observeren en te analyseren.

1. Wat zijn onze onderwerpen?
2. Waarop zijn die gebaseerd?
3. Hoe gaan we te werk?

### Huidig onderzoek, twee voorbeelden uit het veld

37

Experimenten op een eiland in de Middellandse Zee en in een Noorse fjord.

1. Pianosa, een wetenschappelijk schateiland.
2. Mesokosmosen, experimentele mini-waterwereld om de toekomst te simuleren.

## Internetbronnen

### *Hoe vind je wat niet in dit boekje staat?*

#### **Informatie over het broeikaseffect en klimaatverandering in het algemeen:**

Er is een grote verscheidenheid van documenten die een inleiding geven op dit probleem (in vele talen). De meerderheid hiervan is beschikbaar op internet. Sommige zijn objectief, andere meer of minder subjectief. Voor een neutrale en onderling vergelijkbare benadering biedt de "United Nations Convention on Climate Change" een aantal zeer goede inleidende publicaties: <http://www.unfccc.int> klik op "essential background", "background publications" of de rechtstreekse link:

[http://unfccc.int/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/items/2625.php](http://unfccc.int/essential_background/background_publications_htmlpdf/items/2625.php)

kijk in het bijzonder naar de "climate change informationkit" beschikbaar in het Frans, Engels, Duits, Spaans en Russisch.

Een samenwerking van Nederlandse Instituten die zich met milieuveranderingen bezighoudt (het Nederlands Platform KlimaatCommunicatie, PCCC) heeft de „kleine Vraagbaak van het Kyoto Protocol" geschreven, beschikbaar vanaf de web-site: <http://www.klimaatportaal.nl>. Behalve dit boekje bevat de site veel up-to-date informatie („De staat van het klimaat") en verwijzingen.

We bevelen ook de multilaterale EU milieu website voor jonge mensen aan, waar je een introductie vindt van klimaatonderwerpen (en andere onderwerpen): [http://europa.eu.int/comm/environment/youth/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/environment/youth/index_en.html), en de Manicore site, een belangrijke educatieve site (in het Frans en Engels) geschreven vanuit vraagstellingen. [http://www.manicore.com/anglais/documentation\\_a/greenhouse/index.html](http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/greenhouse/index.html)

#### **Wetenschappelijke gegevens:**

Aan de rapporten van het IPCC (Intergovernmental Panel of experts on Climate Change) wordt wereldwijd het meest gerefereerd. We bevelen de samenvatting van het meest recente rapport aan (op dit moment nog dat van 2001, in de loop van 2007 verschijnt een nieuwe versie). Dit is gepresenteerd door de "Greenfacts International Foundation"

<http://www.greenfacts.org/fr/dossiers/changement-climatique/index.htm> (o.a in het Engels)

Je kunt ook rechtstreekse informatie van de bron krijgen door de volgende samenvatting te downloaden "summery for decision-makers" en de 3 samenvattingen van het rapport uit 2001 <http://www.ipcc.ch> (o.a in het engels). Dit is geschreven voor het grote publiek, maar omdat de informatie veel en complex is, moet je al met het probleem bekend zijn.

#### **Wetenschappelijk nieuws:**

Ook hier is allereerst de site van het PCCC het vermelden waard: <http://www.klimaatportaal.nl/>

Een engelstalige site is bijvoorbeeld <http://www.ghgonline.org>

#### **Noodzakelijke kennis:**

ESPERE klimaatencyclopedie <http://www.espere.net> (o.a. in het Engels)

#### **Voorbeelden om in het dagelijks leven toe te passen:**

<http://www.climnet.org/publicawareness/index.htm> (o.a. i het Engels)

Berekeningen maken van CO<sub>2</sub> emissies, privé, gezin, school etc:

<http://www.co2.org/>

<http://www3.iclei.org/co2/co2calc.htm>

Een simpele(re) versie in het Nederlands staat op <http://www.co2.nl/>

Zoeken op het internet levert een groot aantal andere mogelijkheden op, het aanbod wisselt frequent.





## Wat we weten en wat we niet weten

### Kernvragen en onderzoek over wereldwijde milieuverandering

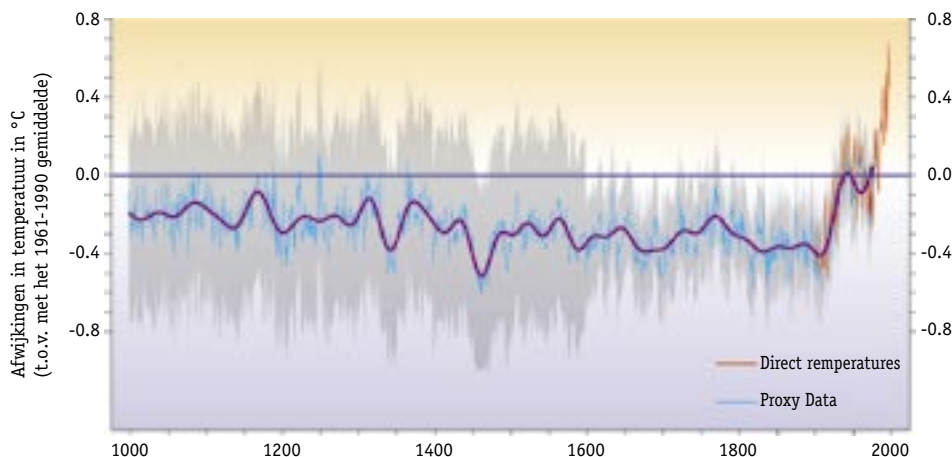
*'onze kennis van structuur en functie van ecosystemen op het land is onvoldoende om de gevolgen van milieuverandering op het systeem zelf of in de atmosfeer te begrijpen, laat staan te voorspellen'*

(International Geosphere-Biosphere Programme, 1991)



Close-up van Briksdalbreen, bij Jostedal Nationaal park, Noorwegen.

© Atle Hesje, instituut aardwetenschappen, universiteit van Bergen en het Bjerknes centrum voor klimaatonderzoek, Noorwegen



Variatie in de temperatuur van het aardoppervlak in de afgelopen 1000 jaar (op het Noordelijk halfrond).

© Intergovernmental Panel on Climate Change

- 1) Broeikasgassen spelen een essentiële rol bij het handhaven van de temperatuur op aarde op een niveau geschikt voor het leven. Zonder deze gassen zou onze planeet een gemiddelde temperatuur hebben van  $-18^{\circ}\text{C}$  in plaats van de huidige  $+15^{\circ}\text{C}$ . Meer broeikasgassen in de atmosfeer zal in principe dan ook leiden tot hogere temperaturen op aarde.
- 2) ppm=parts per million: een eenheid die gebruikt wordt om kleine hoeveelheden als deel van volume of massa aan te duiden. (hier het deel  $\text{CO}_2$  in het volume van de atmosfeer.  $380 \text{ ppm}$  (of  $0,038\%$ ) betekent dat in een miljoen  $\text{cm}^3$  lucht  $380 \text{ cm}^3$  puur  $\text{CO}_2$  zit.

### 1. Toekomst voorspellen?

#### Veel is al bekend....

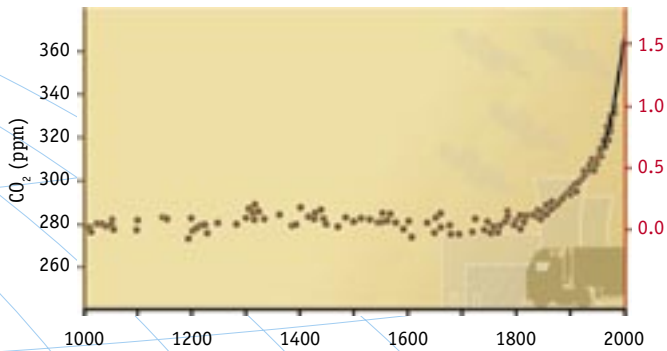
We zijn er inmiddels zeker van dat er wereldwijd milieuverandering plaatsvindt en dat deze verandering vooral gekarakteriseerd wordt door:

- Een gemiddelde temperatuurstijging van tot nu toe  $0,6^{\circ}\text{C}$  vanaf het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw, vooral vanaf 1975; deze trend gaat onverminderd door tot op dit moment (2007).
- Een gemiddelde toename van de concentratie van een aantal broeikasgassen<sup>1</sup> in de atmosfeer, in het bijzonder van koolstofdioxide, waarvan het gehalte tussen 1750 en 2005 is gestegen van 280 tot  $380 \text{ ppm}^2$ . Een dergelijke concentratie is zeker de afgelopen 600.000 jaar, en waarschijnlijk veel langer, niet voorgekomen.
- De extreme snelheid waarmee deze veranderingen plaatsvinden.

De toename van koolstofdioxide in de atmosfeer is met zekerheid toe te schrijven aan menselijk handelen. Het is het gevolg van het verbranden van fossiele brandstof (gas, olie en steenkool) sinds het begin van het industriële tijdperk, en ook van grootschalige veranderingen in het gebruik van land (massale ontbossing). Ook de toename van andere broeikasgassen, zoals methaan en stikstofoxide zijn onmiskenbaar het gevolg van menselijke activiteit gedurende de afgelopen 200 jaar.

We weten ook dat, al stoppen alle emissies nog vandaag, de milieuveranderingen door zullen gaan en versterkt worden in de komende paar eeuwen, afhankelijk van de levensduur van de gassen in de atmosfeer en de traagheid van het systeem.

Het wordt inmiddels ook met het jaar aannemelijker dat de geconstateerde opwarming geen natuurlijke beweging is (zoals de ijstijden) maar het gevolg van toename van de broeikasgasconcentratie, en dus een menselijke oorzaak heeft.



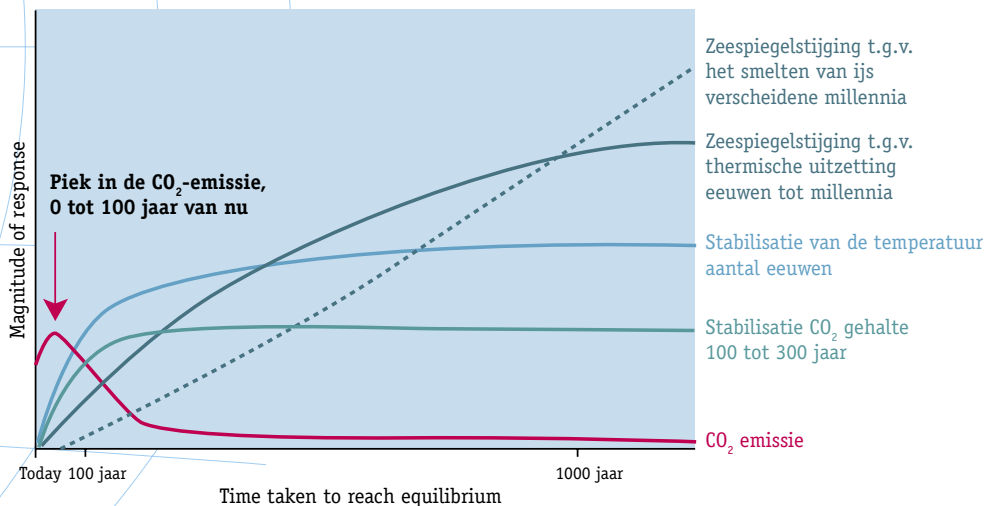
Verloop van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de afgelopen 1000 jaar.

© Intergovernmental Panel on Climate Change

### ...maar er is nog zoveel meer wat we niet weten!

De wereld stelt een beslissende vraag: hoe zal de situatie zich verder gaan ontwikkelen? Deze eenvoudige vraag plaatst de wetenschap voor een reusachtige uitdaging. *Onze huidige kennis is duidelijk ontoereikend* om nauwkeurig de ontwikkelingen en gevolgen van klimaatveranderingen te voorspellen. Waar we zeker van kunnen zijn is dat de gemiddelde temperatuur in de loop van de 21<sup>ste</sup> eeuw verder zal stijgen, maar dat onmogelijk met zekerheid te zeggen is of dit 1°C of 6°C<sup>3</sup> zal zijn en dat maakt een wereld van verschil.

Voor de *gevolgen* van een wereldwijde opwarming is de situatie niet beter. We weten dat wereldwijde opwarming een zeespiegelstijging veroorzaakt en een toename van de neerslag (sneeuw en regen), maar ook hier is het onmogelijk met zekerheid te zeggen in welke mate. Bovendien weten we nog steeds niet zeker of wereldwijde opwarming extreme klimaatverschijnselen zal doen toenemen (b.v. stormen en cyclonen).



CO<sub>2</sub> concentraties, temperatuur en zeespiegel zullen blijven stijgen, lang nadat de emissies zijn gereduceerd.

© Intergovernmental Panel on Climate Change

Ook zijn we bezorgd over het risico van *onverwachte reacties* van het klimaatsysteem als bepaalde grenzen worden overschreden. Dit staat bekend als het "elastiek principe": zolang je een elastiek uitrekt zonder de elasticiteitsgrens te overschrijden, blijft het elastisch en kan het weer terug in de oorspronkelijke vorm, maar overschrijd je die grens dan knapt het en is het voor altijd stuk.

Sommigen vrezen bijvoorbeeld dat wereldwijde opwarming op een dag de "Warme Golfstroom" zal doen afnemen of zelfs doen stoppen, wat zal leiden tot een regionale afkoeling van Europa. Dit scenario inspireerde de makers van de film "The day after tomorrow". Deze film is, zij het enorm overdreven, gebaseerd op de mogelijke gevolgen van klimaatverandering.

We hebben het vermoeden dat zulke grenzen bestaan, maar we weten niet goed waar ze liggen.

Het wordt nog ingewikkelder doordat *klimaatverandering niet over het gehele aardoppervlak gelijk is*. De gemiddelde opwarming in de Alpen bijvoorbeeld bedraagt 1°C (op sommige plaatsen zelfs 2°C) in vergelijking met het wereldgemiddelde van 0,6°C. Waar we bovendien vooral in geïnteresseerd zijn, is - los van het algemene verloop - wat er gebeurt *op de plek waar wij wonen*. We zijn nu nog niet in staat om nauwkeurige antwoorden te geven en het beste wat we kunnen doen is het opsporen van de trends. Maar afhankelijk van de aannames kunnen de voorspellingen veel verschillen.

3) Uitgaande van onze kennis in 2005 is een toename van minder dan 1,5°C zeer onwaarschijnlijk, zo niet onmogelijk. Om de toename onder de 2°C te houden is het voornaamste doel van internationale onderhandelingen..



## De verzuring van de oceanen: Het verborgen gedeelte van de ijsberg?

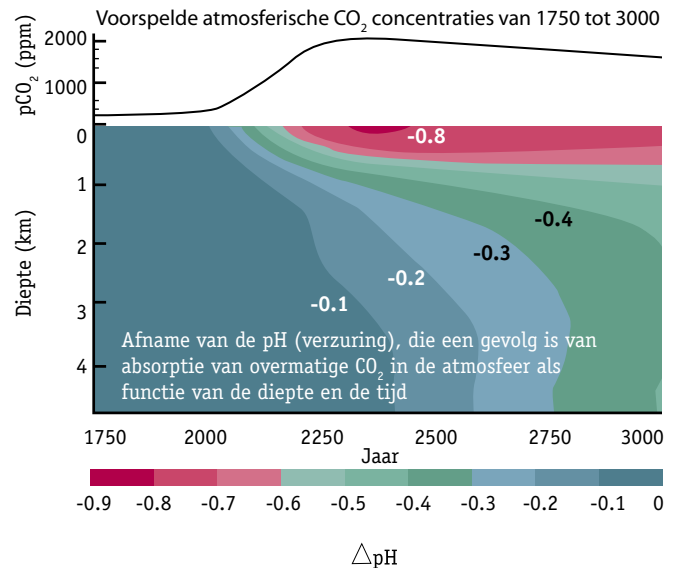
Het *gehele systeem aarde* wordt ontwricht als gevolg van het toenemen van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer en opwarming is slechts één van de gevolgen! Bijna de helft van de CO<sub>2</sub> die extra in de atmosfeer gebracht wordt eindigt in de oceanen en in de vegetatie. Dankzij dit gegeven is de opwarming veel minder dan wanneer alle emissies in de lucht zouden blijven. Het is al vaker gezegd dat de natuur ons helpt bij het verzachten van de schadelijke gevolgen van ons handelen, maar dit is voor onder water niet zonder gevolgen: Hoe meer CO<sub>2</sub> de oceaan opneemt, des te zuurder het water wordt.

Boven een specifieke zuurgraad zijn organismen die calcium-carbonaat bevatten, zoals koraal, weekdieren, schaaldieren en ftoplankton in gevaar. De verzuring van de oceanen bedreigt daarom het voortbestaan van een groot aantal soorten in de zee en de gehele voedselketen van de oceaan.



*Lophelia pertusa*, het meestvoorkomende kalkstenige koudwater koraal, bedreigd door oceaanzuur.

© Franse Onderzoeksinstituut voor exploitatie van de zee (Ifremer)



© Caldeira & Wickett (2003, Science)

### We weten dat:

- Tot op de huidige dag, de CO<sub>2</sub> uitstoot, die door menselijke activiteit is veroorzaakt, in het oppervlaktewater al tot een gemiddelde daling van de pH met 0,12 heeft geleid.
- Rond 2100, als de CO<sub>2</sub> uitstoot in dezelfde mate blijft toenemen, de pH-waarde onvermijdelijk zal afnemen tot 0,5 onder het voorindustriële niveau, waarbij een in miljoenen jaren ongekende verzuring zal optreden, met een snelheid die 100 x groter is dan ooit is vertoond.
- De oceanen zullen duizenden jaren nodig hebben om weer naar het voorindustriële niveau te kunnen terugkeren, en dan moeten ook de atmosferische concentraties afnemen. De verzuring van de oceanen is, op een menselijke tijdschaal, een onomkeerbaar proces. We moeten dan ook met stelligheid vrezen dat vele soorten geen tijd hebben om zich aan te passen. Zeker de soorten die langzaam groeien niet, zoals koraalriffen. Dit zal duidelijke consequenties voor hun leefomgeving inhouden. In tegenstelling tot wereldwijde opwarming, waarbij zowel de grootte ( b.v. van + 1 tot + 6°C in 2100) als de gevolgen nog vrij onzeker zijn, is de graad van verzuring wel goed bekend. De omvang van de verzuring ( bijvoorbeeld aan het oppervlak de pH 0,5 zuurder in 2100 als de uitstoot gelijk blijft) is gekoppeld aan goed bekende scheikundige processen en kan dus met een grote mate van zekerheid ingeschat worden. Alleen de totale invloed ervan op het mariene milieu is nog minder goed begrepen.

*Daarom is wereldwijde opwarming misschien slechts het topje van de ijsberg* in termen van aantasting van onze natuurlijke leefomgeving. Andere gevolgen, zoals verzuring van de oceanen, zijn even zorgelijk. Een ding is zeker: We moeten stoppen met het denken in hokjes, bijvoorbeeld door de oceaan te scheiden

van de atmosfeer. In plaats daarvan moeten we ons realiseren dat de CO<sub>2</sub> die in de atmosfeer gebracht is en geabsorbeerd is door de oceanen, niet verdwenen is, maar gevolgen heeft voor het mariene ecosysteem. Dit gegeven moet meegenomen worden in de politieke besluitvorming.

## CO<sub>2</sub> van de lucht naar de zee

CO<sub>2</sub> kent geen grenzen: Het verspreidt zich over het gehele aardoppervlak en treft alle landen gelijk, grote of kleine vervuilers. CO<sub>2</sub> maakt ook geen onderscheid tussen lucht en zee, maar gaat heen en weer tussen deze twee systemen en probeert zich zo gelijkmatig mogelijk te verdelen. Hier, evenals elders, streeft de natuur naar een evenwicht, d.w.z. dat de oceanen en de atmosfeer een constante verhouding CO<sub>2</sub> bevatten.

**CO<sub>2</sub> is zeer stabiel in de lucht boven het water, maar zodra het in het water wordt opgenomen kunnen er twee verschillende dingen gebeuren:**

- 1) CO<sub>2</sub> reageert met watermoleculen tot andere vormen van anorganische koolstof opgelost in zeewater: "carbonaat" en "bicarbonaat". De oceaan is een onverzadigbare opnemer van CO<sub>2</sub>, die continu probeert zoveel CO<sub>2</sub> te bevatten als de lucht, maar als de CO<sub>2</sub> omgezet is in carbonaat, dan wil het weer meer CO<sub>2</sub> opnemen, totdat er een evenwicht tussen de verschillende vormen van koolstof in het water is ontstaan. De balans varieert aanzienlijk als functie van de pH, d.w.z. van de zuurgraad van het water. Bij de huidige zuurgraad vinden we ongeveer 1% van de totale hoeveelheid koolstof in het oppervlaktewater als CO<sub>2</sub> tegen 99% als carbonaat en bicarbonaat.

De directe chemische omzetting van CO<sub>2</sub> als die het zeeoppervlak binnendringt geeft wat men noemt de „buffercapaciteit“ aan van het water: De capaciteit van de oceanen om de pH overal gelijk te houden als CO<sub>2</sub> wordt geabsorbeerd, indien de betrokken hoeveelheid CO<sub>2</sub> niet aangetast is door de mens. Maar als in de toekomst de atmosferische hoeveelheid CO<sub>2</sub> toeneemt en de oceanen absorberen meer dan gebruikelijk, dan zal de buffercapaciteit van het zeewater afnemen. Dit betekent dat het water niet in staat zal zijn zich zo goed als voorheen te verzetten tegen de pH veranderingen, waardoor de pH zal dalen en het zeewater zal verzuren.

- 2) CO<sub>2</sub> maakt de groei mogelijk van ftoplankton (groene algen), precies zoals dat voor alle andere planten geldt. Ftoplankton staat aan de basis van de gehele mariene voedselketen en voor het groeien zijn licht, koolstof en verschillende voedingsstoffen nodig. Als ftoplankton sterft, of wordt opgegeten, zakken de resten naar grotere diepten in de oceaan; omdat ze hoofdzakelijk uit koolstof bestaan, onttrekt hun levenscyclus koolstof aan het wateroppervlak. Terwijl de dode organismen zinken, vervallen ze tot anorganische materialen (d.w.z. worden geremineraliseerd) en koolstof raakt opnieuw opgelost in water, en wordt meegenomen met de verticale bewegingen van het water van de zee. Een gedeelte van deze koolstof gaat terug naar de oppervlaktelaag, maar een zeker percentage zal altijd voortbewegen naar diepere lagen van de oceaan en in sedimenten (bezinksel) worden opgeslagen.

Deze biologische consumptie van koolstof rust nooit; het is altijd ergens op aarde actief. We kunnen aannemen dat het niet sterk wordt beïnvloed door de toename van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer.

Omdat koolstof van nature al in grote hoeveelheden beschikbaar is voor fotosynthese in het water (dus niet limiterend is), is de toename die de 1% aanwezigheid in de vorm van opgeloste CO<sub>2</sub> veroorzaakt, onmerkbaar gebleken. Recente onderzoeksresultaten trekken dit desondanks weer in twijfel.





## Twee grote onbekende factoren

### Waarom is het zo moeilijk om klimaatverandering te voorspellen?

Onze kennis van de natuurlijke verschijnselen is beperkt: Menselijke activiteiten die broeikasgassen produceren zijn bekend, maar de natuurlijke processen van vrijkomen, absorptie en opslag zijn nog niet volledig begrepen. De manier waarop koolstof van het ene natuurlijke reservoir naar het andere getransporteerd wordt (de koolstofcyclus) is zeer complex en we hebben nog maar een beperkte kennis van hoe deze cyclus reageert op menselijke verstoringen.

We worden ook geconfronteerd met een andere grote onbekende: De toekomst van de menselijke samenleving. Hoe zal de wereldbevolking zich ontwikkelen? Hoe zullen de armste landen, met nu een zeer lage CO<sub>2</sub> uitstoot, zich ontwikkelen en hoe zullen de emissies zich ontwikkelen in economieën met weinig olie- en koolreserves? Welke beslissingen nemen politici in de toekomst om de emissies te beperken? Zullen we misschien in staat zijn om, met nu nog niet ontwikkelde technologieën, energiebronnen te maken die geen broeikasgassen veroorzaken? Deze vragen over het verloop van de komende eeuw zijn uiteraard onmogelijk te beantwoorden.

Om toch met deze vele onbekende factoren die te maken hebben met de toekomst van de menselijke activiteit te rekenen, bespreken we ze in het kader van een aantal sociaal-economische scenario's. Deze scenario's corresponderen dan met verschillende mogelijkheden voor de ontwikkeling van de wereldbevolking, economische groei, milieupolitiek, enz..<sup>4</sup> Daarnaast zal onze kennis van de natuurlijke verschijnselen zeker toenemen.

### Van het menselijk lichaam naar de planeet aarde

Sommigen beweren dat onze kennis van de planeet aarde overeenkomt met de kennis van de doktoren in het begin van de 19<sup>de</sup> eeuw van het menselijk lichaam. In die fase begon men iets te begrijpen van bloedstroming, ademhaling en het zenuwstelsel en bepaalde men de functies van verschillende organen: longen, hart, hersenen, spijsvertering, enz..

Het is waar dat onze kennis van het „organisme“ planeet aarde momenteel nog zeer beperkt is. We kennen de hoofdrolspelers van de levensprocessen: zuurstof, koolstof, stikstof en waterstof.

We kennen ook de grote organen: de oceanen, de atmosfeer en de planten- en dierenwereld. Maar hoe nu de eerste de laatste beïnvloedt en wie wat regelt, hoe en waarom?

Lange tijd meenden we, bijvoorbeeld, dat planten beheerst werden door natuurkundige factoren zoals licht, neerslag en temperatuur. Maar het plantenleven zal op zijn beurt deze natuurkundige factoren weer beïnvloeden, en het begrijpen van deze „terugkoppeling“ is essentieel.

Dergelijke fundamentele vraagstukken kunnen nu nog niet goed beantwoord worden.

We hebben natuurlijk vele voordelen ten opzichte van de 19<sup>de</sup> eeuwse doktoren: Nauwkeurige meetinstrumenten, satellietbeelden, uitwisseling van informatie en ideeën, voortdurende samenwerking op wereldschaal, en de kracht van computer, die het mogelijk maakt om deze informatie te verwerken.

### Alhoewel, we moeten nog enorme hindernissen overwinnen:

- de planeet is een bijzondere moeilijk te hanteren „lichaam“ en niet gemakkelijk te onderzoeken. Om van het ene „orgaan“ naar het andere te gaan, moeten we vaak duizenden kilometers reizen. Verder is het zeer moeilijk om de elementen van de levenscyclus te „zien“ en hen op hun reis te volgen. We gebruiken bijvoorbeeld koolstof-14 (een isotoop van koolstof) om de uitwisseling van kooldioxide tussen de „organen“ te volgen, omdat dit niet direct zichtbaar is. Maar omdat koolstof-14 voorkomt in oneindig kleine hoeveelheden (ongeveer  $1 \times 10^{-12}$ , d.w.z. een duizendste van een miljardste deel van de koolstof die in een monster zit) vereist dit zeer speciale meettechnieken. De studie van *fluxen* (d.w.z. stromen van alle water, gassen en voedingsstoffen tussen bodems, planten, oceanen, rivieren, de atmosfeer, dieren, enz.) wordt sterk bemoeilijkt door de beperkte waarnemingen in tijd en ruimte en de grote natuurlijke variaties. De uitkomsten bevatten daarom een aanzienlijke onzekerheidsmarge.
- We hebben maar één aarde! Experimentele wetenschap is altijd gebaseerd geweest op de mogelijkheid om hypothesen te testen en de resultaten te vergelijken en de wetten van de natuur bloot te leggen. In de situatie van de aarde is het onmogelijk om een monster aarde te nemen, het met CO<sub>2</sub> te injecteren en 100 jaar te wachten en dan de resultaten te vergelijken met een monster aarde, waarbij de CO<sub>2</sub> op normale niveaus is gehouden.

4) Voor verdere informatie: De hoofdsenario's binnen het kader van het derde evaluatierapport van de IPCC zijn verschenen op bladzijde 10-11 van de 'samenvatting voor besluitvormers', beschikbaar op [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

## Het begrijpen van het gehele systeem

Ten slotte zijn we geconfronteerd met een moeilijkheid, waar in de geschiedenis van de wetenschap nog geen ervaring mee was opgedaan. Tot aan de Renaissance waren intellectuelen, zoals Leonardo da Vinci, in staat om in alle gebieden van de menselijke kennis actief te zijn: Kunst, filosofie, wiskunde, biologie, natuurkunde, geschiedenis, enz.. Maar met de snelheid waarmee de wetenschappelijke vooruitgang in de laatste twee eeuwen toenam, is de kennis steeds gespecialiseerder geraakt: Niemand overziet nog alles.

Het probleem is dat we niet in staat zijn het systeem in zijn geheel te begrijpen vanuit de specialistische takken afzonderlijk. Terwijl we door moeten gaan met het isoleren van bepaalde componenten om ze beter te bestuderen, moeten we ze gelijktijdig ook, zoals in werkelijkheid, met elkaar verbinden, om te proberen uitwisselingen en terugkoppelingen te begrijpen. Klimaatverandering betreft de interactie tussen de menselijke samenleving en het hele aardsysteem; daarvoor is het nodig om de verschillende vakken binnen de aardwetenschap te integreren, en bovendien de sociale wetenschappen. Het is een werkelijke omwenteling, in de zin dat onze denkpatronen op de kop worden gezet. Het verplicht ons ook om ons onderwijssysteem in dit licht te herbezien.

Het is vanuit de noodzaak van een totale aardomspannende visie dat de Britse wetenschapper James Lovelock startte met het bekijken van de aarde als een soort macro-organisme, dat hij Gaia noemde. De zogenoemde "Gaia Theorie" ziet de aarde als een soort zelf-regulerend organisme, waarin de wetten van de natuur het systeem voortdurend in balans houden en het leven handhaven. Deze theorie geeft ons hoop dat het systeem onvermijdelijk zal eindigen in een nieuw evenwicht. Toch moeten we ons zorgen maken over de enorme hoeveelheden fossiele koolstof, geleidelijk opgeslagen in de geologische tijdschalen, die we vandaag de dag plotseling



*LBA Koolstofput project – Een micro-meteorologische mast in het dichte regenwoud van het Amazonegebied, Brazilië.*

© John Grace, Universiteit van Edinburgh, Verenigd Koninkrijk.

vrijmaken. De natuur alleen was dat niet van plan. Zal ze in staat zijn om een nieuw evenwicht te garanderen, waarbij de omgeving nog geschikt is voor menselijk leven?

**In het kort: We nemen waar dat de mensheid in een proces zit waarbij ze op een brute en blijvende wijze verandering van het klimaat en ecosysteem teweeg brengt, door het evenwicht, dat zich langzaam op de geologische tijdschaal heeft ingesteld, te verstoren. We zijn in staat om een aantal van de gevolgen van deze veranderingen te onderzoeken, maar we verkeren niet in de positie om de gevolgen met zekerheid of precisie te voorspellen. Gedeeltelijk is dat, omdat we nog maar weinig begrijpen van de meeste van de natuurlijke processen die er bij betrokken zijn, en gedeeltelijk omdat de toekomst van de menselijke activiteiten op lange termijn onvoorspelbaar is.**



*Micro-meteorologische mast vanuit de lucht, Renon/Ritten, Italië.*

© Stefano Minerbi, Bosbouw-departement, autonome provincie Bolzano/Bozen, Zuid-Tirol



## 2. Kernvragen over natuurlijke processen

### Het belangrijkste doel is helder: Een volledig begrip krijgen van het systeem aarde.

Ieder natuurlijk systeem is gebaseerd op voortdurende actie, interactie en terugkoppeling; er is geen begin en ook geen einde, alleen oorzaken en gevolgen in een voortdurende wisselwerking met elkaar: Om hoofdpijn van te krijgen. De vragen die we stellen zijn dus zelf ook afhankelijk van elkaar en daardoor op veel manieren te formuleren. Maar wat onze invalshoek ook is, de vragen die zich opdringen komen hier op neer:



Arctische zon – Expeditie door het noordpoolgebied aan boord van de Zweedse ijsbreker Oden.

© Toste Tanhua, instituut voor mariene wetenschappen, Universiteit van Kiel, Duitsland

### Hoe reageert de koolstofcyclus op een toename van het CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer?

Hoe vindt de uitwisseling van koolstof plaats tussen de verschillende compartimenten van de cyclus (sedimenten, bodems, planten, oceanen, levende organismen, etc.)?

Hoe reageren de verschillende compartimenten op stijging van het CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer? Hoe groot is de natuurlijke capaciteit van de vegetatie en van de oceanen om het overschot aan koolstof dat wij in de lucht brengen te absorberen? Is de biodiversiteit van invloed op de opslag van koolstof? Welke

vormen van bosbouw en landbouw bevorderen de opslag van koolstof? (zie: "Het dringende vraagstuk met betrekking tot koolstof: De natuurlijke putten").

### Hoe reageert de watercyclus op de stijging van de temperatuur?

Waterdamp is het meest voorkomende natuurlijke broeikasgas. Zal een grotere verdamping leiden tot grotere hoeveelheden waterdamp in de atmosfeer, en daardoor tot meer wolken, meer neerslag en dus minder zonneschijn en zo het broeikaseffect verminderen? Of zullen de wolken meer warmte vasthouden op de oppervlakte van de aarde en zo het broeikaseffect versterken?

### Hoe is de wisselwerking tussen de stikstofkringloop en de andere kringlopen en hoe zal deze interactie reageren op menselijk ingrijpen?

Stikstof in chemisch gebonden vorm (dus niet in de vorm van stikstofgas dat 78% van de atmosfeer uitmaakt) is een basisbouwsteen voor het leven, van groot belang voor alle levende wezens, waaronder de planten. De beschikbaarheid van gebonden stikstof is één van de beperkende factoren, die hun groei bepaalt: Men bemest akkers met nitraathoudende kunstmest (nitraat staat voor gebonden stikstof) om de oogst te vergroten. Maar wat gebeurt er wanneer de atmosfeer rijker wordt aan CO<sub>2</sub>? Zal de fotosynthesesnelheid van planten dan toenemen, of zal deze beperkt worden door andere factoren, zoals de beschikbaarheid van gebonden stikstof in de bodem?

### Hoe transporteren de oceanen warmte, en hoe zullen de oceanen reageren op de opwarming van de aarde?

Hoe zullen de oceanen beïnvloed worden door de wereldwijde opwarming? Wat voor gevolgen zal dit weer hebben op het klimaat? Moeten we bang zijn voor onomkeerbare veranderingen in de manier, waarop de oceanen het klimaat op wereldschaal reguleren? Bestaat er een risico op 'verrassingen', gekoppeld aan gebeurtenissen, met een kleine waarschijnlijkheid, maar met zeer ernstige gevolgen?

□





© CarboOcean

## Hoe zullen de oceanen zich ontwikkelen in een CO<sub>2</sub>-verrijkte wereld?

Zal de verzuring van de oceanen, als resultaat van de absorptie van grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> de voedselketen in de zee verstoren en leiden tot verdwijnen van een aantal soorten? Zullen deze ecologische verstoringen vervolgens weer van invloed zijn op het vermogen van de oceanen om CO<sub>2</sub> te absorberen?

## Wat zullen de gevolgen van klimaatverandering zijn op de verschillende ecosystemen en welke invloeden zullen die gevolgen weer hebben op het klimaat?

Hoe zullen bossen, natte gebieden, akkers, graslanden enz. op verschillende breedtegraden reageren op klimaatverandering? Zal een stijging van het CO<sub>2</sub>-gehalte en van de temperatuur de fotosynthese opvoeren, zodat ook de opslag van koolstof in planten zal toenemen? Wat zijn de gevolgen van belangrijke veranderingen in landgebruik, zoals ontbossing? Zal de opwarming de permafrost in de arctische gebieden laten smelten, en, als dat gebeurt, zullen er dan broeikasgassen ontsnappen uit de ontdoode bodem met een verdere temperatuurstijging als gevolg?



Plateau rosa, Italië: één van de hoogste stations voor metingen aan de atmosfeer in het CarboEurope project.

© Francesco Apadula, CESI, Milaan, Italië

## Welke gevolgen zijn er op lokaal en regionaal niveau?

Hoe zullen de veranderingen (stijging van temperatuur, neerslag, enz.) uitpakken voor de regio's in de wereld? Zullen de Alpen verstoken blijven van sneeuw? Zal het Middellandse zeegebied in een woestijn veranderen? Hoe zullen onze waterbronnen beïnvloed worden? Wat zal er gebeuren als het water dat normaal als sneeuw in de winter wordt opgeslagen direct in de rivieren stroomt? Zal de lage kustvlakte van Noordwest-Europa nog verdedigbaar blijven tegen de zee? Wat zullen de gevolgen zijn voor de landbouw, voor de voedselvoorziening en voor de woonomgeving?

## Moeten we bang zijn voor een toename van extreme weersverschijnselen? En zo ja, op welke breedtegraden?

Zullen orkanen en andere stormen talrijker en heviger worden? Zullen droogte en overstromingen meer voorkomen en in welke streken?

Vanzelfsprekend hebben we al een begin van de antwoorden op de meeste van deze kernvragen, het ene wat preciezer dan het andere. Maar we zijn ons er ook van bewust, dat we waarschijnlijk nooit de volledige antwoorden zullen krijgen. In dit onderzoeksterrein, waar altijd enige twijfel zal blijven bestaan, draait alles om het verkleinen van onzekerheden. Dit is precies wat we proberen te bereiken.





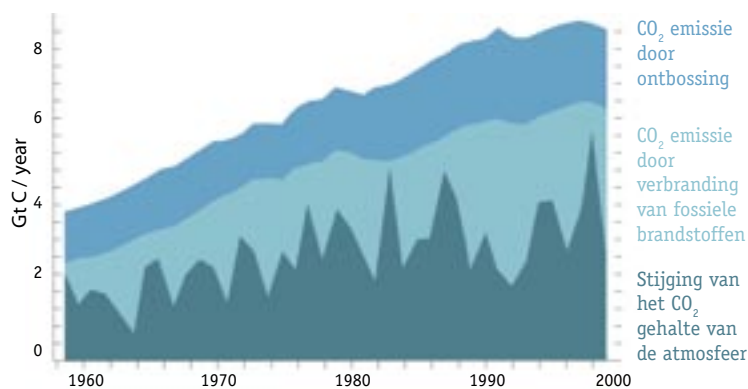
### 3. Het dringende vraagstuk met betrekking tot koolstof: De „natuurlijke putten“

Het volgende feit is zeer verrassend: *Slechts circa 55% van de CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen hoopt zich op in de atmosfeer.* De oceaan en de biosfeer absorberen de rest. Deze zogenaamde “natuurlijke koolstofputten” („sinks“ in het Engels) dempen de schadelijke effecten van het menselijk ingrijpen in de atmosfeer.

**Toch vragen we ons met enige ongerustheid het volgende af:**

- Hoe lang nog zullen de oceanen en planten in staat zijn om door te gaan met het absorberen van een belangrijk deel van de koolstof die wij in de atmosfeer uitstoten?
- Wat gebeurt er met de geabsorbeerde CO<sub>2</sub> en wat zullen de gevolgen zijn van de CO<sub>2</sub> -verrijking op de biosfeer, en vooral op de oceanen?

We begrijpen de rol van natuurlijke putten in de kwalitatieve zin, maar er heerst nog grote onzekerheid over de geabsorbeerde hoeveelheden, over de oorzaken van de fluctuaties van jaar tot jaar, over de toekomstige ontwikkeling van deze putten en hun kwetsbaarheid voor voortdurende CO<sub>2</sub> verrijking.



*De emissies zijn gestegen van 4 naar 8 Pg per jaar. De fractie van de uitgestoten CO<sub>2</sub> die in de atmosfeer blijft zorgt voor de stijging in de atmosfeer.*

© Andrew Manning, Universiteit van East Anglia, Norwich, Verenigd Koninkrijk

### De hoeveelheden blijven erg onnauwkeurig

Op dit moment schat men dat van de 6,3 Pg (Petagram, dat is 1015 gram, ofwel 1 miljard ton, ook wel gigaton, GT genoemd) CO<sub>2</sub>, afkomstig van de gemiddelde jaarlijkse uitstoot van fossiele brandstoffen, 2,8+/-0,5 Pg geabsorbeerd wordt door de oceanen en de vegetatie die de aarde bedekt – dat is gemiddeld 45% van de totale uitstoot, met een onzekerheidsmarge van ±8%.

Moeilijker wordt het, wanneer men probeert om de CO<sub>2</sub>-opname door elk van de natuurlijke putten afzonderlijk te bepalen. De mate van onzekerheid wordt dan groter.

- Oceanen absorberen 1,9 +/- 0,7 Pg, dat is tussen de 20% en 40% van onze uitstoot
- De vegetatie op het land absorbeert 1,2 +/- 0,8<sup>5</sup> Pg dat is tussen de 5% en 30% van onze emissie.

We proberen met alle mogelijk middelen deze grote onzekerheidsmarges te verkleinen, vooral door de variatie van jaar tot jaar op splitsen in variatie van natuurlijke oorsprong (inherent aan het systeem) en variatie als gevolg van beïnvloeding door de mens.

### Verrassende verschillen van jaar tot jaar

De hierboven genoemde getallen zijn maar gemiddelden: in werkelijkheid kan de activiteit van natuurlijke putten van jaar tot jaar flink verschillen. Terwijl de uitstoot door de mens (door ontbossing en verbranding van fossiele brandstoffen: de beide bovenste lijnen, in Pg per jaar) op een relatief gelijkmatige wijze stijgt, verloopt de toename in de atmosfeer (het gedeelte dat uiteindelijk in de atmosfeer blijft en dus niet wordt geabsorbeerd, onderste lijn) erg onregelmatig. Sommige van deze variaties kunnen worden toegeschreven aan andere natuurverschijnselen (in het bijzonder El Niño), maar voor het grootste deel weten we weinig exacts over de mechanismen die ze veroorzaken. Welke rol spelen de oceanen hierbij en welke de biosfeer? Wat veroorzaakt deze variaties? Met welke exacte hoeveelheid verandert de opname van de verschillende natuurlijke putten en wat is het meest waarschijnlijke toekomstscenario in een atmosfeer, die voortdurend rijker wordt aan CO<sub>2</sub>?

5) De som van de getallen komt niet exact overeen met de genoemde 6,3 Pg, maar wel binnen hun onzekerheidsmarges. Dergelijke afwijkingen ontstaan omdat de verschillende getallen afgeleid worden uit verschillende soorten experimenten. De gecombineerde put van oceaan en biosfeer wordt berekend uit de verandering van de CO<sub>2</sub> concentratie in de lucht (samen met het gegeven hoeveel CO<sub>2</sub> er door de mens wordt geproduceerd). De aparte oceaan- en biosfeerputten worden indirect bepaald, gebruik makend van aanvullende metingen zoals die van koolstof-14, koolstof-13 e.d. Verschillende metingen leiden dus tot verschillende uitkomsten en verschillende onzekerheden. (Keeling en Garcia, 2002).

## Putten op het land: het gewicht van de geschiedenis.

De activiteit van de koolstofputten op het land hangt niet alleen af van de vegetatie en van niet-biologische factoren (zoals weersinvloeden, dagelijkse en seizoensvariatie, enz.), maar ook van de geschiedenis van het bodemgebruik gedurende de laatste eeuwen. Twee graslanden - die er hetzelfde uitzien - kunnen een heel verschillende koolstofbalans hebben, als bijvoorbeeld het ene al eeuwen als grasland in gebruik is, terwijl het andere twintig jaar geleden nog bos was. Het Europese continent is al een paar duizend jaar lang sterk beïnvloed door de aanwezigheid van mensen. Er moet nog veel gedaan worden om de gecompliceerde koolstofstromen betrouwbaar in kaart te brengen!



De eerste CO<sub>2</sub> metingen aan boord van het vrachtschip MS Falstaff.

© CarboOcean

## De favoriete slogan van de biosfeer: „slow in, fast out“

Het vastleggen van atmosferische CO<sub>2</sub> door de vegetatie door middel van fotosynthese is het gevolg van een langdurig en ingewikkeld proces („slow in“). Bij verbranding daarentegen komt de koolstof in één keer en onstuitbaar vrij („fast out“).

Bovendien bevat de biosfeer (vooral de bodems) zeker drie keer zoveel koolstof als de atmosfeer: Veranderingen in de koolstofvoorraad in de vegetatie hebben daardoor aanzienlijke invloed op het CO<sub>2</sub>-gehalte van de lucht. De

meeste door de fotosynthese geabsorbeerde koolstof wordt slechts tijdelijk vastgehouden (in bladeren, hout en vruchten) voordat het weer terugkeert door afbraak en ademhaling. Slechts een klein deel wordt duurzaam in meer stabiele vormen vastgehouden, in hout, en in de bodem, als humus. We weten nauwelijks waardoor deze verdeling bepaald wordt.



Onderzoeksplaats in Russisch bos – Fyodorovskoye (tussen Moskou en St. Petersburg). Luchtmonsters nemen in een afgelegen bos voor analyse in West-Europese laboratoria is een logistieke uitdaging.

© Rolf Neubert, Centrum voor IsotopenOnderzoek, Rijksuniversiteit Groningen, Nederland

## Zijn de putten op het land op korte termijn kwetsbaar?

Recente studies tonen aan dat mogelijkheden om CO<sub>2</sub> gestimuleerd op te slaan in de vegetatie (vooral door het planten van nieuwe bossen) over ongeveer 200 jaar uitgeput raken, wanneer zich een nieuw evenwicht heeft ingesteld tussen boomgroei en houtkap. Alleen de oceanen zullen hun absorptievermogen nog verscheidene eeuwen behouden. Sommige ecosystemen op het land zouden zelfs natuurlijke bronnen kunnen worden door grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> af te geven en zouden zo al onze inspanningen om de menselijke emissies te reduceren teniet kunnen doen.

We kunnen alleen maar hopen dat dit zwarte scenario geen werkelijkheid zal worden. In elk geval toont het aan dat we dringender dan ooit voortgang moeten maken met het begrijpen van natuurlijke putten en hun ontwikkeling in de tijd. CarboEurope en CarboOcean laten de grootschalige inspanningen van de EU zien om bij te dragen aan deze taak zowel wat betreft de putten op het land als de putten in zee.



## Het wetenschappelijk onderzoek: Doordringen tot de werkelijkheid



© Axel Don, Max-Planck-Instituut voor Biogeochemie, Jena, Duitsland

Wanneer we als onderzoekers geconfronteerd worden met een onverwachts verschijnsel, zoals de wereldwijde opwarming, beginnen we altijd met *vragen* te formuleren. Die vragen staan genoemd op de vorige pagina's.

Daarna bedenken we één of meer *hypotheses*: We wijzen de „verdachten” aan. We veronderstellen bijvoorbeeld dat de verbranding van fossiele brandstoffen (dus de mens) verantwoordelijk is voor de toename van CO<sub>2</sub>.

Dan beginnen we met het onderzoek. We onderzoeken alle mogelijke aanwijzingen, waardoor we onze hypothese kunnen bevestigen of verwerpen: sporen, tekens, voetafdrukken (we gebruiken deze woorden ook echt). We voeren experimenten uit, doen metingen, verzamelen monsters en analyseren deze in het laboratorium. Dit brengt soms ongewone activiteiten met zich mee: Een dag doorbrengen op de top van een toren boven de boomkruinen, een thermometer in de grond planten, de hele nacht door zakjes met lucht verzamelen midden op een akker, vliegtuigen steeds laten stijgen en dalen zonder te landen, gaten graven op bergtoppen en op de oceaانبodem, enz.

We vergelijken grote hoeveelheden informatie uit verschillende bronnen totdat we een „bundel van verbanden” hebben die voldoende solide is om conclusies te mogen trekken. Aan de andere kant kunnen extreme meetwaarden, gegevens waarvoor geen verklaring is, ons naar nieuwe onderzoekspaden leiden.

We hebben gewoonlijk enkele jaren en veel volharding nodig om van vraag naar antwoord te komen. Een enkele keer zijn we hier niet toe in staat, of maar zeer ten dele, of niet op de manier die we voorzagen. Soms wekt een conclusie twijfel over een eerder gevonden resultaat, waarvan men meende dat het goed bewezen was. Het gebeurt ook wel dat er per ongeluk antwoorden worden gevonden bij vragen, die niet bij ons opgekomen waren.

In de meerderheid van de gevallen geven onze conclusies niet een helder antwoord op de aanvankelijk gestelde vraag, maar leiden ze tot nieuwe vragen en hypothesen, waarmee we weer helemaal opnieuw aan de gang moeten. Kort gezegd, we stellen onszelf onophoudelijk vragen, we twijfelen aan wat we al weten en proberen te „zien”, wat niet gemakkelijk te zien is.



## 4. Wat doen we om een antwoord op deze vragen te vinden?

### Observatie: De planeet onder medisch toezicht

Het doel is simpel: De grootst mogelijke hoeveelheid gegevens verzamelen, over zoveel mogelijk parameters, zo vaak als mogelijk is, op zoveel mogelijk plaatsen, om een zo betrouwbaar mogelijk totaaloverzicht te krijgen van het klimaat van onze planeet. Korter gezegd, om de vraag te beantwoorden: "wat gebeurt er echt, wanneer en waar?"

### De waarnemingsactiviteiten zijn erg verschillend. We meten bijvoorbeeld:

- Reservoirs (bijvoorbeeld, hoeveel koolstof aanwezig is in de vegetatie en in de bodem);
- Fluxen (bijvoorbeeld, om de hoeveelheid CO<sub>2</sub> te schatten, die wordt afgegeven of opgenomen door een bos, een akker, een natuurlijk grasland, algenbloei, enz.);
- Concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer;
- Oceaanstromingen;
- Meteorologische gegevens;
- Gegevens van satellieten, die ons van informatie voorzien over een veelheid van parameters (bijvoorbeeld de temperaturen aan het aardoppervlak en in die in de atmosfeer, de verdeling van de vegetatie, enz.).

Dit is een soort van „monitoring“ van de planeet, net zoals dat nodig is om een medische diagnose te stellen: we plaatsen de aarde onder „medisch toezicht“ om het verloop te volgen van alle parameters die we kunnen meten. We streven er naar de frequentie en de verscheidenheid van de meetpunten te vergroten om een steeds gedetailleerder beeld te krijgen van de toestand, en we proberen nieuwe instrumenten te ontwikkelen met grotere precisie en betrouwbaarheid.

Als aanvulling op de waarnemingen in het heden bestuderen we ook het verleden met veel aandacht.

De aarde herbergt vele natuurlijke archieven, waar je erg precieze sporen van vroegere klimaten kunt vinden, tot honderden miljoenen jaren geleden. Zo kunnen bijvoorbeeld monsters oeroude lucht gevonden worden ingesloten als belletjes in het ijs in gletsjers in bergstreken en op de ijskappen in de poolgebieden. Met behulp hiervan kan de geschiedenis van ons klimaat gereconstrueerd worden.



*Anders Olsson bepaalt aan boord van de R/V G.O. Sars de concentratie van freonen met behulp van gaschromatografie.*

*© Yoshie Kasajima, Bjerknes Centrum voor klimaatonderzoek, Bergen, Noorwegen*

### Experimenten: De mechanismen begrijpen die het organisme Aarde besturen

Het is natuurlijk heel goed om waarnemingen te doen, maar de kwestie die ons voortdurend bezig houdt is: "waarom gebeurt dit en hóé?"

Dit is het hart van het onderzoek, waarin we proberen de grenzen van onze kennis te verleggen en vooruitgang te boeken in ons begrip van verschijnselen, waarover aanvankelijk weinig tot niets bekend is. Hier komen al onze kernvragen bij elkaar en samen vormen ze een soort van enorme puzzel, waarbij elke onderzoeker probeert om één klein puzzelstukje te plaatsen, waardoor de oplossing van de hele puzzel dichterbij komt.

Alle onderzoekers werken dus aan „hun eigen“ vragen. Neem bijvoorbeeld een bos, waarvan men vermoedt dat het een put is voor koolstof: Uit atmosferische metingen is gebleken dat het bos koolstof uit de atmosfeer opneemt, maar tegelijkertijd wordt er een veel kleinere toename in de biomassa gemeten. De bomen slaan maar een deel van de door het bos geabsorbeerde koolstof op. Wat gebeurt er met de rest? Wat gebeurt er werkelijk tussen de atmosfeer en de bomen, en vervolgens tussen de bomen en de grond en tussen de grond en de vaste gesteentelaag daaronder en de ondergrondse waterlopen, en tussen het plantenleven en de dieren? Waardoor gebeurt dit en hoe?

Er is maar één manier om dit soort vragen te beantwoorden: Een hypothese opwerpen en proberen om deze door experimenten te testen. Men moet kijken wat er gebeurt, monsters nemen, resultaten vergelijken en ter discussie stellen wat al bekend is – kort gezegd: onderzoek doen!





## Modelleren: Een megasimulatiespel voor tijdreizen.

De aarde is een ingewikkeld systeem met reactietijden die vaak langer zijn dan een mensenleven, en je kunt haar niet in een afgesloten ruimte isoleren en onderwerpen aan laboratoriumexperimenten. Onder zulke voorwaarden is het moeilijk om *in situ* na te gaan of onze hypothesen met betrekking tot het klimaat waar of onwaar zijn en het is nog moeilijker om de toekomst te voorspellen.

Echter, we hebben supercomputers, waarmee we virtuele versies van onze planeet Aarde met al haar eigenschappen kunnen scheppen. Deze zogenaamde modellen vormen een soort megacomputerspel dat we „spelen“ door kunstmatig parameters te veranderen om te kijken wat er dan zal gebeuren.

Zoals in elk goed simulatiespel is er een rooster van hokjes (ook wel „grid“ genoemd). Deze hokjes bevatten veel parameters (temperatuur, vochtigheid, CO<sub>2</sub>-gehalte, windrichting, vegetatie, enz.) en zijn verbonden door een serie vergelijkingen, die weergeven wat bekend is over de interacties die er in werkelijkheid tussen deze verschillende parameters bestaan. Verder zijn er nog ‘tijdstappen’, eenheden van tijd (bijvoorbeeld in uren, dagen, weken enz.) die het virtuele ritme bepalen, waarin aan de computer gevraagd wordt om de parameters voor ieder hokje opnieuw uit te rekenen op basis van de vergelijkingen. Op deze manier kan men de werkelijkheid op verschillende tijdschalen simuleren.

Daardoor kan men in enkele dagen de verandering van het klimaat in de laatste 1000 jaar berekenen. Door gebruik te maken van klimaatarchieven beschikbaar uit boorkernen (van oceaansediment of gletsjerijs) zijn we in staat om de simulatie te vergelijken met de werkelijkheid. De gevonden verschillen leggen de tekortkomingen van het model bloot, dat vervolgens moet worden aangepast. Hoe meer we in staat zijn om betrouwbaarheid van het model voor het verleden en het heden na te gaan, hoe meer we ons kunnen verlaten op de voorspellingen over de ontwikkeling van klimaatfactoren in de komende 50, 100 of zelfs 1000 jaar.

Modellen zijn werktuigen om mee te voorspellen. Eén van de meest voorkomende toepassingen is de weersvoorspelling. Het voorspellen van het weer is ook een goede test van de beperkingen van het model. Weersvoorspellingen kloppen soms niet en hoe verder ze in de toekomst liggen, hoe onbetrouwbaarder ze worden. Dit komt eenvoudigweg, doordat de vergelijkingen alleen maar een benadering van de werkelijkheid blijven. Een weerbericht geeft trends aan, geen zekerheden. Hoe kleiner de hokjes en de tijdseenheden en

hoe talrijker en preciezer de gegevens en de vergelijkingen (met andere woorden hoe hoger de resolutie van het model) hoe helderder het beeld wordt en hoe dichter de voorspelling bij de werkelijkheid komt te liggen (al heeft dat ook z'n principiële beperkingen).

Net zoals weerberichten de plank regelmatig misslaan, zijn ook klimaatmodellen nog lang niet perfect. Er zijn twee belangrijke fronten waarop we proberen een doorbraak te bereiken:

- **Integratie van alle componenten in één groot model op wereldschaal:** We bouwen eerst aparte modellen voor de vegetatie, de oceanen, de atmosfeer, enz. Daarna is het zaak om al deze elementen met elkaar te verbinden (net zoals in de werkelijkheid) om een overkoepelend model te scheppen, dat in staat is om een geïntegreerde weergave van de aarde als systeem te geven. Eén van de belangrijkste obstakels is de geringe kennis die voorlopig nog bestaat over sommige componenten (zoals de bodem). Hierdoor is het lastig om deze componenten te modelleren.
- **De schaal terugbrengen:** Hoewel we vrij goed in staat zijn om het klimaat op wereldschaal te simuleren, zijn onze modellen tamelijk zwak in voorspellingen op regionaal niveau (bijvoorbeeld, het continent Europa). Daar komt bij dat we op dit ogenblik juist op regionale schaal het meeste last hebben van een gebrek aan informatie. Dit probleem is niet alleen te wijten aan de beperkte kracht van de computers (vollediger en preciezere modellen vereisen meer berekeningen), maar ook aan de tekortkomingen van ons begrip van de verschijnselen waar het om gaat.



De grootte van de opslag van biomassa in de bodem is een grote onbekende in het koolstofbudget op het land. Hier zijn onderzoekers van het GOC hard aan het werk om het complete wortelsysteem van populieren in Parco Ticino (Italië) boven de grond te krijgen. Op deze plek zijn broeikasgasfluxen een aantal jaar bestudeerd voor men overging tot kappen.

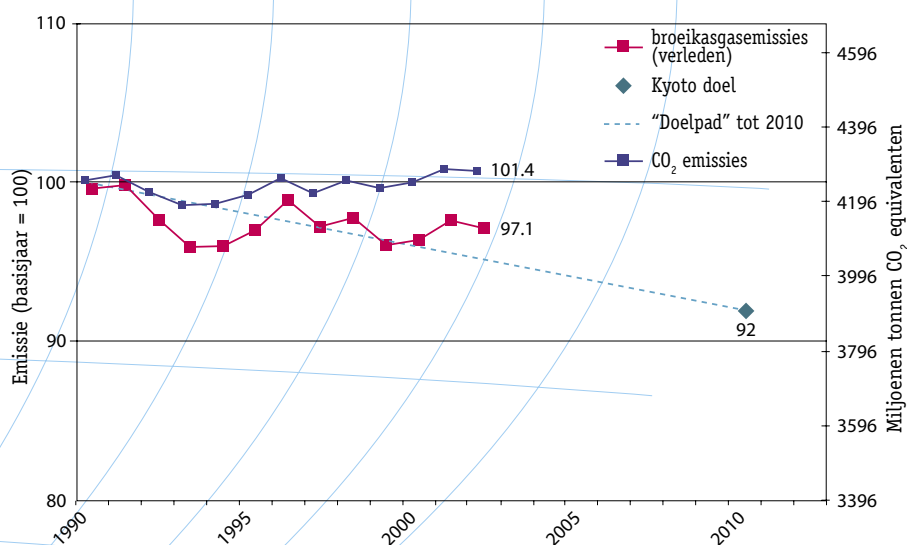


MS Atlantic Companion, een koopvaardijship met CO<sub>2</sub> meetapparatuur aan boord.

© CarboOcean

## Alles heeft met elkaar te maken

De drie onderzoekspilaren: waarnemen, experimenteren en modelleren zijn onderling nauw verbonden; modellen worden gevoed met gegevens uit waarnemingen en de gebruikte vergelijkingen, en worden verbeterd met behulp van uit experimenten opgedane kennis. Iedere keer als een model een resultaat oplevert dat ver buiten het bereik van de observatiegegevens ligt, leggen we een proces bloot dat we nader moeten onderzoeken. Zo begint het hele proces van waarnemen, experimenteren en modelleren opnieuw.



Totale emissie van broeikasgassen door de 15 landen van de EU vergeleken met de Kyoto doelstelling.

© European Environment Agency, 2004

## 5. Wat doen we om het probleem op te lossen?

Hoewel we geconfronteerd worden met immense wetenschappelijke uitdagingen, hebben we niet gewacht met het op de hoogte stellen van het publiek en de overheid tot we op een later tijdstip meer zekerheid zouden hebben.

Sinds zijn oprichting in 1988 heeft de Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) regelmatig evaluaties georganiseerd van de vooruitgang in kennis van alle specialismen op wereldschaal. Vertrouwend op enige duizenden wetenschappers heeft het IPCC al drie evaluatierapporten gepubliceerd. Deze meest gezaghebbende rapporten over dit onderwerp werden gepubliceerd in 1990, 1995 en 2001. Het volgende rapport is aanstaande (in 2007).

Deze rapporten zijn in de dialoog tussen wetenschap en politiek een belangrijk hulpmiddel om strategieën te ontwikkelen die de versterking van het broeikas effect tegengaan. Op de wereldtop in Rio de Janeiro in 1992 was het eerste IPCC rapport het uitgangspunt voor de Verenigde Naties om de Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) overeen te komen. Het uiteindelijke doel hiervan: "is om te komen (...) tot een stabilisatie van broeikasgasconcentraties in de atmosfeer op een niveau, dat gevaarlijke antropogene verstoring van het klimaatstelsel voorkomt."

### Het Kyoto Protocol: Een belangrijke uitdaging of een onbeduidend gebaar?

Het Kyoto Protocol werd door het UNFCCC in 1997 overeengekomen en stelt bindende doelstellingen vast voor de ontwikkelde landen. Zij zouden hun uitstoot van broeikasgassen tussen 2008 en 2012 tenminste met gemiddeld 5% moeten verlagen t.o.v. het niveau van 1990.

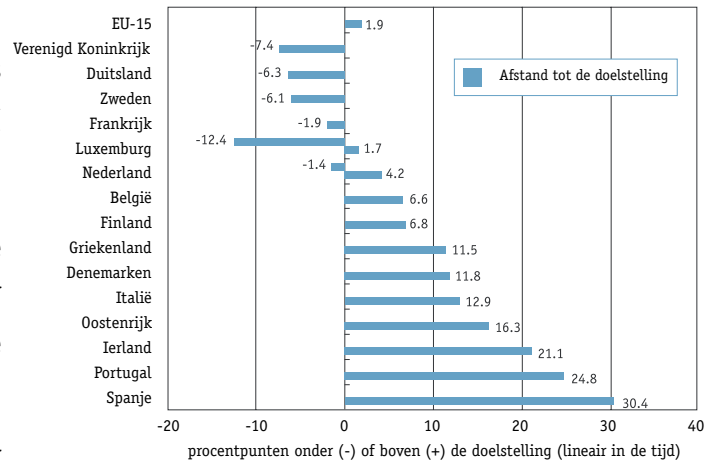
Deze doelstelling is zowel een uitdagende opgave als een symbolisch gebaar met weinig effect.

**Symbolisch gebaar:** „Slechts“ 5% vermindering zal de stijgende tendens op geen enkele manier veranderen. Dit zal hooguit de toename van de onbalans, die ieder jaar groter wordt, enigszins afvlakken.



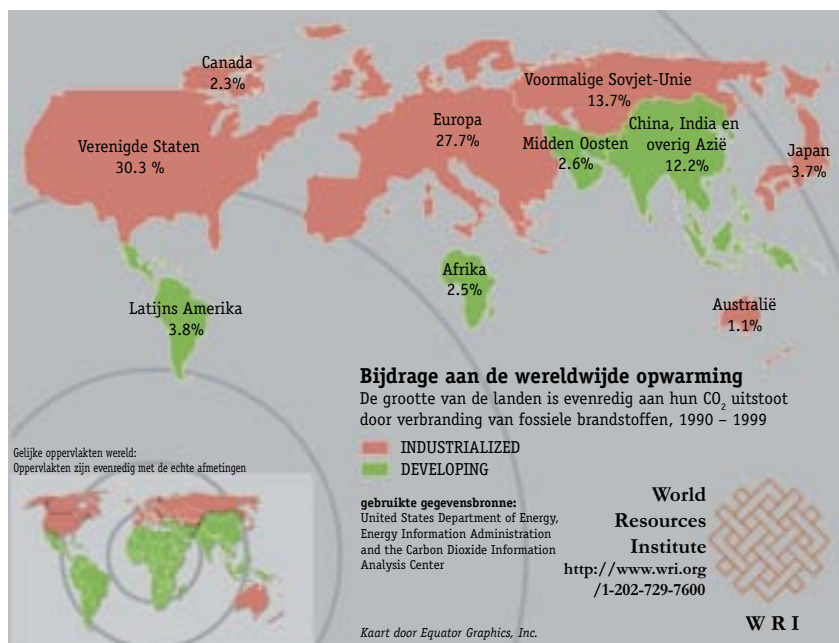
### Uitdaging op grote schaal:

- „Kyoto“ is uniek: Voor de eerste keer in de geschiedenis is er een internationaal akkoord over het wereldwijde milieu gesloten in de vorm van een bindende juridische verplichting voor de landen die ondertekend hebben met echte sancties voor het geval ze hun verplichtingen niet nakomen..
- Deze doelstelling om de uitstoot te beperken is niet het einde maar een begin. Het Kyoto Protocol is een veranderend stelsel van afspraken: de bindende afspraken over emissiebeperking worden voor periodes van vijf jaar aangegaan. Voor iedere nieuwe periode kan de internationale gemeenschap, als ze die keuze maakt, doelen stellen die steeds strenger worden.
- De doelstelling gaat uit van een vergelijking met 1990, maar sinds die tijd zijn de emissies steeds gestegen. Zo beschouwd is een 5% reductie in 2012, vergeleken met 1990, in werkelijkheid veel groter als je die vergelijkt met het huidige emissieniveau. We kunnen echter vraagtekens zetten bij het vermogen van bepaalde landen om zich aan de afspraken te houden. Een extreem voorbeeld is Spanje, dat in 2002 haar emissie van 1990 met 39% overschreed.<sup>6</sup>



De 'afstand ten opzichte van de lineair veronderstelde doelstelling', weergegeven door staven, geeft het gat aan tussen de hypothetische doelstelling vastgesteld voor 2002 en de werkelijke emissie in 2002. Bij het vaststellen van de hypothetische doelstelling voor 2002 veronderstelt men dat de toegestane emissies door lidstaten tussen 1990 en 2012 een lineair traject volgen. De afstand tot de op deze wijze afgeleide doelstelling is uitgedrukt als percentage.

© European Environment Agency, 2004



### Bijdrage aan de wereldwijde opwarming

De grootte van de landen is evenredig aan hun CO<sub>2</sub> uitstoot door verbranding van fossiele brandstoffen, 1990 - 1999.

© World Resource Institute

6) De kloof is veel kleiner voor de 15 landen van de EU tezamen: de emissie in 2002 overschreed die van 1990 slechts met 1,4%, voornamelijk te wijten aan de voortdurende toename van het wegtransport

## In de cyclus of niet?

Alle vormen van verbranding leveren CO<sub>2</sub> op, maar niet alle CO<sub>2</sub>-uitstoot vergroot automatisch de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de koolstofcyclus. Het hangt er maar net vanaf wat je verbrandt!

- De koolstof in iedere brandstof van plantaardige herkomst (b.v. hout) maakt al deel uit van de cyclus. Het bevond zich in de atmosfeer, en daaruit werd het door fotosynthese door de plant gewonnen en opgeslagen, en het wordt 'teruggegeven' tijdens verbranding. Verbrand of niet, de koolstof wordt hoe dan ook teruggegeven wanneer de plant sterft. Deze koolstof bevindt zich in de cyclus. Deze uitstoot wordt neutraal genoemd onder één klemmende voorwaarde: voor iedere verbrande of gekapte boom, moet een andere boom „vanzelf“ gaan groeien of herplant worden.
- Anderzijds bevinden brandstoffen van fossiele herkomst (kolen, olie en natuurlijk gas) zich niet langer in de cyclus. Het zijn reservoirs van koolstof, opgebouwd gedurende geologische tijdperken. Ze vormen een formidabele energiebron, maar de prijs is hoog. Als fossiele brandstoffen verbrand worden, geven ze CO<sub>2</sub> af aan de lucht, CO<sub>2</sub> die daar miljoenen jaren niet aanwezig was. Het is alsof je een kraan opendraait in een erg gesloten en complex, maar toch gebalanceerd systeem. De kraan voegt steeds grotere hoeveelheden van één van de componenten toe. De stroom wordt steeds maar groter, ondanks aanwijzingen dat ze het hele systeem ontwricht.

Dat is waarom het vervangen van fossiele brandstoffen door brandstoffen met een plantaardige herkomst (biogas, hout en dergelijke), zolang het niet ten koste gaat van bosoppervlak, uitstoot van CO<sub>2</sub> van buiten de cyclus vervangt door uitstoot van CO<sub>2</sub> die zich al in de cyclus bevond. Vanaf nu kan dit uitgevoerd worden zonder de atmosferische concentraties aan te tasten. Dezelfde logica gaat op voor huizen, als je het cement of de stenen (die veel energie kosten) vervangt door hout (dat de koolstof die het bevat ook behoudt).

## Hoe kunnen we uitstoot verminderen?

Dit is de sleutelvraag voor de maatschappij, geïnitieerd door de bezorgdheid over klimaatverandering.

De meest voor de hand liggende manier is uitstoot bij de bron te verminderen: De schoonste energie is de energie die we niet gebruiken. Verhoogd gebruik van openbaar vervoer, fietsen, hernieuwbare energie, hergebruik enzovoorts zijn de beste methoden.

Een andere manier is nieuwe energiebronnen en schone technologie ontwikkelen, die het energierendement kunnen verhogen en de uitstoot van broeikasgassen kunnen verminderen of zelfs geheel doen verdwijnen: biogas, brandstofcellen, elektriciteit uit kernfusie, enz.

Omdat alle mogelijke middelen benut moeten worden, keurt het Kyoto protocol ook de natuurlijke opslag van koolstof door de aanplant van nieuwe bossen goed. Het uitgangspunt is helder: Totdat we technische oplossingen implementeren of ons gedrag veranderen zodat uitstoot aanzienlijk vermindert, zijn alle andere oplossingen die tijdswinst opleveren welkom.

Toch zijn we er in wetenschappelijk opzicht niet helemaal zeker van dat dit werkt. We weten dat bomen op de top van

hun groeiperiode een middel zijn om tijdelijk CO<sub>2</sub> in plantvorm te behouden, maar we weten niet hoe deze opslagmethode op langere termijn werkt. Hoe ontwikkelt de absorptiecapaciteit zich in 10, 100 of 300 jaar? Hoe lang kunnen we er vanuit gaan dat deze koolstof, 'kunstmatig' opgeslagen in bossen, daar werkelijk gevangen blijft? Welk type bos en bosbeheer zijn het meest bevorderlijk voor koolstofopslag?

## Onze ontwikkelingsmodellen mondiaal en ethisch ter discussie

Filosofisch gezien kunnen we onszelf afvragen of 'de mensheid echt de inventaris opmaakt van de bedreigingen van haar bestaan?' Het Kyoto protocol zelf is hierop een verhelderend antwoord: De eerste bindende toezeggingen zijn niet alleen te vrijblijvend om het proces terug te draaien, maar na zeven jaar wordt ook duidelijk dat sommige landen niet in staat zijn hun beloften na te komen.

Aan de andere kant van de verantwoordelijkheidsketen, namelijk op individueel niveau, ziet het er niet veel beter uit. In de ontwikkelde landen (verantwoordelijk voor de meeste uitstoot), vormen mensen die echt hun levenswijze hebben veranderd en hun best doen hun eigen uitstoot te beperken, een erg kleine minderheid.





Geprikkeld door de media en de milieubeweging is de *publieke bewustwording* zonder twijfel enorm gegroeid. De werkelijkheid laat echter zien dat zowel op individueel als op collectief niveau, *woorden over het algemeen nog niet zijn omgezet in daden*.

### Drie serieuze obstakels tekenen zich af:

- 1) De wereldwijde milieuverandering is niet waarneembaar; de broeikasgassen zijn niet direct schadelijk: CO<sub>2</sub> heeft geen geur, en geen merkbare nadelige resultaten op korte termijn, of in de buurt van zijn bronnen. Verder hebben mensen het gevoel, door het wereldomspannende karakter, dat wat ze persoonlijk kunnen doen altijd verwaarloosbaar is en geen verschil maakt.
- 2) De omvang van het risico is onzeker. Hoe kunnen wij vandaag actie ondernemen tegen de problemen van morgen, als we niet helemaal weten wat die problemen zullen zijn? Over dit onderwerp, net als bij vele andere (genetische manipulatie, veevoer, kernenergie, enz.), duiken twee tegengestelde meningen op:
  - Sommigen menen dat, *zolang we geen duidelijk bewijs van de risico's hebben*, we door kunnen gaan met het experiment.
  - Anderen vinden dat het onomkeerbare karakter en de ernst van de risico's waar we mee te maken hebben, ons dwingen om *vroeg te stoppen, omdat er geen bewijs is van het ontbreken van risico's*: Dit zijn de aanhangers van het 'voorzorgprincipe'. Dat principe is één van de fundamenten van het Kyoto Protocol.
- 3) Geweldige krachten van lethargie en weerstand tegen verandering (veroorzaakt door industriële lobby's, maar uiteindelijk door ons allemaal) beheersen onze samenlevingen. Dat onderstreept het permanente spanningsveld tussen collectieve en individuele belangen.
  - Het fenomeen wordt slechts door een deel van de mensheid veroorzaakt (de geïndustrialiseerde wereld), maar iedereen lijdt onder de gevolgen. Sommigen zien dit als *een daad van milieuagressie* van de ontwikkelde landen tegen de rest van de wereld.
  - Het arme en minder bevoorrechte deel van de wereld heeft de minste mogelijkheden om zich aan te passen, en zal daardoor de meeste schade ondervinden van klimaatveranderingen.

Al met al, zelfs als de wetenschap nieuwe antwoorden op belangrijke vragen geeft, is het een kwestie van het in evenwicht brengen van tegenstrijdige behoeften in de maatschappij (b.v., energie en mobiliteit versus het behouden van natuurlijke hulpbronnen), en tegenovergestelde belangen (die van b.v. de huidige economie; ecosystemen en biodiversiteit; toekomstige generaties; geïndustrialiseerde en niet-geïndustrialiseerde landen; rijke en arme landen enz.). Deze belangen zijn nu, met het huidige dominante en onduurzame concept van groei, absoluut niet in evenwicht. Los van wetenschappelijk bewijs, vraagt dit lastige dilemma om ethische criteria. Feitenkennis alleen is niet genoeg.

**De uitdaging van wereldwijde milieuverandering dwingt ons tot het heroverwegen van onze hele relatie met het milieu, met het behoud van natuurlijk evenwicht, met het delen van hulpbronnen en welvaart, en met het begrip van groei. Ontwikkeling zal meer dan ooit het smeden van nieuwe allianties op wereldniveau betekenen, in plaats van het veiligstellen van belangen van groepen, landen of zelfs groepen landen. Zullen we in staat zijn samen oplossingen te implementeren, als één mensheid die één planeet bevolkt, zodat we ons kunnen aanpassen aan de veranderingen die we al veroorzaakt hebben? En kunnen we verdere ontwikkeling najagen zonder de balans van het systeem aarde verder in gevaar te brengen?**



Ijsbeersporen – Transarctische vaartocht op de Zweedse ijsbreker Oden.

© Toste Tanhua, Leibniz instituut voor mariene wetenschappen, Universiteit van Kiel, Duitsland

## Het begrijpen en kwantificeren van Europa's koolstofbalans.

**Wat is de rol van het Europese continent in de wereldwijde koolstofkringloop?**

**Om preciezer te zijn: Wat is Europa's koolstofcyclus? Hoeveel CO<sub>2</sub> stoot Europa uit en hoeveel absorbeert het? Hoe kunnen we de onzekerheden verkleinen van onze schattingen ervan op een lokaal, regionaal en continentaal niveau? Welke mechanismen bepalen de CO<sub>2</sub>-uitwisselingen in de biosfeer, en hoe worden zij beïnvloed door veranderingen in het gebruik, beheer en klimaat van de bodem? Zijn de Europese inspanningen om CO<sub>2</sub>-uitstoot te beperken waarneembaar in de atmosfeer?**

**Sinds januari 2004 werken binnen CarboEurope honderden Europese onderzoekers aan deze vragen. Dat is cruciaal vanuit wetenschappelijk en politiek oogpunt. Fluxmasten, mobiele laboratoria, intensieve meetcampagnes, een nieuwe generatie computermodellen: Met een budget van meer dan 40 miljoen euro (waarvan 16 miljoen van de EU) en 90 instellingen uit 17 deelnemende landen voor een periode van vijf jaar, is CarboEurope wereldwijd het meest omvangrijke wetenschappelijke initiatief om de koolstofkringloop in kaart te brengen.**



*Het atmosferisch Meetstation Lutjewad aan de Groninger Waddenzee-kust (Nederland).*

© Rolf Neubert, Centrum voor IsotopenOnderzoek, Rijksuniversiteit Groningen, Nederland

### 1. Wat zijn onze doelen?

#### Het kwantificeren van de koolstofuitwisselingen op het Europese continent

Hoe reist koolstof binnen het enorme aantal natuurlijke en menselijke systemen op het Europese continent? Wat is de koolstofbalans van Europa? Hoe is het ruimtelijk verdeeld en hoe ontwikkelt het zich in de tijd? Waar zijn de koolstofvoorraden en hoe variëren ze?

Europa is verre van een homogeen continent. De bevolking is ongelijkmatig verdeeld, en er zijn veel klimatologisch en geografisch verschillende regio's. Wat betreft CO<sub>2</sub>-fluxen is Europa een waar mozaïek van bronnen en putten. Het varieert steeds door het seizoen, o.i.v. meteorologische omstandigheden, bodemgebruik en -beheer enz. We willen de bronnen en putten van dit mozaïek en hun ontwikkeling vaststellen, van lokale naar continentale schaal, met zo hoog mogelijke nauwkeurigheid en precisie.

#### Naar een beter begrip van verklaringen voor deze veranderingen, op alle mogelijke niveaus

Welke mechanismen beheersen de koolstofkringloop in Europese ecosystemen, en bepalen daarmee het mozaïek van koolstoffluxen? Hoe beïnvloeden menselijke verstoringen – vooral veranderingen in klimaat en bodemgebruik – deze mechanismen en daarmee de Europese koolstofbalans? Bijvoorbeeld, kan toename in de groeisnelheid in bepaalde bossen (met wel 40% of meer in 50-jaar oude bossen) toegeschreven worden aan de toename van atmosferische CO<sub>2</sub>?

CarboEurope gaat nieuwe antwoorden geven op deze vragen voor elk groot systeemonderdeel: Vegetatie (bossen, hooiland, natte gronden, cultuurland), bodem, atmosfeer enz. op drie niveaus: Lokaal, regionaal en continentaal. De aandacht zal vooral gericht zijn op:

- De verdeling van CO<sub>2</sub>-fluxen tussen de drie voornaamste uitwisselingstypen: De CO<sub>2</sub>-productie van de biosfeer door afbraak van organisch materiaal, oogst en branden; assimilatie door planten; en verbranding van fossiele brandstoffen.
- De manier waarop deze verdeling zich ontwikkelt in ruimte en tijd en als gevolg van menselijke activiteiten.

Begrijpen gaat verder dan louter beschrijving: Het betekent de ontdekking van ecologische verbanden en de wiskundige wetten achter al deze mechanismen.



Puechabon fluxmast, Frankrijk.

© Jean-Marc Ourcival, CEFE, Montpellier, Frankrijk

## De EU voorzien van de wetenschappelijke instrumenten, nodig voor het controleren van de toezeggingen in het kader van het Kyoto Protocol

Om haar toezeggingen op het gebied van uitstootreductie waar te maken, kan de EU maatregelen nemen om de uitstoot bij de bron te verminderen (door stimulerend beleid te ontwikkelen voor openbaar vervoer, schone industrie, hernieuwbare energie enz.) en om de natuurlijke opslag van koolstof te vermeerderen (vooral op het gebied van bosbeheer en -aanplant, maar ook binnen de landbouw). Zullen we in staat zijn de vermindering van atmosferisch CO<sub>2</sub> te meten, als gevolg van onze pogingen? Hoe kunnen we nagaan dat het doel – uitstoot verminderen – echt gehaald is en dat de gebruikte methode werkelijk effectief is?

CarboEurope zal de EU voorzien van een observatiesysteem om veranderingen in koolstofvoorraden en -fluxen op te sporen. Vooruitlopend op de onderhandelingen voor de volgende door het protocol beoogde periode van verplichtingen (2013 tot 2018), zullen we bovendien de grondslagen leggen voor een nauwkeurig boekhoudsysteem van koolstofvoorraden en -fluxen. Dat systeem zullen alle landen van de Europese Unie gaan toepassen.

## 2. Waar baseren we ons op?

CarboEurope borduurt voort op meerdere Europese projecten over verschillende aspecten van de koolstofcyclus die sinds 1996 lopen. Deze projecten hebben gezorgd voor de ontwikkeling van belangrijke meetnetwerken, waarop huidig onderzoek is gebaseerd, zoals de methode van fluxmasten.

De fluxmasten zijn als het ware de ruggengraat van CarboEurope: Ze meten non-stop 24 uur per dag de koolstofflux, dat wil zeggen de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die geabsorbeerd of uitgestoten wordt door een specifiek meetgebied, als een functie van tijd, weersomstandigheden, seizoenen, enz.

Op die manier hebben we onlangs een fundamenteel gegeven ontdekt: De bossen en grasvlakten van de EU absorberen van nature significante hoeveelheden koolstof, tussen de 7 en 11% van Europese CO<sub>2</sub>-uitstoot door fossiele brandstoffen. Maar deze sleutel informatie leidt ons terug naar belangrijke onbekende factoren: Wat gebeurt er met de koolstof die opgeslagen wordt in deze natuurlijke Europese putten? Is het permanent of tijdelijk opgeslagen? Hoe kwetsbaar zijn natuurlijke putten voor klimaatverandering?



SkyArrow, 's werelds kleinste gecertificeerde onderzoeksvliegtuig, meet de flux van CO<sub>2</sub> en waterdamp.

© Marcus Schumacher, Max-Planck-Instituut voor Biogeochemie, Jena, Duitsland

□

### 3. Hoe gaan we te werk?

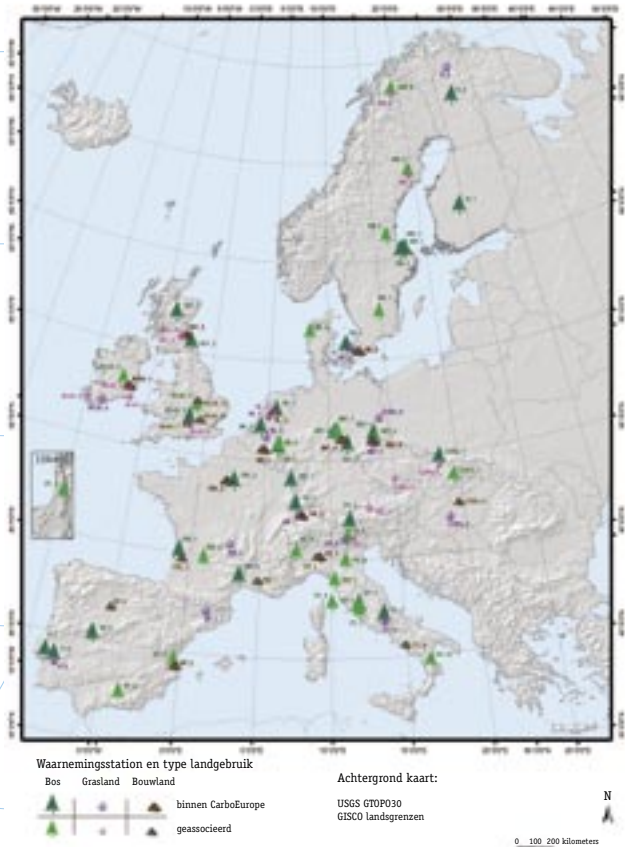
#### Een veelheid aan methoden en waarnemingsposten

Het algemene principe is simpel: om Europa's koolstofbalans zo nauwkeurig mogelijk te schatten en om de leidende mechanismen beter te begrijpen, moeten we het aantal waarnemingsposten uitbreiden, de frequentie van onze waarnemingen verhogen, en onze waarnemingen en modellen met meer samenhang formuleren. Daarom is een groot aantal gecoördineerde acties van start gegaan:

- Een netwerk van ongeveer honderd waarnemingsposten, elk voorzien van een fluxmast.
- Een netwerk van een dozijn hele grote masten, tot 400 meter hoog, die in staat zijn om fluxen waar te nemen voor een hele regio (van circa 500 km<sup>2</sup>, in plaats van de 1 km<sup>2</sup> van klassieke fluxmasten). Ook kunnen deze grote masten concentraties meten op verschillende hoogten in de lage atmosfeer.

- Een netwerk van grondstations in omgevingen met erg weinig menselijke bemoeienis (op eilanden of bergtoppen) om natuurlijke mechanismen te kunnen onderscheiden van de 'ruis' die menselijke activiteit veroorzaakt.
- Zes vliegvelden waarvandaan verschillende onderzoeks-vliegtuigen vluchten kunnen uitvoeren om luchtmonsters te verzamelen.
- Een intensief regionaal project dat alle beschikbare instrumenten en technologieën met elkaar verbindt, zodat de hoogst mogelijke nauwkeurigheid behaald wordt. Dit project zal in 2007 plaatsvinden in de Bordeauxregio in Frankrijk.
- Een enorme computer-inzet om modellen te bouwen, data te delen en te integreren.

Deze activiteiten stellen ons in staat de koolstofcyclus te „bekijken“ op een zo duidelijk mogelijke manier voor het hele continent. Een groot probleem is wel om bij deze schaalvergroting toch het gedetailleerde begrip in het oog te houden.



Flux/Ecologie waarnemingsstations binnen CarboEurope IP.

© CarboEurope-IP

#### Flux en concentratie

Een **flux** is een hoeveelheid materiaal (in dit geval CO<sub>2</sub> of koolstof) dat een bepaalde gebiedseenheid passeert in een bepaalde tijdseenheid. De fluxen waar het hier om gaat zijn positief of negatief in verticale richting, dat hangt ervan af of ze omhoog (uitstoot) of omlaag (absorptie) afgegeven worden. Bijvoorbeeld: +7 gram koolstof per dag per vierkante meter.

Een **concentratie** is het aandeel van een gas (in dit geval CO<sub>2</sub>) in een mengsel (hier de lucht). Het wordt daarom uitgedrukt als een relatieve waarde, op een gegeven punt, op een bepaald moment in de tijd: b.v. aan het eind van de twintigste eeuw bevatte de atmosfeer ongeveer 370 ppm (deeltjes per miljoen) aan CO<sub>2</sub>.

**Fluxen zijn erg lokaal** zowel in plaats als in tijd: als functie van vegetatietype, breedtegraad, seizoen en meteorologische omstandigheden, variëren ze constant van plek tot plek en van tijd tot tijd. Daarentegen zijn **atmosferische concentraties meer wereldwijd en minder veranderlijk**: CO<sub>2</sub> verspreidt zich erg snel door de atmosfeer, en concentraties zou je kunnen zien als mondiale 'uitsmering' van de optelsom van alle fluxen op de schaal van een hele regio. Toch is de menging niet perfect en blijven veelzeggende verschillen bestaan. Zo liggen bijvoorbeeld de waarden op het noordelijk halfrond gemiddeld 3 tot 4 ppm hoger: De meerderheid van emissies vindt daar namelijk plaats. De concentraties zijn lager boven bossen, dat zijn de belangrijkste natuurlijke putten van CO<sub>2</sub>.





## Hoe groter je het maakt, des te vager het wordt....

### Het dilemma is eenvoudig:

- Hoe kleiner hetgeen je bestudeert, hoe beter je het in beeld krijgt, maar hoe minder typerend het is voor het geheel; dit in tegenstelling tot:
- Hoe groter hetgeen je bestudeert hoe meer overzicht je krijgt maar hoe minder gedetailleerd (vager) het overzicht wordt.

Onze grote opgave is daarom om binnen Europa de details op steeds grotere schaal te gaan zien. Aangezien we niet in staat zijn om heel Europa van meetpalen te voorzien die op 1 km van elkaar af staan, moeten we een truc toepassen.

Het sleutelwoord daarbij is extrapolatie: Gebruik maken van een klein aantal nauwkeurige metingen, die vanuit meerdere plaatsen beschikbaar zijn, en deze zodanig bewerken dat hiermee uitspraken kunnen worden gedaan voor grotere gebieden, ook al brengt dit onzekerheden met zich mee in plaats en tijd.

En de truc, met andere woorden het methodologische antwoord van CarboEurope, is om de grootst mogelijke verscheidenheid aan onderzoeksmethoden met elkaar te integreren: Door data-bestanden aan elkaar te koppelen en meet- en rekentechnieken er op los te laten zullen we in staat zijn om een maximum aan informatie te verkrijgen om zo meer trends te ontdekken en nauwkeurig in beeld te brengen. Dit wordt „Aanpak met meervoudige randvoorwaarden“ genoemd.



## ....en hoe meer je samenvoegt hoe duidelijker de dingen worden

Deze strategie van maximale integratie biedt drie aanzienlijke wetenschappelijke uitdagingen:

- 1) Opschalen door integratie: door instrumenten te combineren die op kleine schaal veel kunnen waarnemen (bijv. meetpalen), met andere die grootschalig minder details waarnemen (hoge torens, vliegtuigen en satellieten) kunnen we hun data met elkaar vergelijken en vervolgens met grotere betrouwbaarheid extrapoleren.
- 2) Het in verband brengen van alle componenten waar uitwisseling plaatsvindt (bossen, vlakten, akkers, moerassen, de aarde, de atmosfeer enz. ) met meetwaarden van het Europees klimaat, dit van de Middellandse zee tot de poolcirkel.
- 3) Het integreren van modeltechnieken
  - De directe manier gaat van 'laag' naar 'hoog'. Op basis van wat we reeds weten over de natuurlijke processen en de fluxen in de kleine gebieden rondom de torens kunnen we een model maken voor de fluxen op een groot gebied. Daarna kunnen we uitrekenen wat voor effect en bijdrage deze fluxen geven aan de mondiale CO<sub>2</sub>-concentraties in de atmosfeer. We stemmen het model nauwkeurig bij tot de berekende waarden overeenkomen met de gemeten concentraties.
  - De „inverse“ of omgekeerde manier gaat andersom van 'hoog' naar 'laag'. Op basis van veranderingen - die gemeten zijn in concentraties van de atmosfeer over een groot gebied - wordt een model gemaakt dat omgekeerd werkt om zo de fluxen voor zeker gebied uit te rekenen die tot die veranderingen in concentratie hebben geleid.

Omdat beide methoden hun sterke en zwakke kanten hebben, levert de combinatie van beide een beeld op dat betrouwbaarder de werkelijkheid weergeeft. CarboEurope zal deze beide methoden eerst combineren om zo wekelijks tot maandelijks kaarten te produceren die de koolstofbalans van Europa weergeven met een resolutie van 50 x 50 km<sup>2</sup>.

*Onderhoudswerk in een fluxmast - Hanich Nationaal Park, Duitsland.*

© Bertram Smolny, Max-Planck-Instituut voor Biogeochemie, Jena, Duitsland



*In het atmosferisch Meetstation Lutjewad aan de Groninger Waddenzeekust (Nederland) worden twee keer per maand CO<sub>2</sub>-monsters genomen voor C-14 metingen.*

© Rolf Neubert, Centrum voor IsotopenOnderzoek, Rijksuniversiteit Groningen, Nederland

## De CO<sub>2</sub> kaart van Europa : Hoe kunnen de witte vlekken invullen?

Een van de belangrijkste doelen van CarboEurope (om de CO<sub>2</sub>-fluxen in Europa in kaart te brengen) is een goed voorbeeld waar de aanpak met meervoudige randvoorwaarden de koolstofbalans van het continent kan bepalen.

### Over welke informatie kunnen we beschikken om deze kaart te tekenen?

1) We hebben de data van de meetpalen: dit zijn continue metingen, maar op slechts één plaats. Dit levert een bijna geheel blanco kaart met slechts hier en daar een klein aantal zichtbare plaatsen waar een grote hoeveelheid informatie aanwezig is.

2) Als andere uiterste zijn er groot-schalige concentratiemetingen die representatief zijn voor het hele continent, maar die weinig informatie geven over de herkomst van de gemeten CO<sub>2</sub>. Met deze concentraties zien we het gevolg van de fluxen in kaart gebracht voor heel Europa, maar het beeld is zo onduidelijk dat het zich slechts tot één kleur beperkt, die bovendien maar weinig verandert van de ene dag na de andere. Zelf de geringste veranderingen in deze „kleur“ geven echter hoogst waardevolle informatie.

3) Tot slot beschikken we over data afkomstig van satellieten. Deze geven voor zowel kleine als grote gebieden allerlei nauwkeurige informatie voor elke plek van de kaart, zonder witte vlekken. Een fluxkaart is dit echter niet, want satellieten kunnen geen fluxen waarnemen. Satellietbeelden leveren gedetailleerde anderssoortige kaarten, van verschijnselen die met fluxen samenhangen: Bijvoorbeeld energie-uitwisseling op grondniveau, gewassoorten, of weerkundige data.

Door deze drie verschillende waarnemingen met elkaar te combineren krijgen we een kaart die zowel veel witte vlekken als veel informatie bevat. Anders gezegd: Het is een reeks vergelijkingen met veel onbekenden. Het geheim om deze vergelijkingen met veel onbekenden op te lossen is om ze naast elkaar te plaatsen en

om de oplossing van de ene vergelijking te gebruiken om het aantal onbekenden in de andere te verminderen. Hoe meer de bronnen verschillend van elkaar zijn, hoe meer grip men op het probleem krijgt en hoe groter de kans wordt om de oplossingen te vinden. Daarvoor worden onze computermodellen gebruikt: Het zijn prachtige technieken om complexe vergelijkingen op te lossen.

Eenvoudig gezegd: een zeer nauwkeurige kaart die voor 99% niet ingevuld is (van de meetpalen) plus een volledige maar ongedetailleerde kaart (van concentratiemetingen) plus nauwkeurige kaarten met gegevens die indirect verband houden met de CO<sub>2</sub>-uitwisseling (van satellieten) plus computermodellen plus een schat van vijf jaar aan metingen, berekeningen, onnauwkeurigheden en benaderingen geven uiteindelijk een prachtige fluxkaart voor Europa als CarboEurope is afgerond!



## CARBOCEAN

### Het verminderen van de onzekerheden in de koolstofbronnen en -putten van de oceanen.



*Maan op de Noordpool – Een trans-artische tocht aan boord van de Zweedse ijsbreker Oden.*

© Toste Tanhua, Leibnitz instituut voor mariene wetenschappen, Universiteit van Kiel, Duitsland

Men schat dat de oceanen tegenwoordig zo'n 20 tot 40 % absorberen van alle CO<sub>2</sub> die door de mens jaarlijks in de atmosfeer wordt gebracht. Dit levert een substantiële vertraging op in de wereldwijde opwarming. Maar ligt deze waarde dichter bij de 20 of bij de 40%? Met zo'n onzekerheidsmarge is het moeilijk om precies te voorspellen hoe het klimaat gaat veranderen!

Wat is nu de exacte hoeveelheid CO<sub>2</sub> die geabsorbeerd wordt? Hoe wordt het CO<sub>2</sub> in de oceanen getransporteerd en opgeslagen? Wat zijn de gevolgen van deze CO<sub>2</sub>-verrijking voor het water? Wat voor gevolgen zal deze toenemende menselijke verstoring uiteindelijk hebben voor het wereldwijde milieu?

Rond deze belangrijke vragen hebben 40 instituten in 15 landen zich sinds januari 2005 gebundeld in een tweede EU 'integraal onderzoeksproject', CarboOcean. Gedurende 5 jaar, met een EU bijdrage van 14,5 miljoen euro aan de totale kosten van zo'n 30 miljoen euro, bevaart een vloot van oceanografische schepen, vrachtschepen uitgerust met meetapparatuur, en boeien voor onderwaterexperimenten, de wereldzeeën voor een weergaloos Europees experiment van observeren, analyseren en modelleren.

*USCGC Healy van de Kustwacht van de Verenigde Staten.*

© CarboOcean

### 1. Wat zijn onze doelstellingen?

CarboOcean heeft een doel voor ogen dat zowel eenvoudig als ambitieus is: Meer dan twee keer zo nauwkeurig te weten te komen hoeveel CO<sub>2</sub> er opgenomen wordt door de oceanen in het algemeen, en vier keer zo nauwkeurig voor de Atlantische Oceaan en de Zuidelijke Oceanen.

**Om dit te bereiken, voor een periode van 200 jaar geleden tot 200 jaar in de toekomst, willen we het volgende proberen:**

- Het bepalen van de uitwisseling van CO<sub>2</sub> tussen lucht en zee, zowel tijds- als plaatsafhankelijk en met een hoge precisie. Verder hoe deze uitwisseling - en vele hiermee verbandhoudende parameters (koolstofconcentratie in het water, de temperatuur, het zoutgehalte, biologische factoren, etc.) - zich in de tijd ontwikkelt als reactie op de toenemende atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie. We willen jaarlijks kaarten maken van de CO<sub>2</sub>-concentraties voor de Noord Atlantisch Oceaan, die CarboEurope vervolgens weer kan gebruiken om de CO<sub>2</sub> kaarten voor het vaste land te verfijnen.
- Het beter begrijpen van de vele fysische, chemische en biologische processen die bepalend zijn voor de uitwisseling van CO<sub>2</sub> zowel tussen de atmosfeer en de oceaan, als tussen oppervlakte en diepe wateren.

Uiteindelijk zal CarboOcean helpen om de twee cruciale vragen te beantwoorden waarmee de klimaatsverandering de mensheid uitdaagt: 'Hoe zal het voor ons uitpakken?' en 'Hoeveel gaat het ons kosten?' Door met grotere nauwkeurigheid te kunnen schatten hoeveel CO<sub>2</sub> door de oceanen geabsorbeerd wordt zullen de volgende punten met een grotere precisie te voorspellen zijn:

- Hoe is de relatie tussen de opwarming en de diverse CO<sub>2</sub> emissiescenario's?
- Hoe effectief zijn de verschillende type oplossingen die men zich voorneemt (beperking van emissies, aanpakken van de gevolgen, etc.) t.o.v. van hun kosten?







Het uitzetten van een zeebodemboor in het Faroer-Shetland kanaal tijdens een expeditie aan boord van R/V Håkon Mosby.

© Dag Inge Blindheim, Bjerkness Centrum voor Klimaatonderzoek, Bergen, Noorwegen

## 2. Waar vertrouwen we op?

CarboOcean is tot stand gekomen als opvolger van nationale en internationale oceanografische projecten, die de afgelopen 10 jaar steeds meer vorm gegeven hebben aan een wereldnetwerk om mariene koolstof te bestuderen. Dit wereldnetwerk, waarvan CarboOcean nu de Europese bijdrage is, vormt onze belangrijkste bron voor de gegevens die nodig zijn om de koolstofcyclus van de zee te bestuderen.

Recente studies maakten het ons mogelijk om aan te tonen dat gedurende de 19<sup>e</sup> en 20<sup>e</sup> eeuw (het grootste deel van het industriële tijdperk) ongeveer 30% van de CO<sub>2</sub> die afkomstig is van menselijke bronnen (m.b.t. de ontbossing en het kolossaal gebruik van kolen, olie en gas) geabsorbeerd is door de oceanen. Totaal gaat het daarbij om 118 Pg (met een onzekerheid van +/- 19 Pg).<sup>7</sup>

Weten we deze *totaalcijfers voor de laatste twee eeuwen* dus vrij nauwkeurig, de getallen die horen bij de *jaarlijkse* uitwisseling van CO<sub>2</sub> tussen zee en atmosfeer kennen we lang niet zo goed. Dat komt vooral doordat deze waarden van jaar tot jaar sterk blijken te variëren, afhankelijk van het seizoen, het jaar en van andere nu nog slecht begrepen verschijnselen. We moeten deze natuurlijke variaties beter leren kennen als we de invloed van de mens beter willen leren begrijpen. Dat is op dit moment een van de grootste uitdagingen van de koolstofcyclus.

7) Bron: Sabine et. Al. 2004

8) Ongeveer 118 Pg koolstof is afkomstig van de mens op een totaal van 40.000 Pg van koolstof in de oceaan. Dit is minder dan 0,3%; De atmosfeer bevat ongeveer 165 Pg koolstof afkomstig van de mens op een totaal van ongeveer 750 Pg, dit is 22%.

## 3. Hoe komen we vooruit?

Net als bij CarboEurope levert het zo nauwkeurig mogelijk combineren van de waarnemingen, de experimenten en de modellen (met als doel achtereenvolgens de beschrijving, het begrip en de voorspellingen) vooruitgang op.



© Dorothee Bakker, Universiteit van East Anglia, Verenigd Koninkrijk.

### Een CO<sub>2</sub>-waarnemingssysteem in de Atlantische Oceaan

Hoeveel koolstof afkomstig van menselijke bronnen is opgeslagen in de oceanen? Het verkrijgen van deze basisgegevens is op zich al een uitdaging: De koolstof is onregelmatig verdeeld, en afhankelijk van plaats, stroming en seizoenen. Bovendien is het deel dat afkomstig is van menselijke uitstoot zeer klein in vergelijking met de totale hoeveelheid koolstof die in de oceanen aanwezig is<sup>8</sup>. De enige manier om toch een nauwkeurig beeld te krijgen is het verzamelen van zoveel mogelijk gegevens van zoveel mogelijk plaatsen.

Het is nu zo'n 10 jaar mogelijk om koopvaardij schepen uit te rusten met nauwkeurig afgestemde instrumenten om zo gedurende hun vaste routes data te verzamelen. We noemen deze schepen 'VOS-lijndiensten'. Dit staat voor 'Vrijwillig Observerende Schepen'. Langs deze scheepsroutes kunnen we concentratieveranderingen waarnemen in plaats en tijd, natuurlijk afhankelijk van de frequentie van deze commerciële vrachtdiensten. Door computermodellen te gebruiken kunnen we dan proberen deze veranderingen te extrapoleren om zo voor de hele oceaan, stap voor stap, een concentratiekaart te kunnen samenstellen.





## Waarom is de koolstofcyclus in de oceanen veel slechter bekend dan die op het land?

- De oceanen zijn nog steeds niet goed onderzocht. Terwijl er vooruitgang is en nog steeds wordt geboekt op het land, blijven de oceanen daarmee vergeleken onderbelicht. Dit komt door de enorme afmetingen ( 71 % van het aardoppervlak), maar vooral door hun slechte bereikbaarheid. Verder is de oceaan verre van homogeen en zijn er vele factoren die verantwoordelijk zijn voor de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die opgeslagen kan worden. Hoe hoger de temperatuur hoe minder gas er in het water kan oplossen (dit kan makkelijk worden waargenomen door frisdrank uit de koelkast in te schenken, hoe meer het glas opwarmt des te meer gas uit de vloeistof opborrelt). Door deze temperatuurafhankelijkheid kan het koude water op hoge breedtes grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> absorberen en dit naar de bodem van de oceaan mee nemen. Het wordt vervolgens langs de bodem van de oceaan getransporteerd, en langzaam weer meegevoerd naar het oppervlak in de tropen, waar dit water opwarmt en vervolgens het CO<sub>2</sub> weer loslaat. Dit betekent:
  - a) *De verdeling van koolstof over de oceaan is zeer onregelmatig. Afhankelijk van stromingen, temperatuur, zoutgehalte, biologische activiteit, seizoenen en jaarlijkse schommelingen, varieert de concentratie aanzienlijk van plaats tot plaats, van dag tot dag, van jaar tot jaar. Dit in tegenstelling tot de atmosfeer, daarin mengt het CO<sub>2</sub> zich zo goed dat met een beperkt aantal meetplaatsen de gemiddelde concentraties voor de gehele aarde kunnen worden gevonden.*
  - b) *De CO<sub>2</sub> uitwisseling tussen lucht en zee is in het geheel niet homogeen. Op sommige plaatsen laat de oceaan op sommige tijden CO<sub>2</sub> vrij, terwijl op andere plaatsen en tijden de oceaan CO<sub>2</sub> absorbeert. De optelsom van deze waarden van de oceaan levert ons de schatting van 20 tot 40% voor de absorptie van door mensen gevormd CO<sub>2</sub>. Wat het verloop hiervan bepaalt met als variabelen de geografische breedte , seizoenen, jaren etc. is nog niet goed begrepen.*
- De oceaan is moeilijk toegankelijk, en tot op heden zijn er nog geen andere methoden om data van opgelost CO<sub>2</sub> te verkrijgen dan ter plaatse meten. Tot de dag van vandaag is nog geen methode beschikbaar om dit vanuit de ruimte te doen. Zee-expedities zijn altijd kostbaar en ingewikkeld, en moeten vaak onder moeilijke omstandigheden worden uitgevoerd; dit beperkt de mogelijkheden van meten en experimenteren.
- De tijdschaal voor een oceaan is vele malen groter dan een mensenleeftijd. De gemiddelde tijd die het water bijvoorbeeld nodig heeft om een cyclus te maken is grofweg duizend jaar. Deze cyclus is het gevolg van wind, de Coriolis-kracht en de veranderingen in de dichtheid, daardoor is de oceaan voortdurend in beweging op deze aarde.
- De oceaan is een complex geheel dat in verbinding staat met de continenten en de atmosfeer. Daarbij zijn een groot aantal kringlopen, zowel biologische, geologische als chemische betrokken, die werken over verschillende tijdschalen. Het is een hersenkraker waarbij elke verandering kettingreacties en tegenreacties veroorzaakt, elk met een verschillend tijdsverloop. Een groot deel van deze kettingreacties is nog steeds niet begrepen. De consequenties van de verstoringen die het gevolg zijn van menselijke activiteit zijn daarom heel moeilijk te berekenen. Daarbij komt ook nog eens dat de reacties niet altijd in dezelfde richting gaan: Sommige reacties versterken hun oorzaak, andere geven een dempend effect.

Om onze modellen van meer data - en dus van randvoorwaarden - te voorzien, kunnen we ook gebruik maken van een netwerk van meetstations. Deze stations zijn geautomatiseerde boeien die op dezelfde manier als schepen continu meten, maar dan vanaf een vaste positie. Er bestaat ook nog een andere soort automatische boei met de naam „Carioca“ (CARbon Interface Ocean Atmosphere). Deze kan in een oceanische golfstroom worden losgelaten en gedurende meer dan een jaar continu koolstofmetingen aan het oppervlak doorzenden naar satellieten.

VOS-lijndiensten, de vaste boeien en de Carioca-boeien zijn min of meer het zee-equivalent van het netwerk fluxmasten van CarboEurope: een netwerk van meetpunten, die zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst zijn, om de beperkingen van computermodellen te laten afnemen.

Deze verschillende instrumenten doen mee in een wereldwijde waarnemingspoging gecoördineerd door de 'Intergouvernementele Oceanografische Commissie' van de UNESCO.



*Mario Hoppema van het Alfred Wegener Instituut uit Bremerhaven neemt een watermonster tijdens een onderzoeksreis in de Stille Zuidzee op de R.V. Polarstern.*

© Dorothee Bakker, Universiteit van East Anglia, Verenigd Koninkrijk

Op internet kan je de trajecten van de VOS-lijndiensten, de plaatsen en de meetboeien vinden op <http://www.ioccp.org/>.

De voornaamste beperking van de geautomatiseerde systemen is dat ze alleen metingen aan het zeeoppervlak verrichten. We zullen ook moeten weten wat er onder water aan de hand is. Om dit te doen gaan we een nieuw type instrument testen: de 'automatische profielboei'. Dit is een soort minionderzeeër die informatie van verschillende diepten verzamelt en weer terugkeert naar het oppervlak om zijn data via een satelliet door te zenden, voordat het naar andere plaatsen zal worden gebracht om aldaar een nieuwe serie metingen te verrichten.

### **Zeeonderzoek om het proces van de CO<sub>2</sub>-uitwisseling, het transport en opslag in de oceanen beter te begrijpen**

Alle gegevens zoals hiervoor genoemd informeren ons over het 'wat', maar niet over het 'waarom' en 'hoe'. Wat gebeurt er met het CO<sub>2</sub> zodra dat door het oppervlak wordt geabsorbeerd? Om deze vraag te kunnen beantwoorden zit er niets anders op dan om uit te varen en die metingen en bemonsteringen te doen, die niet automatisch kunnen worden gedaan.

De grote vragen zijn: wat gebeurt er met de koolstof die door het water bij het oppervlak wordt geabsorbeerd, hoe dringt deze door in de oceaan en hoe wordt het naar de diepe wateren overgebracht? Het is vooral in de Noord-Atlantische oceaan, waar CO<sub>2</sub> afkomstig van de mens het snelst het diepst doordringt, waar we antwoorden hopen te vinden. Eigenlijk zien we grote tegenstrijdigheden tussen de computermodellen en de in zee gemeten data, zowel wat betreft de hoeveelheden CO<sub>2</sub> die door de Atlantische oceaan geabsorbeerd zijn als ook wat betreft de absorptie en opslaggebieden.

De antwoorden zoeken we in de poolgebieden, waar oceaanstromen het oppervlaktewater naar de bodem trekken. Er zijn verschillende expedities gepland naar Groenland en de Barentssee, om de veranderingen van het CO<sub>2</sub>-gehalte tot op de zeebodem uit te zoeken.



*Dorothee Bakker (Universiteit van East Anglia) bekijkt de werkzaamheden aan dek gedurende de eerste CROZEX expeditie aan boord van de RRS Discovery.*

© Alan Hughes, Nationaal Oceanografisch centrum, Southampton, Verenigd Koninkrijk



Deze expedities zullen het ook mogelijk maken om tekenen van verandering in de wereldwijde oceaanstromingen op te merken. Vroeg of laat zal de opwarming van de atmosfeer de manier gaan beïnvloeden waarin de oceanen warmte opslaan en over de wereld vervoeren. Deze veranderingen in stromingen zullen gevolgen hebben voor de CO<sub>2</sub>-uitwisseling op een manier die we nu nog niet kunnen voorspellen en berekenen.

### In het Middellandse Zeegebied en het Noordzegebied: Leren om lucht, water en land met elkaar te combineren

Uiteraard is er geen aparte koolstofcyclus voor de continenten, de atmosfeer en de oceanen: Er is slechts één cyclus in het systeem aarde die verdeeld is in diverse 'deelgebieden' die continu met elkaar in verbinding staan.

CarboOcean bestudeert de koolstofluxen in de zee; CarboEurope die op het land. Hoe kunnen we deze visies op de deelgebieden opwaarderen tot een geïntegreerde kijk op wat er nu werkelijk gebeurt in de natuur? Een verkenningsonderzoek in de Noordzee en het westelijk gedeelte van de Middellandse Zee, dat gezamenlijk door deze twee programma's wordt begeleid, gaat het mogelijk maken om de totale aanmaak van koolstof onder te verdelen in een atmosfeer-, een land - en een zeecomponent. Voor het eerst zal vanuit metingen ter plaatse, en dus niet door middel van computersimulaties alleen, een poging gedaan worden om experimenteel de getallen weer te geven die horen bij de koolstofluxen tussen lucht, zee en land. Het resultaat van deze studie zal zeer waardevol zijn om de verschillende onderdelen, die we eerst apart bestudeerden, te combineren tot op wereldschaal.



Universiteit van Los Palma (ES)- faculteit van mariene wetenschappen, afdeling scheikunde (ULPGC-QUIMA).  
Met het schip MSC Gina wordt gewerkt aan een nieuwe VOS-lijndienst van Engeland naar Kaapstad.

© ULPGC-QUIMA



Takeloperatie – Transarctische expeditie door de Zweedse ijsbreker Oden.

© Toste Tanhua, Leibnitz instituut voor mariene wetenschappen, Universiteit van Kiel, Duitsland

### Modelleren: Om samen te voegen en te kunnen voorspellen

Hoe kunnen we de ruwe data, die continu vanuit tal van instrumenten op zee beschikbaar komen nu zo bewerken dat er een reeks bruikbare grafieken en kaarten uit voortkomt? Net als bij CarboEurope kan de methode met één woord worden samengevat: samenvoegen en dus modelleren.

Voor de oceanen is de algemene aanpak hetzelfde als voor de continenten: Hoe meer informatiebronnen (VOS-lijndiensten, verschillende typen boeien, satelliet-waarnemingen, etc.) bewerkt worden, hoe meer we onze berekeningen kunnen verfijnen, hoe minder benaderingen we hoeven te maken en hoe meer we in staat zijn om:

- De werkelijkheid nauwkeurig weer te geven.
- De toekomstige ontwikkeling te voorspellen met de belangrijkste parameters.

Gezien de vele data en de natuurkundige (stromingen, temperaturen) en biologische complexiteit van de oceaan, is het modelleren hiervan een van de grootste wetenschappelijke uitdagingen binnen CarboOcean.

## De oceanen, een grote dumpplek voor afval uit de atmosfeer?

Tussen de vrij ingenieuze en praktische oplossingen, die zijn bedacht om klimaatsveranderingen het hoofd te bieden springen er twee ideeën uit. Beide hebben de bedoeling de opname van CO<sub>2</sub> door de oceanen te vergroten om zo de concentratie CO<sub>2</sub> in de atmosfeer te verkleinen:

- 1) Het oppeppen van de natuurlijke opnamecapaciteit van de oceanen door oppervlaktewater te bemesten d.m.v. het massaal verspreiden van ijzer, een essentieel element voor de groei van plankton. Dit verschijnsel komt van nature voor onder invloed van de wind. Belangrijke planktonbloei (en dus opname van CO<sub>2</sub>!) wordt regelmatig waargenomen als zand van de Sahara, dat rijk is aan ijzer, door de Sirocco in de oceanen wordt geblazen. Toch kan de grote hoeveelheid CO<sub>2</sub> die op deze manier tijdelijk opgenomen wordt misschien net zo snel weer naar de atmosfeer terugkeren en het is niet bekend wat de ecologische consequenties zouden zijn van een kunstmatige bemesting op grote schaal in de oceanen.
- 2) Rechtstreeks geconcentreerd CO<sub>2</sub> injecteren in de diepe delen van de oceaan. CO<sub>2</sub> zou eerst vanaf de bron van de uitstoot naar een reactiekamer moeten worden gepompt, waarin zeewater en andere stoffen zitten om mee te reageren. In de reactiekamer zou zo een CO<sub>2</sub>-rijke oplossing gevormd worden. Daarna zou het CO<sub>2</sub> naar zee worden getransporteerd en door buizen rechtstreeks naar de diepere lagen van de oceanen worden gebracht. Hoe zou dit soort, kunstmatig met CO<sub>2</sub> verrijkte, over de oceaانبodem verspreid liggende lagen zich gedragen? Door welke fysische, chemische en biologische processen zou de voortgaande verdunning van deze CO<sub>2</sub>-rijke massa's worden beheerst en wat zouden de consequenties zijn?

Dit type oplossingen gaat uit van een zeer mechanistische visie op onze planeet, samenhangend met de overtuiging dat er technologische oplossingen te vinden zijn voor alle problemen, en met het ouderwetse idee dat de zee te beschouwen is als een grote vuilnisbak die alles kan verstouwen, in dit geval ons CO<sub>2</sub>-afval. We hebben geen idee wat de lange-termijn gevolgen zijn van dit type oplossingen, behalve dat toegenomen verzuring zonder enige twijfel gevaarlijk is voor ecosystemen. De onzekerheden zouden ons ervan moeten weerhouden er gebruik van te maken, maar er is een daadwerkelijk risico dat sommige landen het zullen proberen, om zo te kunnen voldoen aan hun verplichtingen die ze met het Kyoto-protocol zijn aangegaan.

Daarom zal CarboOcean ook experimenten leiden op kleinere schaal, om beter de effecten van deze oplossingen te kunnen begrijpen. Men zal dan beter in staat zijn om goed gefundeerd te debatteren met de voorvechters ervan, en om beleidsmakers in staat te stellen goed gefundeerde beslissingen te nemen.





## Onderzoek in actie

### Twee voorbeelden uit de praktijk

#### 1. Pianosa, een wetenschappelijk schateiland



Zonsondergang bij de koolstof fluxtoren op Pianosa.

© Biometeorologisch instituut – National Research Council, Swindon, Verenigd Koninkrijk

**Vanaf een oude verlaten strafinrichting op een onbewoond eiland voor de Toscaanse kust proberen we een beter begrip te krijgen van de koolstofcyclus in de ecosystemen van het mediterrane gebied. Hoe draagt die cyclus bij aan de koolstofcyclus van de aarde als geheel en hoe reageert hij op veranderingen in klimaat en gebruik van de grond? Wat voor CO<sub>2</sub>-uitwisseling vindt er plaats tussen de lucht, de aarde en de begroeiing, al naar gelang het seizoen en de klimaatsomstandigheden en vooral, hoe kan die uitwisseling worden verklaard? Enkele antwoorden op deze hoofdvragen worden duidelijk hier in het „Pianosa laboratorium<sup>9</sup>”, een openluchtlaboratorium voor aardwetenschappen in het Middellandse Zeegebied, één van de meetlocaties van CarboEurope.**

Verscholen tussen Corsica en Elba, vaak in zengende hitte, geurig van borstelige planten, ligt het onbewoonde eiland Pianosa. Dit voormalige gevangeneiland, dat tien vierkante kilometer beslaat, werd verlaten toen de gevangenis in 1992 werd gesloten, maar heeft nog steeds strenge regels en is in wezen verboden gebied voor alle bezoekers. Sinds onze eerste missies in mei 2000, is Pianosa ons eigen schateiland geworden, de plaats van het wetenschappelijke wonder van een micro-ecosysteem dat is afgeschermd van elke menselijke inmenging.

Op Pianosa hopen we een paar ontbrekende stukjes te vinden van de grote puzzel van de wereldwijde koolstofcyclus, namelijk die van de mediterrane struikgewassen. Klimaatwetenschappers werken tegenwoordig intensief op regionaal niveau; computermodellen kunnen tegenwoordig min of meer de klimaatsontwikkeling op wereldschaal weergeven, maar simulaties op een kleinere schaal lukken niet goed, hetgeen de gaten in onze kennis duidelijk zichtbaar maakt.

#### Leve de onverklaarde verschijnselen!

Hoe zoeken we naar waardevol wetenschappelijk materiaal op een eiland? Dit kan in twee woorden samengevat worden: waarnemen en experimenteren.

Waarnemen betekent hier het op een zo uitgebreid mogelijke manier in beeld brengen van de uitwisseling van koolstof op het eiland. Met het oog hierop installeerden we een ‘fluxtoren’, een meetpaal in het midden van het eiland om gegevens van het weer te registreren (luchtdruk, vochtigheid, wind, neerslag, lichtsterkte, etc.) en de CO<sub>2</sub>-flux, d.w.z. de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die het eiland als geheel uitstoot of opneemt in een bepaalde tijd. Er worden voortdurend metingen gedaan, zodat we het hele jaar door gegevens krijgen van de CO<sub>2</sub>-flux op het eiland. Als resultaat daarvan weten we b.v. dat het eiland over het geheel genomen een CO<sub>2</sub>-put is: Het neemt meer koolstof op uit de atmosfeer dan het uitstoot.

Experimenteren helpt ons de betekenis van de metingen van de fluxtoren te begrijpen. Hoewel de toren ons voorziet van uitgebreide gegevens over de CO<sub>2</sub>-uitwisseling door Pianosa, onthult hij niets over *de oorzaken van die uitwisseling*, d.w.z. wat er uitstoot en hoeveel, wanneer en waarom. Het is als een serie vergelijkingen, waarvan we alleen het eindresultaat kennen, maar niet de onderliggende cijfers en formules. Maar ons overkoepelende doel is om deze vergelijkingen in een computerprogramma te kunnen reproduceren. Door extrapolatie gebaseerd op het scenario van Pianosa, zullen we zo het gedrag van mediterrane ecosystemen kunnen simuleren.

Zolang we niet in staat zijn te zeggen *waarom* de CO<sub>2</sub>-flux die de toren meet zich op een bepaalde manier ontwikkelt, zijn we ook niet in staat het in een model te simuleren. En om in staat te zijn te zeggen waarom de flux zich zo ontwikkelt, moeten we de reacties van alle betrokken onderdelen (bomen, bodem, weiden, etc.) koppelen aan seizoensvariaties, weersveranderingen enz. Kortom, we kunnen ons niet beperken tot het vaststellen van de CO<sub>2</sub>-fluxen en hoe die veranderen.

9) Consortium van negen Italiaanse instellingen, gecoördineerd door IBIMET in Florence (Italië).

We moeten ook in staat zijn te beschrijven waardoor ze veroorzaakt worden. Dit is de diepste kern van het onderzoek, het uiteindelijke doel van alle metingen en experimenten die in het veld uitgevoerd worden.

Waarnemen en experimenteren gaan hand in hand. Wat ons het meest prikkelt, is iets waar te nemen dat we niet begrijpen. Dit is wat de grenzen van onze kennis verlegt en daarom geeft het de richting aan waarin onderzoek moet gaan en welke vragen gesteld moeten worden. Een onverklaard verschijnsel is uiteraard geen bovennatuurlijk gebeuren, maar gewoon een verschijnsel waarvan we nog niet weten hoe we het tot stand komt!

## Enorme koolstofuitstoot in het midden van de zomer

In Pianosa deden zich tot ons genoeg enkele eigenaardigheden voor. Een heel vreemde onregelmatigheid dook op in de gegevens die de toren na zomerstormen registreerde. In het algemeen is de  $\text{CO}_2$ -flux positief vóór regen: het eiland laat  $\text{CO}_2$  los in de atmosfeer. Dit is een normaal teken van een tekort aan water: Tijdens de zomerdroogte beschermen planten zichzelf door hun huidmondjes te sluiten. Daardoor wordt de fotosynthese onderbroken en dus de opname van  $\text{CO}_2$ . Anderzijds blijven ze, zolang ze leven, uiteraard wel ademen, dus  $\text{CO}_2$  uitstoten. Wanneer een onweersbui zich ontaardt en direct daarna, geeft de fluxmeting nul aan en men neemt aan dat de planten, nadat ze de beschikking over water hebben gekregen, hun fotosynthese zullen hervatten. De verwachting is zelfs dat ze de eerstvolgende uren een extra grote hoeveelheid  $\text{CO}_2$  zullen opnemen.

Echter, in plaats van meer  $\text{CO}_2$  op te nemen, zoals logisch zou zijn, begint het eiland, 12 uur na de regenval, plotseling uitzonderlijke hoeveelheden uit te stoten: *tien keer* meer dan voor de stortbui! Dan, enkele dagen later, keert de  $\text{CO}_2$ -flux langzaam terug naar een normaal niveau. De eerste keer dat dit gebeurde dachten we dat we een probleem hadden met onze instrumenten. Maar iedere keer herhaalde deze natuurlijke  $\text{CO}_2$ -uitstoot na een zomerbui zich. Dit was een geweldige verrassing, waarvan we het belang wel moesten geloven: We hebben berekend dat deze uitstoot het totale jaargemiddelde van de opname  $\text{CO}_2$  door Pianosa met 10 tot 15% vermindert.



Wist u dat de bodem „ademt“? Met deze bodemkamer meten we hoeveel  $\text{CO}_2$  de grond van Pianosa uitstoot.

© Biometeorologisch instituut – National Research Council, Swindon, Verenigd Koninkrijk

Plotselinge uitstoot van  $\text{CO}_2$  die van de regelmaat van de natuur (voorzover wij die kennen) en dus ook van onze computermodellen afwijkt (of liever hun tekortkomingen aan het licht brengen): Wat zit daar achter? Waarom gebeurde dit steeds 12 uur na regenval en niet zes uur of vier uur? We moeten de schuldige vinden, we moeten ontdekken welke mechanismen een rol spelen. De toren heeft ons op het juiste spoor gezet, nu moeten we met onze onderzoekingen aan de slag gaan en aanknopingspunten zoeken op die plaatsen waar de  $\text{CO}_2$ -uitstoot plaatsvindt: op bladeren, rondom wortels, in de bodem, etc.

Wat voor effect heeft water op de uitademing van de bodem? Wat is de bijdrage van begroeiing aan de gemeten  $\text{CO}_2$ -stromen en wat voor planten wasenden de extra  $\text{CO}_2$  uit in de lucht? Wat gebeurt er met koolstof in de bodem? Veel van dit soort vragen zullen onze verschillende teams nog vele jaren met schatgraven bezig houden.

Om meer te weten te komen over Pianosa:

- Presentatie van Pianoslab op [http://www.ibimet.cnr.it/biospere/File\\_progretti/01\\_pianosa\\_lab.htm](http://www.ibimet.cnr.it/biospere/File_progretti/01_pianosa_lab.htm)



## 2. 'Mesokosmosen': experimentele mini-zeewerelden om de toekomst te simuleren

**Tussen microkosmosen en macrokosmosen liggen mesokosmosen! Het is natuurlijk onmogelijk om vergelijkend onderzoek te doen op macroscopische schaal: Dat zou een tweede aarde zou vergen om meedogenloos het klimaat te kunnen manipuleren. Laboratoriumexperimenten vinden vaak plaats op een microscopische schaal, waardoor uitvergroten tot wereldschaal niet goed haalbaar is. Daarom zijn we de reactie van oceanen gaan onderzoeken op de schaal van mesokosmosen, wat letterlijk betekent: 'middenwerelden'.**

Vanaf het Espegrend Marien Biologisch Station, bij Bergen in Noorwegen, werken we in het midden van een fjord op een heel speciaal vlot. Op het vlot staat een houten hut met daarin een minilaboratorium waarmee negen grote plastic tenten, vol buizen en sensoren, zijn verbonden en rondom ondergedompeld. Net als bij ijsbergen is het deel onder water het grootst: zorgvuldig in plastic verpakt dat alleen licht doorlaat, strekt zich een waterkolom uit van 10 m hoog onder deze tenten, goed gescheiden van de rest van de fjord, maar toch deel uitmakend van de onderzoeksomgeving. Deze opstelling bevat onze mesokosmosen, op een schaal die makkelijk door mensen gemanipuleerd kan worden en toch enorm groot als je let op de miljoenen kleine organismen die er in leven: Het plankton dat we willen bestuderen.

Delucht wordt in de eerste drie mesokosmosen kunstmatig op 370 ppm kooldioxide gehouden (dat is de gangbare concentratie in de omgeving op dit moment), 750 ppm in drie andere (dat is de concentratie die tegen het jaar 2100 verwacht wordt wanneer de uitstoot blijft doorgaan op het huidige niveau) en 1150 ppm in de laatste drie (verwachte concentratie rond 2150). Op deze manier zijn we beter in staat te observeren wat waarschijnlijk in de zee gaat gebeuren tegen het jaar 2100 en 2150.

### CO<sub>2</sub>-opname door de oceaan: Een vloek voor het leven in zee?

Het principe van het experiment is eenvoudig. Op de eerste dag brengen we een mengsel van voedingsstoffen in elke mesokosmos in, om een snelle toename van plantaardig plankton te forceren en dan bestuderen we de effecten op het grootst mogelijke aantal parameters gedurende vijf weken. Dan vergelijken we de drie typen mesokosmos.

De resultaten van de onze mesokosmosexperimenten bevestigen wat we gezien hebben in onze eerdere laboratoriumexperimenten: Wat een zegen is voor ons klimaatstelsel, dat wil zeggen het opnemen van grote hoeveelheden door de mens gemaakt CO<sub>2</sub> door de oceaan, kan een vloek zijn voor het leven in zee.

Calciumcarbonaat („kalk“) is het voornaamste materiaal dat gebruikt wordt door zeeorganismen om hun skeletstructuur op te bouwen. Koraal, slakken, mosselen, zee-egels en zeesterren zijn bekende kalkvormende organismen in zee. Maar als de zuurgraad van het zeewater hoger wordt door de toename van CO<sub>2</sub>, vermindert de concentratie van de carbonaationen in het zeewater, waardoor het voor kalkmakende organismen extra veel energie kost om hun kalkstructuren te maken.



*Het mesokosmosen vlot.*

© Leibniz Instituut voor mariene wetenschappen IFM-GEOMAR in Kiel, Duitsland.

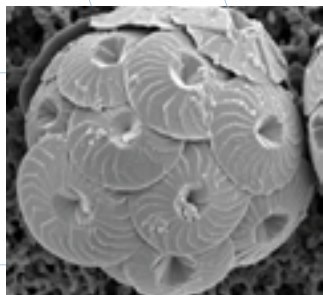


## Twee keer zo weinig kalkvorming in mesokosmossen met kunstmatig verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie

In onze mesokosmossen kweken we geen mossels of zee-egels maar een planktonsoort die 'coccolithophorus' heet, een ééncellige microalg bedekt met een dichte laag kalkplaatjes (coccolithen). Hoewel onzichtbaar voor het blote oog vanwege hun minuscule afmetingen (honderd keer kleiner dan de kop van een naald) zijn ze toch het meest productieve kalkvormende organisme op aarde.

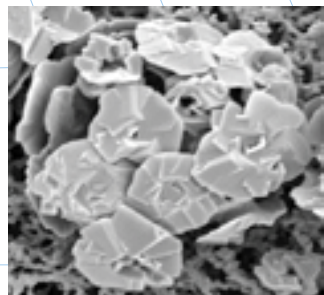
In onze mesokosmossen *halveerde* de kalkvorming door coccolithophoren bij een hoog CO<sub>2</sub>-gehalte bijna, vergeleken met die op een huidig CO<sub>2</sub>-niveau. Laboratoriumexperimenten laten een toename zien van misvormde coccolithen en onvolledige celbedekking bij coccolithophoren die gekweekt werden onder hoge CO<sub>2</sub>-omstandigheden.

Deze twee foto's laten heel duidelijk de mate van verstoring zien:



Met de huidige CO<sub>2</sub>-concentratie.

© Markus Geisen, Alfred Wegener Instituut voor Polair en Marien Onderzoek, Bremerhaven, Duitsland



Met de CO<sub>2</sub>-concentratie verwacht in 2100.

© Markus Geisen, Alfred Wegener Instituut voor Polair en Marien Onderzoek, Bremerhaven, Duitsland

Deze resultaten maken ons ongerust over de mogelijke negatieve effecten op het verzuren van de zee, maar ze laten ons achter met meer vragen dan antwoorden. Wat betekent verminderde kalkvorming en toegenomen misvorming voor de geschiktheid van de coccolithophoren voor hun leefomgeving? Indien ze niet in staat zijn om te gaan met de verzuring van het zeewater, zal hun plaats dan ingenomen worden door andere, niet-kalkvormende groepen? Wat zal dit betekenen voor het ecosysteem?

## Ecosystemen zullen waarschijnlijk kwetsbaarder worden.

Andere kwesties houden verband met de geldigheid van onze bevindingen. Terwijl er binnen het zeeplankton een immense genetische diversiteit is, zelfs binnen een enkele soort, komen we, om statistische redenen, in onze experimenten uiteindelijk uit op die genetische geslachten die het meest voorkomen in de oceaan. Zijn er echter ook geslachten in de oceaan aanwezig, alleen nu nog minder veelvuldig, die wel beter in staat zijn om te gaan met hoge CO<sub>2</sub>-condities? We moeten ook bedenken dat we in onze experimenten, om praktische redenen, relatief abrupt de concentratie CO<sub>2</sub> verhogen. In werkelijkheid zal het 100 jaar duren voor de hoge CO<sub>2</sub>-niveaus van onze experimenten bereikt zijn. Voor langzaam groeiende organismen, zoals koraal, mag dit misschien niet veel verschil maken, maar coccolithophoren die een levenscyclus hebben van een dag of twee, kunnen tot 30.000 generaties opleveren in 100 jaar. Is dit voldoende tijd om zich aan te passen aan een zuurdere oceaan? Het is te vroeg om de consequenties te voorspellen van de verzuring van de zee. Wel kunnen we veilig stellen dat ecosystemen in zee waarschijnlijk minder krachtig zullen worden en daarom kwetsbaarder voor andere milieu-invloeden zoals klimaatverandering, visserij en vervuiling.

Het terugbrengen van de uitstoot van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer lijkt de enige praktische manier om het risico van onomkeerbare beschadigingen aan het ecosysteem van de zee te verkleinen. Het is duidelijk dat de verzuring van de zee, naast klimaatverandering, een krachtig argument is om snel te gaan werken aan het ontwikkelen van alternatieve energiebronnen.

Als u geïnteresseerd bent in het 'mesokosmossen experiment':

- PDF beschrijving:  
<http://www.carboocean.org/Menue/News/Meso-cosm.pdf>
- Website van het experiment:  
<http://spectrum.ifm.uni-kiel.de/peece/>
- Weblog van de groep uit Mainz:  
[http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Diaries\\_from\\_the\\_field/CarboOcean\\_4ps.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Diaries_from_the_field/CarboOcean_4ps.html)

Oprechte dank aan Maria-Francesca Cotrufo en Ulf Riebesell voor hun ontvangst in respectievelijk Pianosa en Espeland.





## Personal Notes

---



# Personal Notes

---



## CarboSchools Educatieve brochure

*Engelse versie September 2006*

*Vrij citeren en reproduceren toegestaan voor de educatieve en niet-commerciële doelen*

*DG GOC- coördinatie: Günther Seufert*

*Tekst, coördinatie: Philippe Saugier (saugier@netcourrier.com)*

*Tekstuele Bijdragen en logo-ontwerp: Rona Thompson*

*Ontwerp-aanpassingen: Yvonne Hofmann*

*Tekst-review-proces:*

*Aline Chipaux, Annette Freibauer, Marion Gehlen, Nadine Gobron, Giacomo Grassi, Kjeld Hansen, Christoph Heinze, Alexander Knohl, Thierry Lerévérénd, Mats Olsson, Ulf Riebesell, Michael Schallies, Bernard Saugier, Ingunn Skjelvan, Rona Thompson, Elmar Uherek, Andrea Volbers*

*Nederlandse vertaling, januari 2007, door leden van de School-CO<sub>2</sub>-net groep rond de Rijksuniversiteit Groningen (www.rug.nl/fwn/school-co2-net):*

*Sjoerd Falkena, Corrie Mein, Daan Bosma, Roel Timmermans, Alex van den Berg, Harro Meijer*

*Deze publicatie is gefinancierd door de Europese Commissie Directoraat-Generaal Gezamenlijk Onderzoek Centrum (GOC), en de CarboEurope en CarboOcean projecten. Het doel van het GOC (JRC, joint research Centre in het Engels) is om te zorgen voor wetenschappelijke en technische ondersteuning vanuit de consument voor het ontstaan, de ontwikkeling, toepassing en begeleiding van EU-beleid. Het GOC, als dienst van de Europese Commissie, functioneert als een te raadplegen centrum van wetenschap en technologie voor de Unie. Dichtbij het proces van beleid maken, ondersteunt dit centrum het algemeen belang van de lidstaten, onafhankelijk van nationale of particuliere belangen. Het GOC beheert meerdere grote onderzoeksfaciliteiten, verspreid over Europa.*

### **Meer informatie op:**

[www.carboschools.org](http://www.carboschools.org)

[www.carboeurope.org](http://www.carboeurope.org)

[www.carboocean.org](http://www.carboocean.org)

<http://ies.jrc.cec.eu.int/fp6ccu.html>



*Aan boord van zeilschip Carola bereiden studenten van het Stedelijk Gymnasium in Bad Segeberg (D) zich voor op hun reis om monsters te gaan nemen van de zee-flora- en fauna in de Baltische Zee, als onderdeel van het NaT-Werk project van het Leibniz Instituut voor mariene wetenschappen IFM-GEOMAR in Kiel, Duitsland.*

© Avan Antia, Leibniz Instituut voor mariene wetenschappen (IFM-GEOMAR), Kiel, Duitsland



Wij, honderden wetenschappers binnen CarboEurope en CarboOcean (twee EU-onderzoeksprojecten over klimaatveranderingen die lopen van 2004 tot en met 2009), zijn betrokken bij de grote onderzoekstocht naar het systeem Aarde en hoe dat systeem wordt ontwricht door het loslaten van gigantische hoeveelheden broeikasgassen in de atmosfeer.

CarboSchools is een initiatief om partnerprojecten op gang te brengen tussen wetenschappers en leraren van middelbare scholen,

om zo jonge mensen te betrekken bij, en bewust te maken van plaatselijke en wereldwijde gevolgen van klimaatverandering. Hierdoor worden ze aangemoedigd om plaatselijk actie te ondernemen om de uitstoot van broeikasgassen omlaag te brengen. Verder willen we hen wetenschappelijk onderzoek laten ontdekken.

Dit boekje, dat is bedoeld als naslagwerk zowel voor leraren als voor iedereen die in het onderwerp is geïnteresseerd, probeert een overzicht te geven van onderzoek naar wereldwijde milieuveranderingen („Global Change“). Wat zijn de belangrijke vragen? Hoe verwerven we nieuwe kennis door wetenschappelijk onderzoek? Wat is de huidige bijdrage van Europees onderzoek naar de dringende kwestie van de koolstofcyclus?

Doe mee met een groot wetenschappelijk avontuur, deel onze fascinatie voor de planeet en denk na over oplossingen voor de toekomst!