



Was wir wissen,
Was wir nicht wissen und
Wie wir vorgehen,
um den **globalen Wandel** besser zu verstehen

Eine Einführung zu den Fragen,
Herausforderungen und Methoden
der Forschung für CarboSchools-Projekte





Was wir wissen, Was wir nicht wissen und Wie wir vorgehen, um den globalen Wandel besser zu verstehen

Eine Einführung zu den Fragen, Herausforderungen und Methoden der
Forschung für CarboSchools-Projekte



www.carboschools.org



EUROPÄISCHE KOMMISSION
GENERALDIREKTION
Gemeinsame Forschungsstelle



Diese Broschüre wird gefördert durch das Sechste EU-Rahmenprogramm im Bereich
Forschung und technologische Entwicklung

CarboEurope-IP (Vertrag Nr. GOCE-CT-2003-505572) und CarboOcean-IP (Vertrag Nr. 511176-2)
Generaldirektion Gemeinsame Forschungsstelle

CarboSchools: Partnerschaften zwischen Lehrern und Wissenschaftlern zum globalen Wandel

CarboEurope und CarboOcean sind zwei große Forschungsprojekte, die den Einfluss des Menschen auf den Zustand und die Zukunft unseres gemeinsamen Lebensraumes, der Erde, untersuchen. Vor diesem Hintergrund haben wir als Forscher nicht nur eine vertragliche, sondern auch eine moralische Verpflichtung, die Ergebnisse dieser Forschung in die öffentliche Diskussion über den globalen Wandel einzubringen.

Als Bürger und Entscheidungsträger von morgen sind junge Menschen in besonderem Maße von Umweltveränderungen betroffen und über diese besorgt. Sie sollten deshalb über ein grundlegendes Verständnis für die beteiligten Prozesse sowie den aktuellen Stand der Forschung verfügen, um gut informiert Entscheidungen über künftiges Handeln treffen zu können.

Um dies zu erreichen, haben sich CarboEurope und CarboOcean mit der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (Joint Research Centre - JRC) zusammengeschlossen. Gemeinsam soll die Initiative CarboSchools gefördert werden, die die Einrichtung von Partnerschaften zwischen Wissenschaftlern, Lehrern von weiterführenden Schulen und deren Schülern unterstützt. In gemeinsamen Projekten möchten diese Partnerschaften Folgendes fördern:

- wissenschaftliches Lernen anhand von praktischer Erfahrung und aktueller Forschung,
- innovative und interdisziplinäre Ansätze,
- die Diskussion über den Themenkomplex des globalen Wandels ausgehend vom Wissen aus erster Hand,
- die Suche nach Lösungen sowohl aus individueller Sicht als auch im europäischen Kontext.

Als ersten Schritt zur Gründung dauerhafter Partnerschaften zwischen Schulen und Forschung werden CarboEurope und CarboOcean

- sich an der Gründung von Pilotprojekten beteiligen,
- die Beteiligung von Wissenschaftlern in Schulprojekten explizit als wertvollen Teil ihrer Arbeit anerkennen,
- Doktoranden ermutigen, als wesentlichen Teil ihrer Ausbildung zu zukünftigen Wissenschaftlern an gemeinsamen Projekten mit Schulen teilzunehmen,
- über die Webseite www.carboschools.org zur Entwicklung und Bereitstellung von Materialien für Schulprojekte beitragen.



Ernst-Detlef Schulze

*CarboEurope
Koordinator*



Annette Freibauer

*CarboEurope
Wissenschaftliche
Mitarbeiterin*



Christoph Heinze

*CarboOcean
Koordinator*



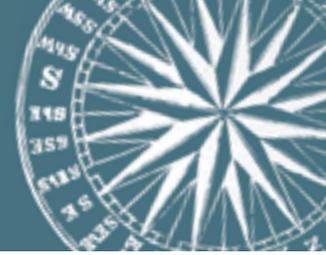
Andrea Volbers

*CarboOcean
Wissenschaftliche
Mitarbeiterin*



Guido Schmuck

*Direktor, JRC - Institut
für Umwelt und
Nachhaltigkeit*



Was werden Sie in dieser Broschüre finden?



In vielen hochwertigen Informationsmaterialien kann man nachlesen, *was wir* über den Klimawandel *wissen*. In dieser Broschüre erfahren Sie, *was wir nicht wissen* und *wie Forscher* generell bzw. innerhalb zweier großer europäischer Programme *vorgehen, um den globalen Wandel besser zu verstehen*.

Daher kann hier jeder, der sich für Klimaforschung interessiert, nützliche Informationen finden. Vor allem aber soll dieses Heft Lehrern an weiterführenden Schulen bei der Planung *interdisziplinärer Projekte* zu diesem Thema helfen. Deshalb geht es nicht mehr nur darum, reine Information und Wissen zu vermitteln, sondern darum, *junge Menschen zum Fragen zu ermuntern, ihren Wunsch zu verstärken, Zusammenhänge zu verstehen sowie den Willen eine Zukunft zu gestalten*, die es ermöglicht, die Herausforderungen des globalen Wandels anzugehen.

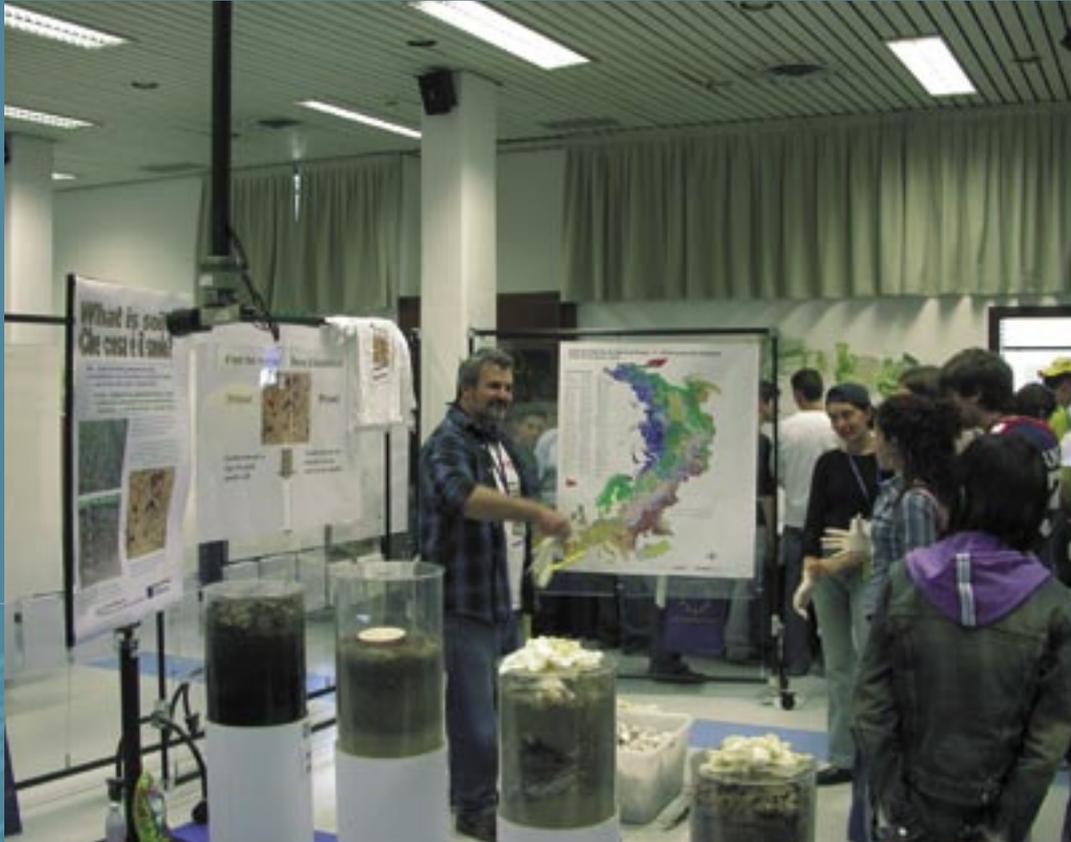
Deswegen konzentrieren wir uns hier auf die Herangehensweise, *wie neues Wissen durch wissenschaftliche Forschung erlangt wird*, und weniger auf das Wissen an sich. Der große Vorteil von projekt-basiertem Unterricht ist die Zusammenführung von Wissen aus verschiedenen Fachgebieten, das sonst isoliert vermittelt wird. Für die Schüler erschließen sich so Zusammenhänge, die es erleichtern, komplexe Fragestellungen wie die des globalen Wandels zu verstehen.

Unsere Denkweise und die Art, wie wir Entscheidungen treffen, werden durch den globalen Wandel in starkem Maße herausgefordert. Wir müssen lernen, die Komplexität, Globalität und wechselseitige Abhängigkeit der jeweiligen Systeme zu bedenken und damit umzugehen. Ein weiteres Ziel dieser Broschüre ist deshalb die Veranschaulichung

- des *interdisziplinären Charakters der Forschung* (im Gegensatz zu der traditionellen Aufteilung der Wissenschaft in einzelne Spezialgebiete);
- der *Notwendigkeit, einen Gesamtüberblick anzustreben* (im Gegensatz zur Tendenz, sich mit Details und einer stückweisen Herangehensweise zufrieden zu geben);
- der *vielen Unsicherheiten* (im Gegensatz zu der Meinung, Wissenschaft sei mit Wahrheit gleichzusetzen);
- der *oft ungeplanten Art und Weise, wie neue Erkenntnisse erlangt werden* - ein Prozess, der häufig nicht linear, sondern kreativ und spontan verläuft;
- der *engen Verbindung* zwischen globalen Themen, kollektiven Entscheidungen und den täglichen Entscheidungen jedes Einzelnen.

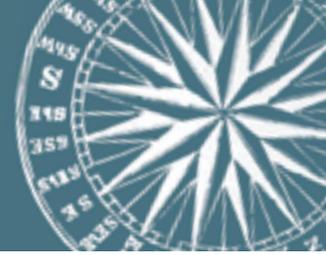
Viel Erfolg bei Ihren Projekten!

Philippe Saugier
Koordinator von CarboSchools



Der Bodenökologe Arwyn Jones erläutert die Forschungstätigkeiten der Gemeinsamen Forschungsstelle der EU (Joint Research Centre) zum Klimawandel während des Tags der offenen Tür im Mai 2004. 1400 junge Menschen aus weiterführenden Schulen im Umkreis von Ispra waren der Einladung zu dieser Veranstaltung gefolgt.

© Gemeinsame Forschungsstelle, Institut für Umwelt und Nachhaltigkeit, Ispra, Italien



Inhalt

Was wir wissen und was wir nicht wissen

9

Ein 17-seitiger Überblick über die Forschung zum globalen Wandel:
Die wichtigsten Fragen und wesentliche Wege, Antworten zu finden

1. *Ist es möglich, die Zukunft vorherzusagen?*
2. *Die Hauptfragen bezüglich natürlicher Prozesse*
3. *Die dringliche Frage der „natürlichen Senken“ für Kohlenstoff*
4. *Wie gehen wir mit diesen Fragen um?*
5. *Was tun wir, um das Problem zu lösen?*

CarboEurope

26

Von 2004 bis 2008 versuchen einige hundert Wissenschaftler aus 17 europäischen Ländern, die Kohlenstoff-Bilanz unseres Kontinents aufzustellen: Ein 5-seitiger Überblick über dieses wichtige internationale wissenschaftliche Programm zum Thema Kohlenstoffkreislauf.

1. *Was sind unsere Ziele?*
2. *Worauf stützen wir uns?*
3. *Wie gehen wir vor?*

CarboOcean

31

Das Äquivalent zu CarboEurope für den marinen Kohlenstoffkreislauf. Von 2005 bis 2009 reist eine kleine Flotte ozeanographischer Forschungsschiffe und Frachter mit Messinstrumenten, Bojen, Tauchausrüstung usw. an Bord durch die Weltmeere, um mit beispiellosem Aufwand den marinen Kohlenstoffkreislauf zu beobachten und zu untersuchen.

1. *Was sind unsere Ziele?*
2. *Worauf stützen wir uns?*
3. *Wie gehen wir vor?*

Forschung in Aktion: zwei Feldbeispiele

37

Versuche auf einer Mittelmeerinsel und in einem norwegischen Fjord

1. *Pianosa, eine wissenschaftliche Schatzinsel*
2. *Mesokosmen: Experimentelle Mini-Meere zur Simulation der Zukunft*

Informationen im Internet

Wo man finden kann, was nicht in diesem Heft steht

Allgemeine Informationen über den Treibhauseffekt und Klimawandel:

Eine Einführung in das Problem liefert eine umfangreiche Auswahl an Dokumenten in vielen verschiedenen Sprachen, von denen die meisten im Internet verfügbar sind. Einige sind objektiv; andere sind mehr oder weniger subjektiv. Die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change) bietet eine Reihe sehr guter einführender Veröffentlichungen für eine neutrale und umfassende Annäherung an das Thema an: <http://www.unfccc.int>: Klicken Sie auf „essential background“ und dann auf „background publications“ oder verwenden Sie den direkten Link:

http://unfccc.int/essential_background/background_publications_htmlpdf/items/2625.php

(Lohnenswert ist vor allem der „climate change information kit“, der in Deutsch, Englisch, Französisch, Spanisch und Russisch vorliegt.)

Außerdem empfehlen wir die mehrsprachige Umwelt-Webseite der EU für junge Menschen, auf der eine Einführung in Klimafragen (und viele andere Themen) zu finden ist: http://europa.eu.int/comm/environment/youth/index_de.html und die Seite von Manicore, die aus pädagogischer Sicht sehr gut ist, da sie nach Fragen gegliedert und zudem leicht verständlich geschrieben ist (in Englisch und Französisch): http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/greenhouse/index.html

Wissenschaftliche Daten über das Problem:

Die Berichte des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sind die weltweiten Referenzquellen zu diesem Thema.

Wir raten, mit der Zusammenfassung des letzten Berichts (2002) einzusteigen, der von der GreenFacts International Foundation veröffentlicht wird:

<http://www.greenfacts.org/de/klima-wandel/index.htm> (in Französisch, Englisch, Spanisch und Deutsch).

Eine Zusammenfassung des aktuellsten Berichts (2007) ist derzeit nur in Englisch verfügbar.

Weitere Informationen erhalten Sie, wenn Sie die Zusammenfassung „summary for policy-makers“ sowie die Zusammenfassungen der drei Arbeitsgruppen des Berichts von 2001 herunterladen. Diese Zusammenfassungen wenden sich an Leser ohne wissenschaftlichen Hintergrund, aber weil das Problem des globalen Wandels so komplex ist und eine riesige Menge Information vorgestellt wird, sollte man als Leser schon etwas mit dem Thema vertraut sein.

Wissenschaftliche Nachrichten:

Sammlung von Artikeln aus der Fachpresse: <http://www.ghgonline.org> (in Englisch)

Hier werden alle neuen Erkenntnisse in einer für jedermann verständlichen Sprache präsentiert.

Glossar:

Verschiedene Glossare zum Thema Klimawandel werden Sie sehr einfach mit Hilfe jeder beliebigen Suchmaschine im Internet finden. Wir empfehlen die der GreenFacts Foundation:

<http://www.greenfacts.org/de/klima-wandel/toolboxes/glossary.htm> (in Deutsch, auch in Französisch, Englisch und Spanisch abrufbar)

Fachwissen und Begriffserklärungen:

Klimaencyklopädie ESPERE: <http://www.espere.net> (in Deutsch, Französisch, Englisch, Spanisch, Polnisch, Ungarisch, Norwegisch, z. T. Portugiesisch)

Was jeder täglich tun kann: einige Beispiele:

<http://www.climnet.org/publicawareness/einfuehrung.htm> (in Deutsch, Spanisch, Französisch und Englisch)

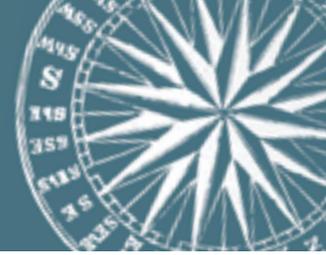
Andere nützliche Adressen (nur in Englisch):

Über Forschung: <http://www.exploratorium.edu/climate/>

Über die Auswirkungen des Problems: Weltkarte mit beobachteten Erscheinungen des globalen Klimawandels <http://www.climatehotmap.org/>

Zur Berechnung Ihrer CO₂-Emissionen, der Ihrer Familie, Schule usw.:

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



Was wir wissen und was wir nicht wissen

Wichtige Fragestellungen und Forschung zum globalen Wandel

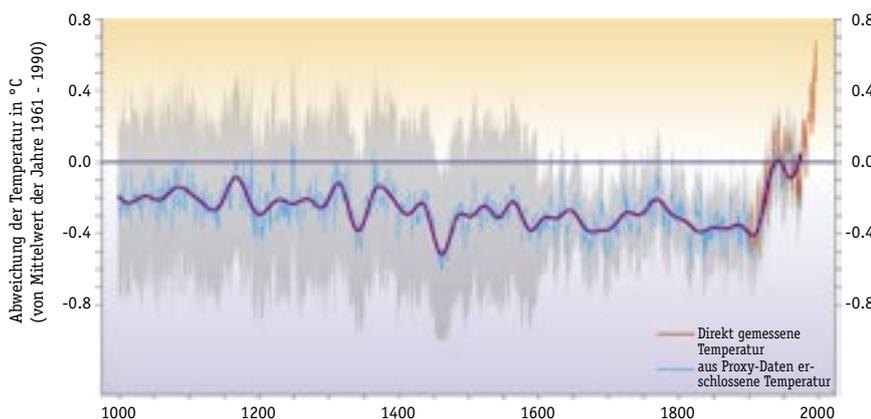
“Unser Wissen über den Aufbau und die Funktionsweise terrestrischer Ökosysteme ist noch nicht weit genug entwickelt, um die Folgen der Klimaveränderungen auf die Systeme selbst oder auf atmosphärische Wechselwirkungen zu verstehen, geschweige denn vorherzusagen zu können”

(Internationales Programm Geosphäre-Biosphäre, 1991)



Nahaufnahme des Gletschers Briksdal im Nationalpark Jostedalbreen in Norwegen

© Atle Nesje, Abteilung Geowissenschaften, Universität Bergen und Bjerknes Zentrum für Klimaforschung, Norwegen



Schwankung der Temperatur der Erdoberfläche in den letzten 1000 Jahren

© Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung

- 1) Treibhausgase spielen auf der Erde eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung von Temperaturen, bei denen Leben möglich ist. Ohne sie würde die durchschnittliche Temperatur unseres Planeten -18°C statt momentan $+15^{\circ}\text{C}$ betragen. Allerdings bedeutet dies auch, dass mehr Treibhausgase in der Atmosphäre zu einer höheren Durchschnittstemperatur auf der Erde führen.
- 2) ppm = parts per million (Teilchen je Million): Einheit, um kleine Mengen als Volumen- oder Massenanteil zu messen (hier: der Anteil an CO_2 am Volumen in der Atmosphäre). 370 ppm (oder 0,037%) bedeutet, dass in 1 Million cm^3 Luft 370 cm^3 reines CO_2 vorhanden sind.

1. Kann man die Zukunft vorhersagen?

Vieles ist schon bekannt...

Heute sind wir sicher, dass globale Klimaveränderungen bereits stattfinden. Diese Veränderungen sind vor allem gekennzeichnet durch:

- eine gegenüber dem Beginn des 20. Jahrhunderts *beobachtete* durchschnittliche Erhöhung der Temperatur um $0,6^{\circ}\text{C}$, wobei der Zeitraum 1990-1999 das bislang wärmste Jahrzehnt war;
- einen *beobachteten* durchschnittlichen Anstieg der Konzentration einiger Treibhausgase¹ in der Atmosphäre, vor allem von Kohlendioxid, dessen Konzentration zwischen 1750 und 2000 von 280 auf 370 ppm² anstieg;
- das - mit geologischen Zeitspannen und Dimensionen verglichen - extreme *Ausmaß der beobachteten Veränderungen*, die mit einer während der letzten 10.000 Jahre nie dokumentierten Geschwindigkeit vorstatten gehen.

Zudem deutet alles auf die Annahme hin, dass diese derzeitige Veränderung des Klimas kein natürlicher Prozess ist, wie z.B. die Eiszeiten, sondern durch den Einfluss des Menschen bedingt ist. Die Zunahme von Kohlendioxid in der Atmosphäre geht auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe (z.B. Erdöl und Kohle) seit Beginn der Industrialisierung zurück sowie auf großflächige Änderungen in der Landnutzung (vor allem die Rodung des tropischen Regenwaldes).

Andere Treibhausgase, wie Methan und Lachgas, haben durch den Einfluss des Menschen im Lauf der vergangenen 200 Jahre ebenfalls unbestreitbar zugenommen.

Wir wissen auch, dass diese Veränderungen nicht aufhören werden, selbst wenn wir heute alle Emissionen abstellen könnten. Wegen der Lebensdauer dieser Gase in der Atmosphäre und der Trägheit des Systems werden sie über die nächsten Jahrhunderte sogar zunehmen.

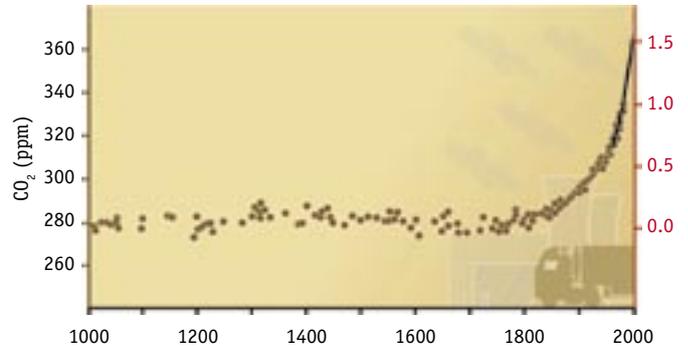
...aber noch so vieles ist bislang unbekannt!

Weltweit stellt sich eine äußerst wichtige Frage: Wie wird sich die Situation weiterentwickeln?

Diese einfache Frage stellt eine enorme Herausforderung für die Wissenschaft dar. Unser jetziges Wissen reicht eindeutig nicht aus, um die Entwicklung und die Folgen des Klimawandels mit Genauigkeit vorherzusagen. Wir sind jedoch sicher, dass die Durchschnittstemperatur im Laufe des 21. Jahrhunderts weiter ansteigen wird; aber es ist unmöglich, mit Sicherheit zu sagen, ob dieser Anstieg 1°C oder 6°C³ betragen wird... und das macht einen gewaltigen Unterschied!

Was die Folgen der globalen Erwärmung betrifft, sieht es nicht viel besser aus. Wir wissen, dass die globale Erwärmung zu einem Anstieg des Meeresspiegels und einer Zunahme der Niederschläge (Regen und Schnee) führen wird, aber auch hier können wir nicht mit Sicherheit sagen, wie viel mehr das sein wird. Außerdem wissen wir bislang nicht mit Sicherheit, ob die globale Klimaerwärmung zu einer Zunahme von extremen Wetterereignissen (z.B. Unwettern und Wirbelstürmen) führen wird.

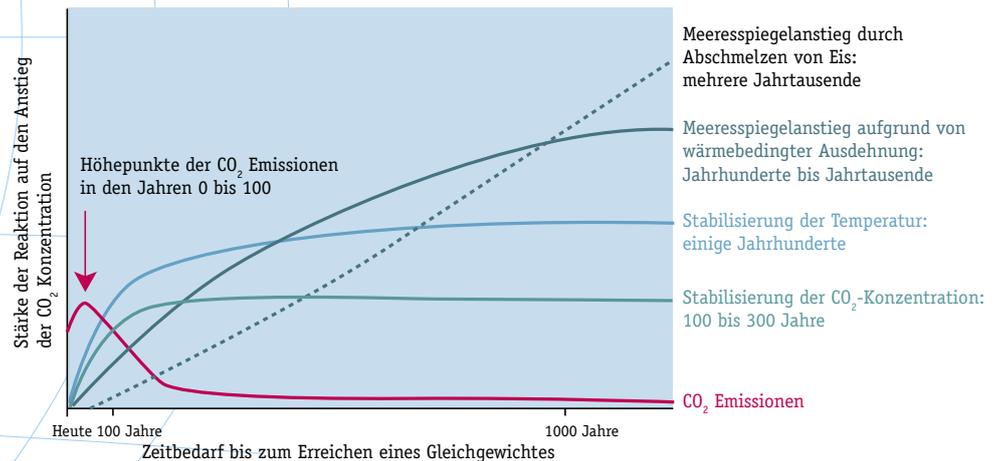
Wir befassen uns außerdem mit dem Risiko unerwarteter Reaktionen des Klimasystems der Erde im Fall der Überschreitung bestimmter Grenzen. Das ist wie bei einem Gummiband: Solange man es nicht überdehnt, hält das Band stand und kann in seinen Ausgangszustand zurückkehren; wenn man aber zu stark zieht, zerreißt es für immer. So befürchten beispielsweise einige Forscher, dass durch die globale Klimaerwärmung der Nordatlantische Strom (bekannt als der Golfstrom) abgeschwächt oder sogar ganz zum Erliegen gebracht werden könnte, was eine allgemeine Abkühlung in Europa zur Folge hätte. Dieses Szenario hat den Regisseur des Films „The Day after Tomorrow“ inspiriert, der, obwohl er etwas übertrieben ist, auf einer real möglichen Folge des Klimawandels basiert. Selbst wenn wir davon ausgehen, dass es solche Grenzen gibt, wissen wir nicht genau, wo diese liegen.



Schwankung der atmosphärischen CO₂-Konzentration in den letzten 1000 Jahren

© Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung

Die Tatsache, dass der Klimawandel nicht überall auf der Erdoberfläche in gleicher Weise erfolgt, macht die Sache noch komplizierter. Zum Beispiel wird in den Alpen derzeit eine durchschnittliche Erwärmung um 1°C (an manchen Stellen sogar 2°C) gemessen, wohingegen der Durchschnitt für die gesamte Erde derzeit bei 0,6°C liegt. Abgesehen vom allgemeinen Trend möchten wir zudem alle wissen, was genau dort, wo wir leben, passieren wird. Momentan sind wir nicht in der Lage, genaue Antworten zu geben. Wir können höchstens Tendenzen erkennen - diese Vorhersagen können jedoch sehr unterschiedlich ausfallen, je nachdem welche Annahmen man trifft.



CO₂-Konzentration, Temperatur und Meeresspiegel steigen noch lange nach der Reduzierung der CO₂-Emissionen an

© Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung

3) Nach unserem Wissensstand im Jahr 2005 ist eine Zunahme um weniger als 1,5°C sehr unwahrscheinlich, wenn nicht sogar unmöglich. Ein wichtiges Ziel internationaler Verhandlungen ist es, unterhalb einer Zunahme um 2°C bezüglich der Durchschnittstemperatur vor der Industrialisierung zu bleiben.



Die Versauerung der Ozeane: der unsichtbare Teil des Eisberges?

Das gesamte System Erde wird durch den Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre gestört, wobei die Erwärmung nur eine der Folgen ist. Fast die Hälfte des CO_2 s, das wir in die Atmosphäre emittieren, landet am Ende in den Ozeanen und in der Vegetation, und dank dieser Tatsache ist die Erwärmung sehr viel weniger stark, als wenn sich alle unsere Emissionen in der Luft anreichern würden. Man spricht in diesem Zusammenhang oft davon, dass die Natur uns hilft, indem sie die schädlichen Folgen unserer Eingriffe abpuffert; doch dies bleibt für das Meerwasser nicht ohne Folgen: je mehr CO_2 von den Ozeanen aufgenommen wird, desto saurer wird es.

Oberhalb eines bestimmten Säuregehaltes sind Organismen, die Kalziumkarbonat enthalten (z.B. Korallen, Weichtiere, Krebse und Phytoplankton), gefährdet. Die Versauerung der Ozeane bedroht deshalb das Überleben sehr vieler mariner Arten und letztlich die gesamte Nahrungskette.

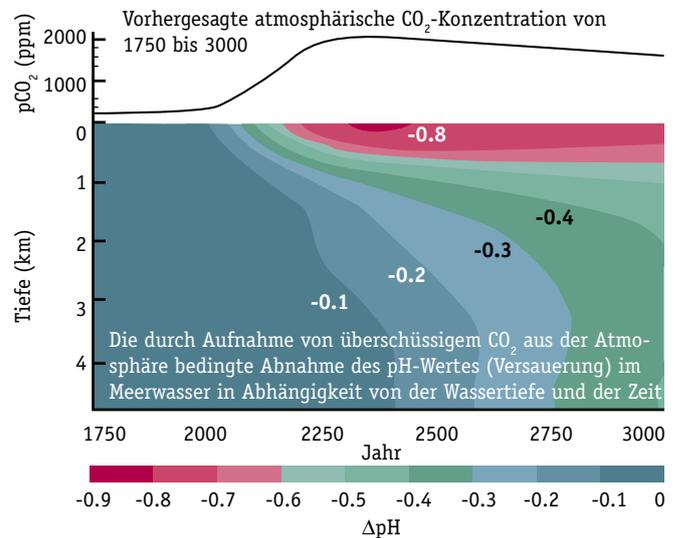


Lophelia pertusa, die wichtigste Kaltwasser-Korallenart der Tiefenriffe, ist durch die Versauerung der Ozeane bedroht

© Französisches Forschungsinstitut zur Nutzung der Meere (Ifremer)

Wir wissen, dass:

- bis zum heutigen Tag die CO_2 -Emissionen durch den Menschen bereits zu einer Abnahme des pH-Wertes im Oberflächenwasser um durchschnittlich 0,12 Einheiten geführt haben.
- der pH-Wert im Jahr 2100 unweigerlich um etwa 0,5 Einheiten unter dem Stand vor der Industrialisierung sinken wird, falls die CO_2 -Emissionen weiter mit der momentanen Geschwindigkeit zunehmen und dadurch ein Säuregehalt erreicht wird, wie es ihn seit vielen Millionen Jahren nicht gegeben hat und das mit einer 100 mal höheren Geschwindigkeit als je zuvor beobachtet wurde.



- zehntausende von Jahren nötig sein werden, bis die Meereschemie wieder den vorindustriellen Zustand erreicht (vorausgesetzt die atmosphärische Konzentration nimmt ebenfalls ab). Die Versauerung der Meere ist über den Zeitraum mehrerer Generationen irreversibel. Hinsichtlich der Geschwindigkeit der Versauerung müssen wir ernsthaft befürchten, dass zahlreiche Arten nicht ausreichend Zeit zur Anpassung haben werden, vor allem jene mit besonders langsamen Wachstumsraten, wie beispielsweise riffbildende Korallen. Daraus ergeben sich bedenkliche Konsequenzen für deren Umwelt. Im Gegensatz zur globalen Erwärmung, deren Ausmaß (d.h. +1 bis +6°C bis zum Jahr 2100) und Folgen weitgehend ungewiss sind, ist das Ausmaß der Versauerung bekannt, nur ihre Auswirkungen sind umstritten. Das Ausmaß der Versauerung (an der Oberfläche wird der pH-Wert 2100 um 0,5 Einheiten niedriger sein, wenn in gleichem Maße wie bisher CO_2 emittiert wird) ist abhängig von bekannten chemischen Prozessen und kann deshalb mit relativ großer Sicherheit abgeschätzt werden.

Daher ist die globale Klimaerwärmung hinsichtlich der Folgen menschlicher Eingriffe in die natürliche Umwelt vielleicht nur die Spitze des Eisberges. Die Veränderungen in den Ozeanen sind zwar weniger gut sichtbar, aber gleichermaßen Besorgnis erregend. Eines jedoch ist sicher: Wir müssen aufhören, Ozeane und Atmosphäre getrennt voneinander zu betrachten. Stattdessen müssen wir uns darüber klar werden, dass das CO_2 , das wir in die Atmosphäre emittieren und das von den Meeren aufgenommen wird, nicht verschwindet, sondern Folgen für marine Ökosysteme hat. Diese müssen bei der Abwägung von Risiken bei politischen Entscheidungen berücksichtigt werden.

CO₂ aus der Luft ins Meer

CO₂ kennt keine politischen Grenzen: es ist über die ganze Erdoberfläche verteilt und betrifft alle Länder gleichermaßen, unabhängig davon, ob sie selbst große oder kleine Mengen des Treibhausgases emittieren. Außerdem unterscheidet CO₂ nicht zwischen Luft und Wasser, sondern wandert zwischen diesen Medien hin und her und versucht, sich in beiden so gleichmäßig wie möglich zu verteilen. Die Natur strebt hier, wie auch sonst, einen Gleichgewichtszustand an, d.h. einen Zustand, in dem das Meer und die Atmosphäre möglichst gleiche Anteile an CO₂ enthalten.

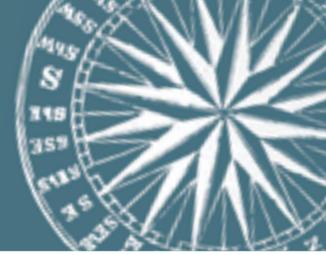
Während CO₂ in der Luft über dem Meer relativ stabil ist, passieren bei seinem Eintritt ins Wasser zwei verschiedene Dinge:

1) CO₂ reagiert mit Wassermolekülen und bildet andere Formen von anorganischem, im Meerwasser gelösten Kohlenstoff: „Karbonat“ und „Bikarbonat“. Das Meer ist unersättlich, was den Verbrauch an CO₂ betrifft: Da es immer danach strebt, genauso viel CO₂ wie die Luft zu enthalten, wird es immer, sobald es CO₂ in Karbonat umgewandelt hat, nach mehr CO₂ verlangen und folglich mehr CO₂ aufnehmen, usw., solange bis ein Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Kohlenstoff-Formen im Wasser erreicht ist. Dieses Gleichgewicht hängt vor allem vom pH-Wert, d.h. dem Säuregehalt des Wassers, ab. Beim momentanen Säuregehalt liegt etwa 1% des gesamten Kohlenstoffs im Oberflächenwasser als CO₂ vor, die anderen 99% als Karbonat und Bikarbonat.

Die sofortige chemische Umwandlung des CO₂s beim Eintritt in das Meerwasser veranschaulicht, was wir die „Pufferkapazität“ des Wassers nennen: die Fähigkeit des Meeres, seinen pH-Wert nahezu beizubehalten wenn CO₂ sich löst, solange die beteiligte Menge an CO₂ nicht durch den Menschen gestört wird. Allerdings wird sich in Zukunft die Pufferkapazität des Meerwassers bei zunehmenden CO₂-Mengen in der Atmosphäre und einer gegenüber der Vergangenheit erhöhten CO₂-Aufnahme der Ozeane verringern. Das bedeutet, dass das Wasser nicht mehr so gut in der Lage sein wird, Veränderungen des pH-Wertes aufzufangen: Der pH-Wert wird sinken, und das Meerwasser wird saurer.

2) Durch CO₂ wird das Wachstum von Phytoplankton (oder grünen Algen) ermöglicht, ebenso wie das aller anderen Pflanzen. Phytoplankton ist die Grundlage des gesamten marinen Nahrungsnetzes. Zum Wachstum braucht es Licht, Kohlenstoff und verschiedene Nährelemente. Wenn Phytoplankton abstirbt oder gefressen wird, sinken die Überreste im Meer ab, und weil diese vor allem aus Kohlenstoff bestehen, wird im Lebenszyklus des Phytoplanktons Kohlenstoff aus dem oberflächennahen Wasser entfernt. Allerdings werden die toten Organismen beim Absinken zu anorganischem Material abgebaut (d.h. sie werden remineralisiert), und Kohlenstoff wird wieder im Wasser gelöst. Wegen der vertikalen Bewegung des Wassers im Meer gelangt so ein Teil dieses Kohlenstoffs wieder zurück in die oberflächennahe Schicht. Immer sinkt jedoch ein bestimmter Anteil des Kohlenstoffs weiter in tiefere Schichten des Meeres und schließlich sogar bis zum Meeresboden ab, wo er in Sedimenten abgelagert wird.

Dieser biologische Umsatz von Kohlenstoff kommt nie zum Erliegen, sondern findet immer irgendwo auf der Erde statt. Man vermutet, dass dieser Prozess kaum durch den Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre beeinflusst wird. Da Kohlenstoff im Wasser in solch großen Mengen für die Photosynthese zur Verfügung steht, nimmt man an, dass der Anstieg, der jene 1% des Kohlenstoffs betrifft, die in Form von gelöstem CO₂ vorliegen, vernachlässigbar ist. Möglicherweise veranlassen uns aber aktuelle Forschungsergebnisse, diese Annahme noch einmal zu überdenken.



Zwei entscheidende, aber unbekannte Faktoren

Warum ist es so schwierig, Klimaveränderungen vorherzusagen?

Erstens ist unser Verständnis der beteiligten Naturvorgänge begrenzt: diejenigen menschlichen Aktivitäten, bei denen Treibhausgase entstehen, sind zwar bekannt, aber wir verstehen die natürlichen Prozesse bislang nicht vollständig, durch die diese Gase freigesetzt, aufgenommen und gespeichert werden. Die Art und Weise, mit der Kohlenstoff von einem natürlichen Speicher in einen anderen übergeht (der Kohlenstoffkreislauf) ist sehr komplex, und unser Wissen, wie dieser Kreislauf auf Störungen durch Menschen reagiert, ist begrenzt.

Zweitens stehen wir vor einem weiteren großen Rätsel: die Zukunft der menschlichen Gesellschaft. Wie wird sich die Weltbevölkerung entwickeln? Wie werden sich die ärmsten Länder entwickeln, die momentan sehr wenig CO₂ emittieren? Was passiert mit den Emissionen, wenn der Wirtschaft eines Landes geringere Öl- und Kohlevorräte zur Verfügung stehen? Welche Entscheidungen treffen Politiker in Zukunft, um Emissionen zu begrenzen? Werden wir vielleicht dank neuer Technologien in der Lage sein, Energiequellen ohne den Ausstoß von Treibhausgasen zu nutzen? Das sind viele Fragen, die man unmöglich im Laufe eines Jahrhunderts beantworten kann.

Es ist unmöglich, Licht in die meisten der unbekanntesten Faktoren zu bringen, die mit der Zukunft menschlichen Handelns zusammenhängen. Deswegen betrachten wir sie im Rahmen mehrerer sozioökonomischer Szenarien, die verschiedenen möglichen Entwicklungen der Weltbevölkerung, des Wirtschaftswachstums, der Umweltpolitik, usw.⁴ entsprechen. Andererseits kann sich unser Verständnis des Ablaufs natürlicher Prozesse durchaus verbessern.

Vom menschlichen Körper zum Planeten Erde

Einige Leute behaupten, dass wir mit unserem Wissen über den Planeten Erde an einem ähnlichen Punkt stehen wie Ärzte am Anfang des 19. Jahrhunderts bezüglich des menschlichen Körpers. In diesem Stadium begannen sie gerade, den Blutkreislauf, die Atmung und das Nervensystem zu verstehen und die Funktionsweise der verschiedenen Organe, wie Lungen, Herz, Gehirn, Verdauungssystem usw., herauszufinden.

Es stimmt, dass unser Verständnis des „Organismus“ Planet Erde im Moment sehr begrenzt ist. Wir kennen die Schlüsselemente in den ökologischen Kreisläufen: Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff. Zusätzlich kennen

wir die wichtigsten „Organe“: Die Ozeane, die Atmosphäre sowie die Pflanzen- und Tierwelt. Aber wie durchlaufen die Schlüsselemente jene „Organe“? Welche Kontrollmechanismen gibt es? Worauf wirken sie ein? In welcher Weise und warum wirken sie?

Lange Zeit haben wir geglaubt, dass beispielsweise Pflanzen durch physikalische Faktoren, wie Licht, Niederschlag und Temperatur, beeinflusst werden. Aber sind nicht in Wirklichkeit die Pflanzen selbst Teil eines Kreislaufes und folglich in der Lage, wiederum diese physikalischen Faktoren zu beeinflussen?

Derzeit wissen wir noch nicht genau, wie wir solche grundlegenden Fragen beantworten können.

Natürlich haben wir im Vergleich zu den Ärzten des 19. Jahrhunderts viele Vorteile: die Genauigkeit der Messinstrumente, Satellitenbilder, den Austausch von Information und Ideen, kontinuierliche wissenschaftliche Zusammenarbeit auf globaler Ebene sowie die Leistung von Computern, die es uns ermöglichen, alle diese Informationen zu verarbeiten.

Allerdings müssen wir auch noch große Hindernisse überwinden:

- Der Planet Erde ist ein besonders unhandlicher „Körper“ und nicht leicht zu untersuchen. Um von einem „Organ“ zum nächsten zu gelangen, müssen wir oft tausende von Kilometern reisen! Außerdem ist es sehr schwierig, die Elemente in den Kreisläufen zu „sehen“ und sie bei ihren Reisen zu verfolgen. Zum Beispiel verwenden wir ¹⁴C (ein Isotop des Kohlenstoffs), um den Austausch von Kohlendioxid zwischen „Organen“ zu verfolgen, weil dieser nicht direkt sichtbar ist. Da aber ¹⁴C nur in winzig kleinen Mengen vorkommt (durchschnittlich 1×10^{-12} - d.h. ein Tausendstel eines Milliardstels des Kohlenstoffs in einer Probe), brauchen wir sehr spezielle Techniken, um ihn zu messen. Die Untersuchung von Flüssen (d.h. die Bewegung von Wasser, Gasen und Nährstoffen zwischen Böden, Pflanzen, Ozeanen, Flüssen, der Atmosphäre, Tieren, usw.) kann etwas willkürlich sein, da sie auf örtlich und zeitlich begrenzte Messungen zurückgeht und folglich mit erheblichen Fehlern behaftet sein kann.
- Wir haben nur eine Erde. Experimentelle Wissenschaft beruhte immer auf der Möglichkeit, Hypothesen zu testen und die Ergebnisse zu vergleichen, um so Naturgesetze aufzudecken. In unserem Fall ist es unmöglich, eine Erde zu nehmen, diese mit CO₂ zu versetzen, 100 Jahre zu warten und die Ergebnisse mit einer anderen Probe „Erde“ zu vergleichen, die kein zusätzliches CO₂ erhalten hat.

⁴) weitere Informationen: Die Hauptszenarien im Rahmen des dritten Untersuchungsberichts des IPCC werden auf den Seiten 10-11 der Zusammenfassung „summary for policy-makers“ vorgestellt, die man unter www.ipcc.ch nachlesen kann.

Das System in seiner Gesamtheit verstehen

Schließlich sind wir mit einer Schwierigkeit konfrontiert, die bisher in der Geschichte der Wissenschaft nicht aufgetreten ist. Bis zur Renaissance konnten sich große Denker, wie Leonardo da Vinci, immer noch mit allen Bereichen des menschlichen Wissens beschäftigen: Kunst, Philosophie, Mathematik, Biologie, Physik, Geschichte, usw. Mit der Beschleunigung des wissenschaftlichen Fortschritts während der letzten zwei Jahrhunderte wurde die Einteilung des Wissens in verschiedene Fachgebiete jedoch immer differenzierter.

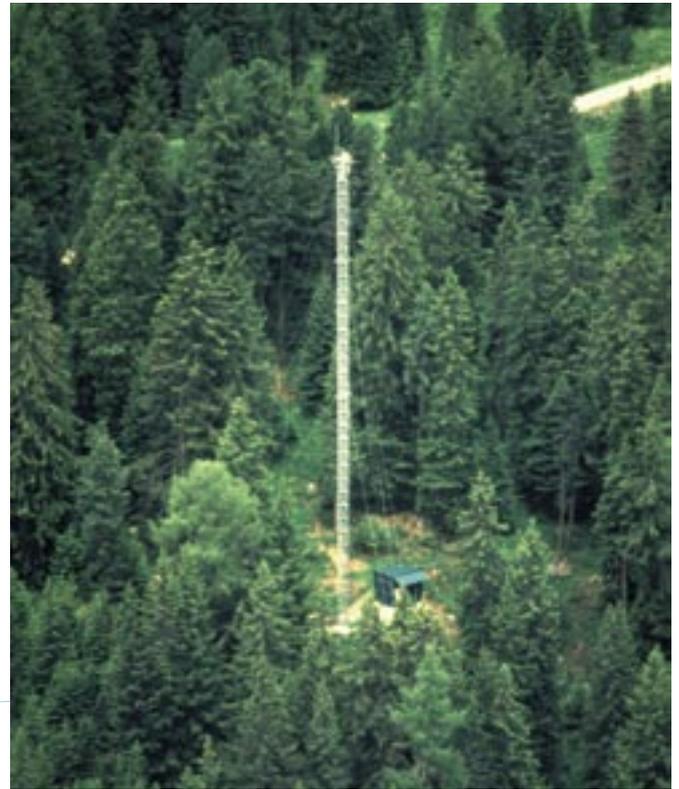
Das Problem besteht darin, dass wir allein mit spezialisierten Fachgebieten nicht in der Lage sind, das System in seiner Gesamtheit zu verstehen. Während wir weiterhin einige Teilbereiche isolieren müssen, um sie besser untersuchen zu können, müssen wir sie gleichzeitig auch miteinander verbinden, so wie sie in Wirklichkeit zusammengehören, um zu versuchen, ihre Wechselwirkungen zu verstehen. Die Klimaveränderung betrifft die Wechselwirkungen zwischen menschlichen Gesellschaften und dem gesamten System Erde. Deshalb müssen wir die verschiedenen Fachgebiete in die Geowissenschaften einbinden, auch die Sozialwissenschaften. Das kommt einer Revolution gleich, in dem Sinne, dass unsere Denkmuster umgekrempelt werden und wir gezwungen sind, unsere Bildungssysteme zu überprüfen.

Vor allem wegen dieser Notwendigkeit einer globalen Sicht begann der britische Wissenschaftler James Lovelock sich die Erde als einen Makro-Organismus vorzustellen, den er Gaia nennt. Die so genannte „Gaia-Hypothese“ betrachtet die Erde als eine Art Organismus, der selbst regulierend ist und in dem die Naturgesetze das System ständig im Gleichgewicht halten und Leben ermöglichen.



Das Projekt LBA Carbonsink:
Ein mikrometeorologischer Mess-
turm mitten im dichten Regen-
wald im Amazonasbecken in
Brasilien

© John Grace, Universität
Edinburgh, Großbritannien

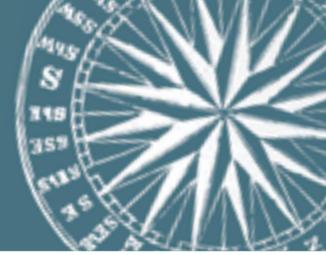


Ein mikrometeorologischer Messturm von oben betrachtet, Renon/Ritten,
Italien

© Stefano Minerbi, Forstabteilung, Autonome Provinz Bozen, Südtirol

Diese Theorie macht uns Hoffnung, dass das System zwangsläufig wieder in einen Gleichgewichtszustand zurückkehrt. Aber genauso gut können wir uns über die enormen Mengen an fossilem Kohlenstoff Sorgen machen, die nach und nach im Laufe geologischer Zeitalter gespeichert wurden und die wir heute mit einem Schlag freisetzen. Die Natur alleine hat das nicht so vorgesehen. Wird sie trotzdem in der Lage sein, die Einstellung eines neuen Gleichgewichts zu sichern, in dem menschliches Leben weiterhin möglich ist?

Kurz gesagt: wir stellen fest, dass die Menschheit dabei ist, extreme und dauerhafte Veränderungen des Klimas und der Ökosysteme zu verursachen, indem sie die Gleichgewichte stört, die sich langsam während geologischer Zeiträume eingestellt haben. Wir können einige Folgen dieser Veränderungen feststellen, aber wir können sie weder sicher noch genau vorhersagen, einerseits da wir immer noch ein unzureichendes Verständnis für die beteiligten natürlichen Prozesse haben, andererseits da zukünftiges menschliches Handeln langfristig nicht vorhersagbar ist.



2. Die wichtigsten Fragen über natürliche Prozesse

Das Hauptziel liegt auf der Hand: die Erweiterung unseres Gesamtverständnisses für das System Erde

In jedem natürlichen System gibt es immer Prozesse, Wechselwirkungen und Rückkopplungen; es gibt weder Anfang noch Ende, sondern vielmehr Ursachen und Wirkungen, die sich ständig gegenseitig beeinflussen: ein ganz schön schwieriges Rätsel. Die Fragen, die wir uns stellen, sind daher voneinander abhängig und können folglich ganz verschieden formuliert werden. Aber von welchem Gesichtspunkt aus man es auch immer betrachtet, es ergeben sich im Wesentlichen die folgenden Fragen:

Wie reagiert der Kohlenstoffkreislauf auf die steigenden CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre?

Wie läuft der Austausch von Kohlenstoff zwischen den verschiedenen Kompartimenten des Kreislaufes (Sedimente, Böden, Pflanzen, Ozeane, lebende Organismen, usw.) ab? Wie reagieren diese Komponenten auf den Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre? Wie hoch ist die natürliche Aufnahmekapazität der Vegetation und der Ozeane für den Kohlenstoffüberschuss, den wir in die Atmosphäre freisetzen? Wird die Kohlenstoffspeicherung durch Biodiversität beeinflusst? Durch welche forst- und landwirtschaftlichen Praktiken wird die Speicherung von Kohlenstoff begünstigt? (siehe „Die dringliche Frage der natürlichen Kohlenstoff-Senken“).

Wie reagiert der Wasserkreislauf auf den Temperaturanstieg?

Wasserdampf ist das häufigste natürliche Treibhausgas. Führt erhöhte Verdunstung zu höheren Wasserdampfgehalten in der Atmosphäre und somit zu einer stärkeren Bewölkung, erhöhten Niederschlägen und folglich weniger Sonnenschein und einer Abschwächung des Treibhauseffekts? Oder wird durch mehr Wolken mehr Wärme auf der Erdoberfläche gehalten und somit der Treibhauseffekt verstärkt?

Wie ist der Stickstoffkreislauf mit den anderen Stoffkreisläufen verknüpft und wie werden diese Wechselwirkungen auf Eingriffe des Menschen reagieren?

Stickstoff (der 78% der Atmosphäre ausmacht) ist ein lebenswichtiges Element, essentiell für alle Lebewesen einschließlich der Pflanzen. Die Verfügbarkeit von Stickstoff ist einer der Faktoren, die das Wachstum von Pflanzen begrenzt: Ackerland wird mit Stickstoffdüngern versetzt, um den Ertrag zu steigern. Was aber passiert, wenn die Atmosphäre mit CO₂ angereichert wird? Wird die Photosyntheserate der Pflanzen zunehmen oder wird sie durch andere Faktoren, wie die Stickstoffverfügbarkeit im Boden, begrenzt sein?

Wie funktioniert der Wärmetransport in Ozeanen und wie reagieren Meeresströmungen auf die globale Erwärmung?

In welcher Weise werden Meeresströmungen von der globalen Erwärmung betroffen sein? Welche Folgen wird das wiederum auf das Klima haben? Ist die Furcht vor irreversiblen Veränderungen der Klimaregulation durch die Ozeane berechtigt? Gibt es ein „Überraschungs-Risiko“ im Zusammenhang mit sehr unwahrscheinlichen Ereignissen, die jedoch sehr weit reichende Folgen haben können?



Arktische Sonne – Trans-Arktische Schiffsreise auf dem Schwedischen Eisbrecher Oden

© Toste Tanhua, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Deutschland



© CarboOcean

Wie werden sich die Ozeane in einer CO₂-reicheren Welt entwickeln?

Wird die Versauerung der Ozeane, die durch die Aufnahme großer Mengen an CO₂ bedingt ist, die marine Nahrungskette stören und zum Aussterben einiger mariner Arten führen? Werden diese ökologischen Störungen wiederum die Fähigkeit der Ozeane beeinträchtigen, CO₂ aufzunehmen?

Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die verschiedenen Ökosysteme und welche Rückkopplung auf das Klima werden diese Auswirkungen haben?

Wie reagieren Wälder, Feuchtgebiete, Äcker, Grasländer usw. verschiedener Breitengrade auf die Veränderung des Klimas? Führen steigende CO₂-Gehalte in der Atmosphäre und erhöhte Temperaturen zu erhöhten Photosyntheseraten und folglich zu verstärkter Kohlenstoffspeicherung in Pflanzen? Welche Folgen haben erhebliche Änderungen in der Landnutzung wie beispielsweise die Rodung von Wäldern? Werden die Permafrostböden in arktischen Gebieten durch erhöhte Temperaturen schmelzen und wenn ja, würde das zur Freisetzung weiterer Treibhausgase führen, was die Temperaturen noch weiter steigen ließe?



Plateau Rosa, Italien: eine der höchsten atmosphärischen Beobachtungsstationen des Aerocarb Projektes.

© Francesco Apadula, CESI, Mailand, Italien

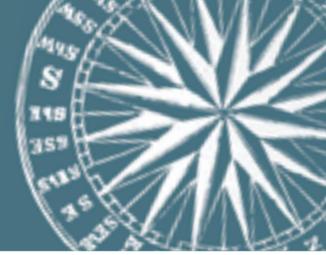
Welche Auswirkungen sind auf lokaler und regionaler Ebene zu erwarten?

Welche Unterschiede in den Klimaveränderungen (Anstieg der Temperatur, der Niederschläge usw.) wird es zwischen den verschiedenen Teilen der Welt geben? Werden die Gletscher der Alpen verschwinden? Werden die Mittelmeerregionen zu Wüsten? In welcher Weise sind unsere Wasservorräte betroffen? Was passiert, wenn das Wasser, das im Winter gewöhnlich in Form von Schnee gespeichert wird, direkt in die Flüsse gelangt? Welche Auswirkungen hat das für die Landwirtschaft, die Nahrungsmittelproduktion und natürliche Lebensräume?

Müssen wir eine Zunahme extremer Wetterereignisse befürchten, und wenn ja, in welchen Breiten?

Werden Hurrikans und andere Stürme häufiger und stärker werden? Werden Dürren und Fluten häufiger auftreten und wo?

Es erübrigt sich zu sagen, dass wir die Antworten auf die meisten dieser wesentlichen Fragen bereits teilweise kennen, mehr oder weniger genau. Aber wir sind uns auch bewusst, dass wir vermutlich nie die ganze Wahrheit wissen werden. In diesem Bereich der Forschung wird es immer einige Dinge geben, die wir nicht wissen; es geht daher eher darum, Unsicherheiten zu reduzieren. Im Wesentlichen ist es das, was wir erreichen möchten.



3. Die dringliche Frage der „natürlichen Kohlenstoff-Senken“

Eine sehr überraschende Tatsache ist, dass sich nur etwa 55% des CO₂s aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in der Atmosphäre anreichert. Der Rest wird von den Ozeanen und der Biosphäre gebunden. Deshalb bezeichnen wir diese auch als „natürliche Kohlenstoff-Senken“, da sie die schädlichen Folgen menschlicher Eingriffe in die Atmosphäre ausgleichen (oder beträchtlich verlangsamen).

Dennoch stellen wir uns nicht ohne Beunruhigung folgende Fragen:

- Wie lange noch werden Ozeane und Pflanzen in der Lage sein, weiterhin einen erheblichen Anteil des Kohlenstoffs aufzunehmen, den wir in die Atmosphäre freisetzen?
- Was passiert mit dem gespeicherten CO₂? Welche Folgen hat die CO₂ Anreicherung für die Biosphäre an Land und vor allem für die Ozeane?

Obwohl unser Wissen über natürliche Senken im Allgemeinen gut fundiert ist, bleiben dennoch beachtliche Unsicherheiten hinsichtlich der gespeicherten Mengen an Kohlenstoff, der Ursachen für die jährlichen Schwankungen, des zukünftigen Verhaltens dieser Senken und ihrer Anfälligkeit bei fortschreitender CO₂ Anreicherung.

Es bleibt unklar, welche Mengen an Kohlenstoff gespeichert werden können

Derzeit schätzt man, dass von den 6,3 Gt CO₂ (Gigatonnen, d.h. 10⁹ Tonnen), die durchschnittlich pro Jahr bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt werden, 2,8 +/- 0,5 Gt in den Ozeanen und von der Landvegetation gebunden werden - also zwischen 36 und 53% unserer Emissionen, im Durchschnitt 44,5%.

Schwieriger ist jedoch festzustellen, wie viel CO₂ jeweils von welcher der natürlichen Senken aufgenommen wird. Aus diesem Grund ist der Unsicherheitsgrad sogar noch höher:

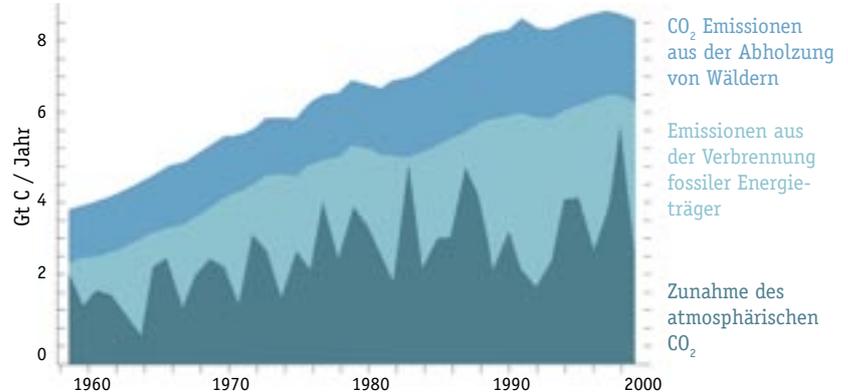
- Ozeane nehmen 1,9 Gt +/- 0,7 Gt auf, d.h. zwischen 19 und 41% unserer Emissionen.
- Die Landvegetation bindet 1,2 Gt +/- 0,8 Gt, d.h. zwischen 6 und 32% unserer Emissionen.

Wir versuchen mit allen verfügbaren Mitteln, diese erheblichen Unsicherheiten zu reduzieren. Besonders wichtig ist es dabei, die zwischen aufeinander folgenden Jahren messbaren Schwankungen natürlichen Ursprungs (Ökosystem-bedingt) getrennt von jenen Schwankungen zu betrachten, die auf menschliche Eingriffe zurückgehen.

Überraschende Jahresschwankungen

Die unten aufgeführten Zahlen sind nur Durchschnittswerte. In Wirklichkeit kann sich die Aktivität natürlicher Senken von einem Jahr zum nächsten stark unterscheiden.

Während durch den Menschen verursachte Emissionen (Waldrodung und Verbrennung fossiler Brennstoffe: die oberen zwei Linien, in Gt/Jahr) vergleichsweise gleichmäßig zunehmen, ist der Verlauf des Anstieges von CO₂ in der Atmosphäre (d.h. der Anteil der Emissionen, der weder von Ozeanen noch von der Biosphäre gebunden wird, sondern in der Luft bleibt; untere Linie in der Abbildung) sehr unregelmäßig. Einige dieser Schwankungen sind auf andere natürliche Phänomene zurückzuführen (vor allem auf El Niño), aber wir wissen sehr wenig über die Mechanismen, die den größten Teil der Schwankungen verursachen. Welche Rolle spielen die Ozeane und die Biosphäre? Wodurch werden diese Schwankungen verursacht? Um welche genaue Menge variiert die Aufnahme der einzelnen natürlichen Senken, und welches Szenario ist für eine Atmosphäre, die sich immer mehr mit CO₂ anreichert, am wahrscheinlichsten?



© Andrew Manning, Universität East Anglia, Norwich, Großbritannien

5) Diese Zahlen addieren sich nicht genau auf (d.h. nur innerhalb ihrer Fehlerbreite), vor allem weil für ihre Berechnung verschiedene Messreihen verwendet wurden. Die Summe der Senkenwirkung der Ozeane und der terrestrischen Biosphäre wird über die Änderung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen direkt berechnet (unter Berücksichtigung des durch Industrie ausgestoßenen CO₂). Dagegen kann nur über zusätzliche Messungen von „Markern“ wie ¹⁴C, ¹³C usw. bestimmt werden, wie viel CO₂ Ozeane und Biosphäre jeweils getrennt aufnehmen. Die Zahlen kommen also auf unterschiedliche Art zustande, daher die unterschiedlichen Werte. Keeling & Garcia (2002).

Terrestrische Senken: die Bedeutung der Geschichte

Terrestrische Kohlenstoffsinken sind nicht nur von der Art der Vegetation und physikalischen Parametern (des Wetters, täglicher und jahreszeitlicher Schwankungen, usw.) abhängig, sondern auch von der Landnutzungsgeschichte mehrerer Jahrhunderte. Zwei auf den ersten Blick gleich aussehende Grasländer können sich in ihrer Kohlenstoffbilanz stark unterscheiden falls beispielsweise das eine über Jahrhunderte hinweg ackerbaulich genutzt wurde, während das andere noch vor 20 Jahren bewaldet war. Der europäische Kontinent ist seit einigen Jahrtausenden entscheidend durch die Gegenwart von Menschen geprägt. Es bleibt noch viel zu tun, um die Stoff-Flüsse zu rekonstruieren ohne dabei allzu viele Fehler zu machen!



Erste CO₂-Messungen an Bord des Frachters MS Falstaff

© CarboOcean

Die Devise der Biosphäre: „Langsam rein, schnell raus“

Die Aufnahme von atmosphärischem CO₂ durch die Photosynthese der Vegetation ist das Ergebnis eines langen und komplizierten Vorganges („langsam rein“). Im Gegensatz dazu wird bei der Verbrennung plötzlich und zwangsläufig Kohlenstoff freigesetzt („schnell raus“).

Zudem enthält die terrestrische Biosphäre zwischen zwei- und fünfmal mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre. Veränderungen im Kohlenstoffvorrat der Vegetation haben

deshalb erhebliche Auswirkungen auf die CO₂-Konzentrationen der Luft. Der größte Teil des Kohlenstoffs, der durch Photosynthese gebunden wird, wird eigentlich nur vorübergehend (in Blättern, Holz und Früchten) gespeichert, ehe er durch Zersetzung und Atmung wieder in die Luft zurückkehrt. Lediglich ein kleiner Anteil wird dauerhaft in stabileren Formen im Humus gespeichert. Wir wissen nur wenig darüber, wodurch diese Verteilung bestimmt wird.



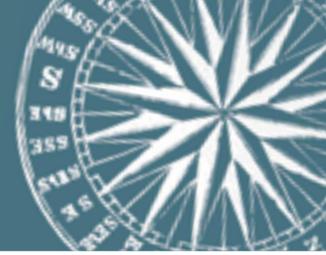
Forschungsgelände in Russland – Fyodorovskoye. Die Entnahme von Luftproben für die Analyse in westeuropäischen Laboratorien stellt in einem entlegenen Wald eine logistische Herausforderung dar.

© Rolf Neubert, Zentrum für Isotopenforschung, Universität Groningen, Niederlande

Sind terrestrische Senken kurzfristig gefährdet?

Neueste Untersuchungen zeigen, dass Versuche, Kohlenstoff künstlich in Vegetation zu speichern (vor allem durch das Anpflanzen neuer Wälder) nur für die nächsten 200 Jahre erfolgreich sein werden, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen Baumwachstum und Holzernte eingestellt hat. Lediglich die Ozeane werden ihre Speicherkapazität noch mehrere Jahrhunderte aufrechterhalten. Einige terrestrische Ökosysteme könnten sogar zu natürlichen Quellen werden, die große Mengen an CO₂ freisetzen und all unsere Bemühungen, die vom Menschen verursachten Emissionen zu reduzieren, zunichte machen.

Wir können nur hoffen, dass dieses Szenario übertrieben pessimistisch ist und dass die Wirklichkeit weniger düster aussehen wird. Auf jeden Fall können wir daran sehen, dass es dringlicher als je zuvor ist, unser Verständnis für natürliche Senken und deren Veränderungen im Lauf der Zeit weiterzuentwickeln. Die EU trägt durch die beiden groß angelegten Projekte CarboEurope und CarboOcean für terrestrische bzw. marine Senken zu dieser Aufgabe bei.



Wissenschaftliche Forschung: Der Wirklichkeit auf der Spur

Angesichts eines unerwarteten Phänomens wie der globalen Erwärmung stellen wir uns als Wissenschaftler zuallererst selbst Fragen, wie die, die auf den vorhergehenden Seiten zusammengefasst sind.

Als nächstes denken wir uns dann eine oder mehrere Hypothesen aus: wir ermitteln quasi die Hauptverdächtigen. Zum Beispiel könnten wir sagen, dass die Verbrennung fossiler Energieträger (also eigentlich der Mensch) verantwortlich für den Anstieg der CO₂-Konzentrationen ist.



© Axel Don, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Deutschland

Danach beginnen wir mit der Untersuchung. Wir suchen nach allen möglichen Hinweisen, mit denen wir unsere Hypothese entweder bestätigen oder verwerfen: Spuren, Zeichen, Fußabdrücke (das sind alles Begriffe, die wir in diesem Zusammenhang tatsächlich verwenden). Wir führen Experimente durch, machen Messungen, sammeln Proben und führen Laboranalysen durch. Dabei macht man oft sehr ungewöhnliche Dinge: einen Nachmittag auf einem Turm über den Baumspitzen verbringen, ein Thermometer in den Boden einsetzen, die ganze Nacht Tüten voller Luft mitten auf einem Acker sammeln, Flugzeuge ununterbrochen ohne Ladung hoch und runter fliegen lassen, Löcher auf Berggipfeln und am Meeresboden graben, usw.

Wir überprüfen und sortieren eine Vielzahl an Informationen bis ein „Bündel an Vermutungen“ übrigbleibt, die ausreichend zuverlässig sind, um Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. Oft wird es erst durch die Anhäufung einer großen Menge an Information über ein bestimmtes Thema möglich, statistische Trends zu erkennen. In anderen Fällen führen uns Extremwerte, also Daten, die statistisch nicht erklärbar sind, auf neue Wege in der Forschung.

Für gewöhnlich brauchen wir mehrere Jahre sowie viel Ausdauer, um vom Fragen zum Antworten zu kommen. Gelegentlich können wir gar keine Antwort finden, oder nur für einen kleinen Teil des Problems, oder nicht in

der erwarteten Form. Manchmal wird ein früheres Ergebnis, das man als allgemein gültig angesehen hat, durch eine Schlussfolgerung neuerer Forschung in Frage gestellt. Es kommt auch vor, dass wir durch Zufall Fragen beantworten können, die wir uns nie selbst gestellt hätten!

In den meisten Fällen geben unsere Schlussfolgerungen keine klaren Antworten auf die ursprüngliche Frage, sondern werfen weitere Fragen und Hypothesen auf, mit denen wir aufs Neue zu arbeiten beginnen. Einfach ausgedrückt: Wir stellen wir uns ständig Fragen, stellen in Frage was wir wissen und versuchen, das zu „sehen“, was man nur schwer sehen kann.

4. Wie gehen wir vor, um Antworten auf diese Fragen zu finden?

Beobachtung: der Planet Erde wird unter medizinische Aufsicht gestellt

Das Ziel ist einfach: so viele Daten wie möglich über die größtmögliche Anzahl an Parametern sammeln, so oft wie möglich, an möglichst vielen Orten, um ein möglichst genaues Gesamtbild über den Zustand des Klimas unseres Planeten zu erhalten. Kurz gesagt geht es um die Beantwortung dieser Frage: „Was passiert wirklich, und zwar wann und wo?“

Beobachtungen können ganz unterschiedlich sein. So messen wir zum Beispiel:

- Vorräte (z.B. wie viel Kohlenstoff in der Vegetation und in den Böden vorhanden ist)
- Flüsse (z.B. um die Menge an CO₂ abzuschätzen, die von einem Wald, einem Acker, einer natürlichen Wiese, von der Phytoplanktonblüte usw. freigesetzt oder aufgenommen wird)
- Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre
- Meeresströmungen
- Meteorologische Parameter
- Daten von Satelliten, die uns Informationen über eine Vielzahl von Parametern liefern (beispielsweise Temperaturen an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre, Deckungsgrad der Vegetation usw.)

Es handelt sich um eine Art planetarischer Überwachung (Monitoring), die den Kontrolluntersuchungen zur Erstellung einer medizinischen Diagnose vergleichbar ist: wir stellen die Erde unter Aufsicht, um die Entwicklung aller Parameter, die wir messen können zu überwachen. Unser Ziel ist es, die Häufigkeit der Messungen und die Verteilung der Messpunkte zu verbessern, um so ein immer klareres Bild des Zustandes zu erhalten. Außerdem wollen wir die Entwicklung neuer genauerer und verlässlicherer Geräte fördern.

Zusätzlich zu den Beobachtungen in der Gegenwart untersuchen wir mit großer Aufmerksamkeit die Vergangenheit. Die Erde bietet uns eine Menge an „Archiven“, in denen man sehr genaue Spuren vergangener Klimate finden kann. Sie können bis zu Hunderte von Millionen Jahren zurückreichen. Zum Beispiel kann man in Gletschern der Gebirgsregionen und in den Eiskappen der Pole Luftproben finden, anhand derer sich die Geschichte unseres Klimas rekonstruieren lässt.



Anders Olsson bestimmt halogenierte Kohlenwasserstoffe im Meerwasser durch Gaschromatographie

© Yoshie Kasajima, Bjerknes Zentrum für Klimaforschung, Bergen, Norwegen

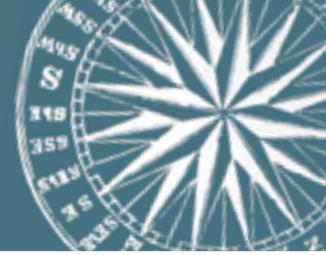
Experimente: die Mechanismen verstehen, die den Organismus Erde steuern

Es ist schön und gut Beobachtungen zu machen, aber die Frage, die uns ständig verfolgt ist: „Warum und wie passiert das?“

Das Herz der Forschung ist dort zu finden, wo wir versuchen, die Grenzen unseres Wissens zu erweitern und unser Verständnis für Phänomene, über die wenig oder nichts bekannt ist, weiterzuentwickeln. Genau an diesem Punkt finden wir alle unsere Schlüsselfragen, die eine Art riesiges Puzzle bilden. Jeder Forscher versucht ein kleines Teil dieses Puzzles zu beleuchten und so das Ganze voranzubringen.

So gesehen arbeiten Forscher jeweils an „ihren“ eigenen Fragen. Nehmen wir zum Beispiel einen Wald, von dem man annahm, er wäre eine Kohlenstoffsenke: atmosphärische Messungen zeigten, dass dieser Wald Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufnimmt, aber gleichzeitig wird nur eine sehr viel geringere Zunahme der Biomasse (Vegetation) gemessen. Die Bäume speichern also nur einen Teil des Kohlenstoffs, der vom Wald aufgenommen wird. Was passiert mit dem Rest? Was findet wirklich statt zwischen Atmosphäre und Bäumen, und dann weiter zwischen Bäumen und Boden, zwischen Boden, Ausgangsgestein und unterirdischem Wasser, und zwischen Pflanzen und Tieren? Warum passiert das alles und wie?

Um diese Art von Fragen zu beantworten, kann man nur folgendermaßen vorgehen: eine Hypothese formulieren und versuchen, diese experimentell zu überprüfen. Man muss beobachten, was passiert, Proben nehmen, Ergebnisse vergleichen und das Bekannte in Frage stellen: einfach gesprochen: man muss forschen.



Modellierung: ein riesiges Spiel zur Simulation von Zeitreisen

Die Erde ist ein kompliziertes System mit Reaktionszeiten, die sehr langsam sind verglichen mit der Dauer eines Menschenlebens. Man kann dieses System unmöglich in einem abgedichteten Behälter einschließen, um dann Laborexperimente durchzuführen. Unter solchen Bedingungen ist es schwierig, vor Ort (*in situ*) zu überprüfen, ob unsere Hypothesen über das Klimasystem wahr oder falsch sind und noch viel schwieriger ist es, Vorhersagen für die Zukunft zu treffen.

Allerdings haben wir Super-Computer, mit denen wir virtuelle Planeten „Erde“ in ihrer Gesamtheit schaffen – wir bezeichnen diese als Modelle. Modelle sind eine Art Mega-Computerspiel, das wir „spielen“, indem wir künstlich Parameter verändern, um zu sehen, was dann passiert.

Wie in jedem guten Simulationsspiel gibt es ein Raster (oder Gitternetz). Die einzelnen Kästchen in diesem Raster enthalten zahlreiche Parameter (Temperatur, Feuchte, CO₂-Gehalte, Windrichtung, Vegetation, usw.) und sind über eine Reihe von Formeln miteinander verbunden, die das wiedergeben, was wir über die Verbindungen zwischen diesen Parametern in der Wirklichkeit wissen. Außerdem gibt es sogenannte „Zeitschritte“, Zeiteinheiten (zum Beispiel Stunden, Tage, Wochen, usw.), die die virtuelle Geschwindigkeit bestimmen, mit der der Computer die Parameter für jedes Kästchen anhand der Formeln neu berechnen soll, und auf diese Weise die Wirklichkeit in verschiedenen Zeitskalen simuliert.

So ist es möglich, in wenigen Tagen die Veränderung des Klimas während der vergangenen 1000 Jahre zu berechnen. Anhand von Klimaarchiven aus Bohrkernen (aus Meeressedimenten oder Gletschereis) können wir die Simulation mit der Wirklichkeit vergleichen. Unterschiede zeigen uns Unzulänglichkeiten im Modell, die behoben werden müssen. Je besser wir die Verlässlichkeit eines Modells für die Vergangenheit und Gegenwart überprüfen können, desto eher können wir uns auf die Vorhersagen für die zukünftige Entwicklung der Klimafaktoren in 50, 100 oder sogar 1000 Jahren verlassen.

Modelle sind Hilfsmittel für die Vorhersage: eine ihrer gebräuchlichsten Anwendung ist die Wettervorhersage. Sie ist eine gute Möglichkeit, die Grenzen eines Modells zu testen: manchmal sind Wettervorhersagen falsch und je weiter sie versuchen, die Zukunft vorherzusagen, desto ungenauer werden sie. Das liegt ganz einfach daran, dass Berechnungen immer nur eine Annäherung an die Wirklichkeit sind. Eine Vorhersage liefert uns Informationen über Tendenzen, aber keine Sicherheit. Je enger das Raster und die Zeiteinheiten

und je zahlreicher und genauer die Daten und Berechnungen sind (in anderen Worten: je höher die Auflösung des Modells ist), desto genauer wird das Bild und desto näher liegen die Vorhersagen an der Wirklichkeit.

Ebenso wie Wettervorhersagen uns regelmäßig täuschen, sind Klimamodelle noch weit davon entfernt, perfekt zu sein. Es gibt zwei Hauptprobleme, bei denen wir bislang noch auf den Durchbruch hoffen:

- *das Einbinden aller Komponenten in ein einziges globales Modell:* zunächst entwerfen wir getrennte Modelle für die Vegetation, die Ozeane, die Atmosphäre, usw. Im Anschluss geht es darum, alle diese Elemente (wie in der Wirklichkeit) zu einem globalen Modell zusammenzuführen, das die Gesamtheit des Systems Erde nachbilden kann. Eine der wesentlichsten Hürden stellt das bislang geringe Wissen über einige der Komponenten dar (z.B. Boden), was deren Nachbildung in einem Modell erschwert.
- *die Verkleinerung der Skala:* Wir können zwar auf planetarer Ebene das Klima relativ gut simulieren, aber auf regionaler Ebene (z.B. für den europäischen Kontinent), gelingt die Vorhersage nur mehr schlecht als recht. Aber gerade auf regionaler Ebene leiden wir gegenwärtig besonders unter dem Informationsmangel. Dieses Problem besteht nicht nur, weil die Leistung der Computer begrenzt ist (je vollständiger und genauer Modelle sind, desto mehr Berechnungen sind nötig), sondern auch weil unser Verständnis der beteiligten Phänomene begrenzt ist.



Vorräte in der unterirdischen Biomasse sind eine große Unbekannte in der terrestrischen Kohlenstoffbilanz. Forscher des Joint Research Centres (der Gemeinsamen Forschungsstelle der EU) bemühen sich, das komplette Wurzelsystem eines Pappelbestandes in Parco Ticino, Italien, auszugraben. Vor der Rodung wurden dort über mehrere Jahre hinweg die Flüsse von Treibhausgasen untersucht.

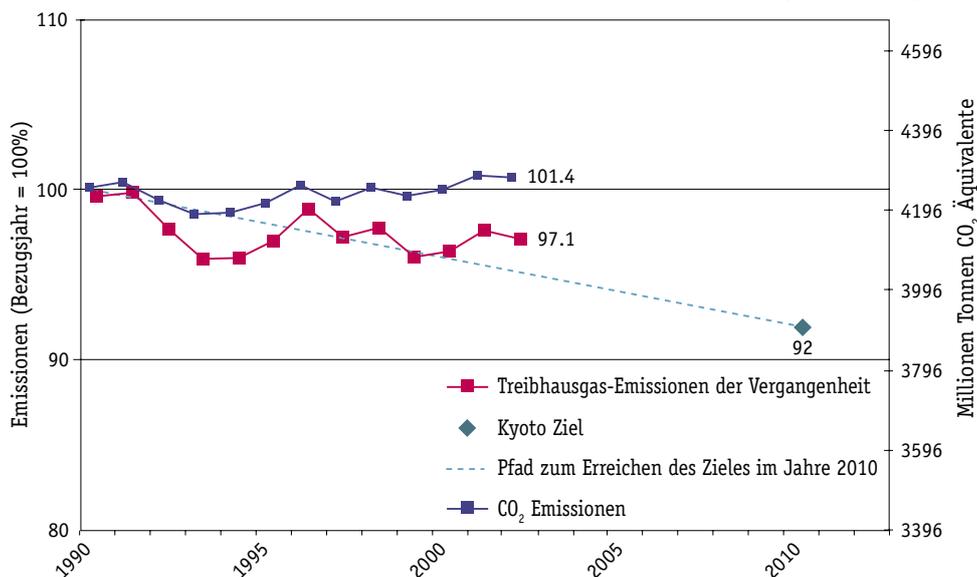


Die MS Atlantic Companion, ein Frachter mit Geräten zur Messung von CO₂ an Bord

© CarboOcean

Alles steht miteinander in Verbindung

Die drei Eckpfeiler der Forschung – Beobachtungen, Experimente und Modellierungen – sind eng miteinander verbunden: Modelle werden mit Daten aus Beobachtungen „gefüttert“, und die Berechnungen werden an das, was wir aus Versuchen gelernt haben, angepasst. Jedes Mal, wenn ein Modell ein Ergebnis liefert, das weit außerhalb des beobachteten Rahmens liegt, enttarnen wir einen Prozess, den wir noch genauer untersuchen müssen und damit beginnt der ganze Vorgang des Beobachtens, Experimentierens und Modellierens von Neuem...



Treibhausgas-Emissionen Europas (EU-15) im Vergleich zur Kyoto-Zielvorgabe

© Europäische Umweltagentur, 2004

5. Was machen wir, um das Problem zu lösen?

Obwohl wir vor immensen wissenschaftlichen Herausforderungen stehen, haben wir nicht auf den Zeitpunkt völliger Gewissheit gewartet, um die Öffentlichkeit und die öffentliche Hand zu warnen.

Seit seiner Gründung im Jahr 1988 organisiert der Zwischenstaatliche Ausschuss für globalen Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) regelmäßig auf globaler Ebene Evaluationen zum Fortschritt des Wissensstandes aller Fachbereiche, die den globalen Wandel untersuchen. Der IPCC hat in Zusammenarbeit mit mehreren 1000 Wissenschaftlern bisher bereits vier Berichte zum aktuellen Wissensstand veröffentlicht. Diese Berichte von 1990, 1995, 2001 und 2007 gelten als maßgebliche Referenzen zu diesem Thema.

Diese Berichte bilden die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik und sind das wichtigste Instrument bei der Festlegung politischer Maßnahmen zur Minderung des Treibhauseffektes. Beim Weltgipfel in Rio de Janeiro 1992 begründeten die Vereinten Nationen ausgehend vom ersten Bericht des IPCC die Klima-Rahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC). Endziel dieses Übereinkommens ist es, „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“.

Das Kyoto-Protokoll: ernsthafte Herausforderung oder nur belanglose Geste?

Das Kyoto-Protokoll wurde 1997 von der UNFCCC vereinbart und setzt bindende Ziele für die entwickelten Länder, die ihre Treibhausgasemissionen von 2008 bis 2012 um durchschnittlich mindestens 5%, verglichen mit den Emissionen im Jahr 1990, senken müssen.

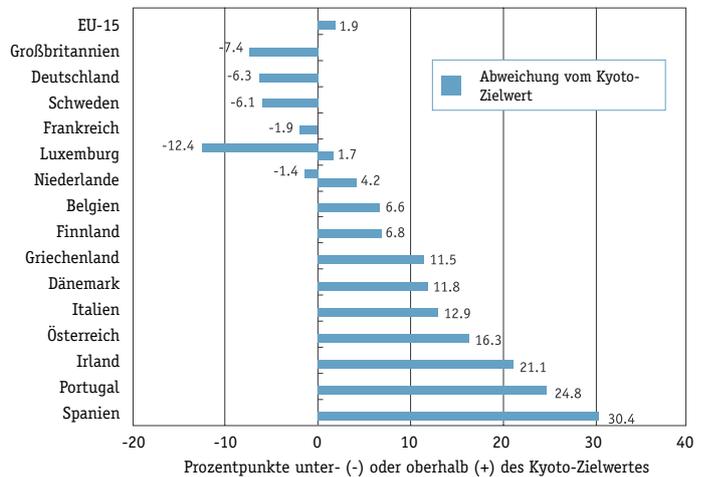
Dieses Ziel erscheint einerseits als potentiell ernsthafte Herausforderung, aber zugleich auch als unzureichende Geste.



Unzureichende Geste: aus wissenschaftlicher Sicht, da 5% die Entwicklung in keiner Weise beeinflussen werden. Bestenfalls wird dadurch die fortlaufende Verschiebung des Gleichgewichts etwas verlangsamt.

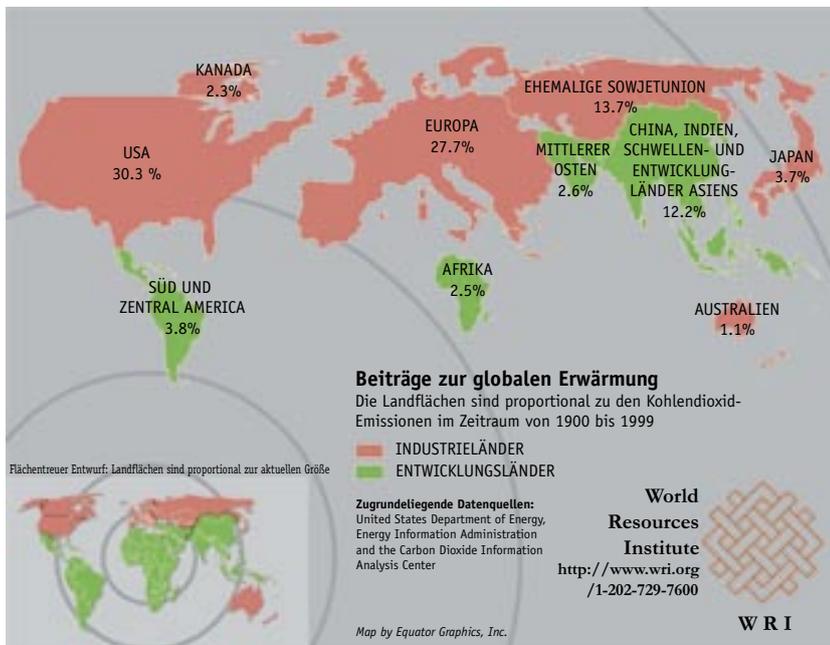
Potentiell beachtlich, da:

- Dieses Ziel der Reduktion von Emissionen ist nur der Anfang. Der Rahmen des Kyoto-Protokolls ist nicht statisch: alle 5 Jahre werden die Reduktionen der Emissionen neu festgelegt. Die Internationale Gemeinschaft könnte so nach und nach, falls sie sich dazu entschließt, immer verbindlichere Grenzen festlegen.
- Dieses Ziel bezieht sich auf die Emissionen von 1990, aber seit diesem Zeitpunkt sind diese weiter angestiegen. So gesehen ist die Reduktion um 5% bezogen auf 1990 im Jahr 2012 viel höher als wenn man sie auf die heutigen Konzentrationen beziehen würde. Wir sollten uns aber trotzdem fragen, inwieweit einige Länder ihre Vorgaben einzuhalten vermögen. Ein extremes Beispiel ist Spanien: 2002 lagen dort die Emissionen 39%⁶ über dem Wert von 1990!
- Erstmals in der Geschichte wurde ein internationales Umweltabkommen in Form einer rechtlich bindenden Zusage der unterzeichnenden Staaten verfasst, d.h. mit richtigen Sanktionen bei Nichteinhaltung.



Die durch die Balken gezeigte Entfernung vom Ziel stellt die Abweichung zwischen einem hypothetischen Ziel für das Jahr 2002 und den tatsächlich im Jahr 2002 vorhandenen Emissionen dar. Das hypothetische Ziel für das Jahr 2002 geht davon aus, dass die zulässigen Emissionen eines Mitgliedstaats sich zwischen dem Bezugsjahr und 2008-2012 in linearer Weise verändern. Die Entfernung vom Ziel wird in Prozentpunkten angegeben.

© Europäische Umweltagentur, 2004



Beitrag zur globalen Erwärmung von 1900-1999: Die Größe der Länder ist proportional zu deren CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe.

© Weltressourceninstitut

6) Der Abstand ist für die EU-15-Länder sehr viel geringer: 2002 lagen die Emissionen nur 1,4% über dem Niveau von 1990, vor allem bedingt durch die Zunahme im Straßenverkehr.

Von der Unterzeichnung des Protokolls im Jahr 1997 bis zu seinem Inkrafttreten am 16. Februar 2005 sind beinahe acht Jahre vergangen. Vor dem Inkrafttreten erfolgte die „Ratifizierung durch mindestens 55 Vertragsparteien des Übereinkommens (...), auf die mindestens 55% der gesamten Kohlendioxidemissionen (...) entfallen“. Am Widerstand von Australien und den Vereinigten Staaten (letztere sind für den größten Anteil der Emissionen verantwortlich) wäre dieses Ereignis beinahe gescheitert.

Im Mai 2002 ratifizierten die (zum Zeitpunkt der Kyoto-Konferenz) 15 EU-Mitgliedsstaaten, die 24,2% der weltweiten Emissionen verursachen, das Protokoll. Sie verpflichteten sich, ihre Emissionen durchschnittlich um 8% bezogen auf das Niveau von 1990 zu reduzieren. Einige Länder wie Deutschland und Dänemark gehen sogar noch viel weiter: sie verpflichteten sich 1998 im Alleingang, ihre Emissionen um 21% zu senken.

Inner- oder außerhalb des Kreislaufs?

Bei jeder Verbrennung wird CO₂ freigesetzt, doch führen nicht alle CO₂-Emissionen zwangsläufig zu höheren CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre: das hängt ganz davon ab, was verbrannt wird!

- Der Kohlenstoff aus allen pflanzlichen Brennstoffen (z.B. Holz) ist bereits im Kreislauf. Ursprünglich befand er sich in der Atmosphäre, aus der er durch Photosynthese von der Pflanze aufgenommen und „gespeichert“ wurde, und durch die Verbrennung kehrt er dann wieder dorthin zurück. Früher oder später gelangt der Kohlenstoff beim Absterben der Pflanze immer wieder zurück in die Atmosphäre, unabhängig davon, ob die Pflanze verbrannt wird oder nicht. Dieser Kohlenstoff befindet sich innerhalb des Kreislaufes. Diese Emission wird unter einer anspruchsvollen Bedingung als neutral bezeichnet: für jeden einzelnen verbrannten oder gefälltten Baum wird ein anderer nachgepflanzt.
- Im Gegensatz dazu befinden sich fossile Brennstoffe (Kohle, Öl und Erdgas) nicht mehr innerhalb des Kreislaufes. Sie bilden stabile Kohlenstoffvorräte, die über geologische Zeiträume akkumuliert wurden und stellen eine gewaltige Energiequelle dar – jedoch zu einem hohen Preis. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe gelangt CO₂ in die Luft, das dort seit Millionen von Jahren nicht mehr gewesen ist. Es ist so, als würde man einen Hahn aufdrehen, aus dem ununterbrochen immer größere Mengen eines Stoffes in einen geschlossenen und sehr komplizierten Kreislauf strömen, der sich bis zu diesem Zeitpunkt im Gleichgewicht befand, und diesen Hahn, allen Anzeichen einer Störung des Kreislaufes zum Trotz, immer weiter aufdreht.

Aus diesem Grund ersetzt der Wechsel von einem fossilen Brennstoff zu einem pflanzlichen (Biogas, Holz u.a.) einen CO₂-Ausstoß außerhalb des Kreislaufes durch einen CO₂-Ausstoß, der sich bereits innerhalb des Kreislaufes befindet. Dies setzt jedoch voraus, dass die Waldfläche dadurch nicht verkleinert wird. Von diesem Zeitpunkt an wird somit die Konzentrationen in der Atmosphäre nicht mehr beeinflusst. Das gleiche gilt auch für Häuser, wenn man den Beton oder die Ziegelsteine (für deren Herstellung viel Energie benötigt wird) durch Holz ersetzt (in dem Kohlenstoff gespeichert wird).

Wie können wir die Emissionen verringern?

Das ist *die* Schlüsselfrage, mit der unsere Gesellschaft durch die Herausforderung des globalen Wandels konfrontiert wird.

Der offensichtlichste Weg besteht darin, die Emissionen an ihrer Quelle zu verringern: Am saubersten ist diejenige Energie, die wir gar nicht erst verbrauchen. Am besten ist es, vermehrt öffentliche Verkehrsmittel, Fahrräder, erneuerbare Energien, Recycling usw. zu nutzen.

Eine andere Möglichkeit ist die Erschließung neuer Energiequellen und die Entwicklung sauberer Technologien, die die Energieeffizienz erhöhen und die Emission von Treibhausgasen reduzieren oder sogar ganz vermeiden: Blockheizkraftwerke, Biogas, Brennstoffzellen, Energiegewinnung aus Kernfusion usw.

Da man von allen Möglichkeiten Gebrauch machen sollte, gestattet das Kyoto-Protokoll auch die natürliche Kohlenstoffspeicherung durch die Aufforstung neuer Wälder. Der Antrieb liegt auf der Hand: bis wir technische Lösungen umsetzen können oder unser Verhalten ändern, um die Emissionen merklich zu verringern, sind alle anderen Lösungen, durch die wir Zeit gewinnen, äußerst willkommen.

Allerdings sind wir aus wissenschaftlicher Sicht nicht so ganz sicher, dass das funktioniert. Wir wissen, dass Bäume am

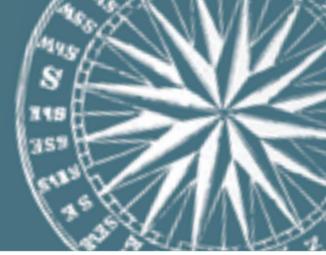
Höhepunkt ihrer Wachstumsperiode ein Mittel zur zeitweisen Speicherung von CO₂ in pflanzlicher Form sind. Aber wir wissen nicht genau, wie sich diese Speicherung über die Zeit verhält. Wie entwickelt sich die Kapazität zur Bindung von CO₂ über 10, 100 oder 300 Jahre hinweg? Wie lange können wir diesen „künstlich“ in Wäldern gespeicherten Kohlenstoff als tatsächlich dauerhaft gespeichert ansehen? Welche Waldtypen und welche Bewirtschaftungsformen fördern die Kohlenstoffspeicherung am besten?

Eine globale und ethische Infragestellung unserer Entwicklungsmodelle

Aus philosophischer Sicht könnten wir uns fragen, „ob die Menschheit wirklich das Ausmaß der Bedrohungen ihrer Zukunft erkannt hat?“

Das Kyoto-Protokoll für sich alleine ist eine symbolische Antwort: die ersten verbindlichen Vereinbarungen sind nicht nur viel zu geringfügig, um eine Wende herbeizuführen, selbst sieben Jahre nach ihrer Vereinbarung scheint es offensichtlich, dass einige Länder ihre Versprechen nicht einhalten werden können.

Am anderen Ende der Kette der Verantwortlichkeiten, d.h. auf individueller Ebene, ist man keineswegs weiter. In den entwickelten Ländern (die für den Großteil der Emissionen



verantwortlich sind) hat nur eine sehr kleine Minderheit ihre Lebens- und Arbeitsgewohnheiten ernsthaft umgestellt, um ihre Emissionen zu verringern.

Angespornt durch die Medien und Umweltbewegungen, hat das Bewusstsein in der Öffentlichkeit ohne Zweifel stark zugenommen, aber egal ob auf individueller oder kollektiver Ebene: die Realität zeigt, dass den Worten noch kaum Taten gefolgt sind.

Es gilt vor allem folgende Hürden zu überwinden:

- 1) Man kann den Klimawandel weder sehen noch riechen, und er hat auf kurze Sicht keine wahrnehmbaren Auswirkungen im Umkreis der unmittelbaren Verursacher. Außerdem meinen viele Leute angesichts des globalen Ausmaßes der Veränderungen, dass sie selbst als Individuen viel zu unbedeutend sind, um irgendetwas zu bewegen.
- 2) Das Ausmaß der Risiken ist ungewiss. Wie können wir heute etwas unternehmen, um uns vor den Problemen von morgen zu schützen, wenn wir noch nicht einmal vollständig wissen, wie diese Probleme aussehen werden? Zu diesem Thema haben sich, wie zu vielen anderen Themen (Gentechnik, Tierfutter, Atomenergie usw.), zwei entgegengesetzte Meinungen herausgebildet:
 - Einige denken, dass wir mit dem Experiment fortfahren können, *solange wir noch keine eindeutigen Beweise für Risiken haben.*
 - Andere denken, dass wir angesichts des Ernstes der auf uns zukommenden, nicht rückgängig zu machenden Risiken bald aufhören müssen, *da wir keinen Beweis dafür haben, dass es kein Risiko gibt:* das sind die Anhänger des Vorsorgeprinzips, das einen der Grundpfeiler des Kyoto Protokolls bildet.
- 3) In unserer Gesellschaft herrschen große Trägheit und Widerstandskräfte gegenüber Veränderung (durch die Industri lobby und die Bevölkerung gleichermaßen), die die ständige Spannung zwischen den eigenen und den Interessen aller zum Ausdruck bringen. Schließlich führt uns der Klimawandel zu der Frage der Armut und dem großen Ungleichgewicht zwischen Nord und Süd.
 - Der globale Wandel wird nur von einem Teil der Menschheit (den Industriestaaten) verursacht, aber alle haben unter den Auswirkungen zu leiden. Einige sehen darin einen Akt der Aggression gegen die Umwelt, den die entwickelten Länder gegen dem Rest des Planeten richten.
 - Die Armen und Benachteiligten werden von den schädlichen Auswirkungen des Klimawandels am stärksten betroffen sein, da sie die geringste Anpassungsfähigkeit besitzen.

Selbst wenn die Wissenschaft uns neue Antworten auf wichtige Fragen liefert, bleibt dies alles in allem eine Frage des Ausgleichs entgegengesetzter Bedürfnisse der Gesellschaft (z.B. der Bedarf an Energie und Mobilität gegenüber der Schonung von Ressourcen) sowie entgegengesetzter Interessen (die der heutigen Wirtschaft, die der Ökosysteme und der biologischen Vielfalt, die Interessen zukünftiger Generationen, der industrialisierten und der Entwicklungsländer, von Arm und Reich usw.). Diese Bedürfnisse und Interessen sind innerhalb der momentan vorherrschenden und nicht nachhaltigen Auffassung von Wachstum und Entwicklung alles andere als im Gleichgewicht. Über wissenschaftliche Belege hinaus erfordert diese schwierige Herausforderung ethische Maßstäbe, die unabhängig von Faktenwissen sind.

Die Herausforderung des globalen Klimawandels zwingt uns, unsere gesamte Beziehung zur Natur, zur Erhaltung von Gleichgewichten, zur Verteilung von Ressourcen und Wohlstand und zum Begriff von Wachstum, in Frage zu stellen. Mehr denn je sollte unter Entwicklung der Aufbau neuer weltweiter Bündnisse verstanden werden, anstatt an den Interessen bestimmter Gruppen, Länder oder Gruppen von Ländern festzuhalten. Werden wir als eine Menschheit auf einem Planeten gemeinsam in der Lage sein, Lösungen zu verwirklichen, die uns eine Anpassung an die Veränderungen ermöglichen, die wir bereits herbeigeführt haben und die uns erlauben, unsere Entwicklung fortzusetzen, ohne dabei das Gleichgewicht des Systems noch weiter zu gefährden?



Eisbärspuren – transarktische Expedition mit dem Schwedischen Eisbrecher Oden

© Toste Tanhua, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Deutschland

Die Kohlenstoffbilanz Europas verstehen und quantifizieren

Welche Rolle spielt der europäische Kontinent im globalen Kohlenstoffkreislauf?

Genauer: Wie sieht die europäische Kohlenstoffbilanz aus? Wie viel CO₂ wird freigesetzt und wie viel gebunden? Wie können wir die Unsicherheiten unserer Schätzungen dieser Bilanz auf lokaler, regionaler und kontinentaler Ebene reduzieren? Welche Mechanismen steuern den Austausch von CO₂ in der Biosphäre, und in welcher Weise werden sie durch Veränderungen der Landnutzung, der Bewirtschaftung und des Klimas beeinflusst? Sind die Bemühungen Europas, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, in der Atmosphäre nachweisbar?

Seit Januar 2004 mobilisiert CarboEurope hunderte europäischer Wissenschaftler zur Beantwortung dieser sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus politischer Sicht äußerst wichtigen Fragen. Türme, auf denen der Austausch von Spurengasen und Wasserdampf zwischen Ökosystemen und der Atmosphäre gemessen wird, fliegende Laboratorien, intensive Beobachtungskampagnen und eine neue Generation von Computermodellen: mit einem Budget von über 30 Millionen Euro (von denen die EU 16 Millionen Euro zur Verfügung stellt) über einen Zeitraum von fünf Jahren und 90 Einrichtungen aus 17 teilnehmenden Ländern ist CarboEurope derzeit die größte wissenschaftliche Initiative, die sich mit dem Kohlenstoffkreislauf befasst.



Die atmosphärische Überwachungsstation von Lutjeward an der Nordseeküste (Niederlande)

© Rolf Neubert, Zentrum für Isotopenforschung, Universität Groningen, Niederlande



SkyArrow, das kleinste Forschungsflugzeug der Welt, misst die Flüsse von CO₂ und Wasserdampf.

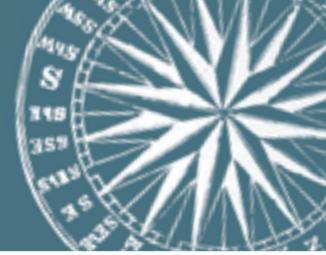
© Marcus Schumacher, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Deutschland

1. Was sind unsere Ziele?

Die Quantifizierung des Kohlenstoffumsatzes in Europa

Wie bewegt sich Kohlenstoff innerhalb der zahlreichen natürlichen und anthropogenen Systeme, die auf dem europäischen Kontinent zu finden sind? Wie ist die Kohlenstoffbilanz Europas? Wie ist die räumliche Verteilung des Kohlenstoffs und wie verändert sich diese Verteilung mit der Zeit? Wo befinden sich die Kohlenstoffvorräte und wie verändern sich diese?

Europa besitzt nicht gerade eine homogene Oberfläche. Die Einwohner sind sehr ungleichmäßig verteilt und es gibt viele klimatische und geographische Unterregionen. Hinsichtlich der CO₂-Flüsse ist Europa ein regelrechtes Mosaik von Quellen und Senken, die sich fortlaufend verändern, je nach Jahreszeit, meteorologischen Bedingungen, Landnutzung, Bewirtschaftung usw. Wir werden die Quellen und Senken dieses Mosaiks an deren zeitlicher Entwicklung von der lokalen bis zur kontinentalen Skala mit bisher unerreichter Genauigkeit bestimmen.



Ein besseres Verständnis für die Ursachen dieser Veränderungen, auf allen denkbaren Ebenen

Welche Mechanismen steuern den Kohlenstoffkreislauf in europäischen Ökosystemen und bestimmen dadurch unser Mosaik der Kohlenstoffflüsse? In welcher Weise beeinflussen menschliche Störungen, vor allem Veränderungen des Klimas und der Landnutzung, diese Mechanismen und damit die europäische Kohlenstoffbilanz? Können beispielsweise Zunahmen der Wachstumsrate in bestimmten Wäldern (in 50-jährigen Beständen bis zu 40% oder mehr) aufgrund des Anstiegs von CO₂ in der Atmosphäre beobachtet werden?

Auf diese Fragen wird CarboEurope auf lokaler, regionaler und kontinentaler Ebene neue Antworten für alle großen Kompartimente des Systems – Vegetation (Wälder, Grasländer, Feuchtgebiete, Ackerland), Böden, Atmosphäre usw. liefern. Wir werden vor allem versuchen, Folgendes zu verstehen:

- die Verteilung der CO₂-Flüsse zwischen den drei wichtigsten Pfaden des Austauschs: die „Atmung“ der Biosphäre in Form des Abbaus von organischem Material, Ernte und Feuer, die Aufnahme durch die Pflanzen und die Verbrennung fossiler Energieträger
- die Art und Weise, in der sich diese Verteilung in Raum und Zeit sowie entsprechend der Eingriffe des Menschen entwickelt.

Verstehen ist mehr als eine bloße Beschreibung: es bedeutet, die ökologischen Zusammenhänge und die hinter all diesen Mechanismen stehenden mathematischen Gesetzmäßigkeiten aufzudecken.

Der EU die wissenschaftlichen Werkzeuge zur Verfügung stellen, die für die Überprüfung der Einhaltung der Verpflichtungen im Rahmen des Kyoto-Protokolls notwendig sind

Um ihre Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen zu erfüllen, kann die EU Maßnahmen ergreifen, um die Emissionen an der Quelle zu reduzieren (durch eine Politik, die öffentliche Verkehrsmittel, saubere Industrien, erneuerbare Energien usw. begünstigt) und die natürliche Speicherung von Kohlenstoff zu erhöhen (v.a. durch die entsprechende Bewirtschaftung bereits existierender Wälder und durch Aufforstung). Können wir die Verringerung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, die aufgrund unserer Bemühungen zu erwarten ist, überhaupt messen? Wie können wir überprüfen, dass das Ziel der Reduktion der Emissionen wirklich erreicht wird, und dass die Methode, mit der wir das Ziel zu erreichen versuchen, wirksam ist?

CarboEurope stattet die EU mit einem Beobachtungssystem zur Erkennung von Veränderungen der Kohlenstoff-Vorräte und -Flüsse aus. Überdies werden wir im Vorgriff auf die Verhandlungen für die zweite vorgesehene Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2013 bis 2018) den Grundstein für ein genaues Anrechnungssystem für die Kohlenstoffvorräte und -flüsse legen, das in allen Ländern der Europäischen Union angewandt werden soll.



Der mikrometeorologische Messturm in Puechabon in Frankreich

© Jean-Marc Ourcival, CEFE, Montpellier, Frankreich

2. Worauf stützen wir uns?

CarboEurope setzt die Arbeit einer Reihe europäischer Projekte fort, die seit 1996 verschiedene Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs untersuchen. Diese Projekte haben die Entwicklung der wichtigsten Mess-Netzwerke gewährleistet, auf denen die Forschung heute basiert. Sie haben vor allem auch die Methode der Messung des Spurengasaustauschs zwischen Biosphäre und Atmosphäre über Mess-Türmen weiterentwickelt.

Diese Mess-Türme (flux towers) bilden gleichsam das Skelett von CarboEurope: sie messen ständig (24 Stunden am Tag) Kohlenstoffflüsse, d.h. die CO₂-Menge, die von einer bestimmten Messfläche in Abhängigkeit von der Tageszeit, den Wetterbedingungen, der Jahreszeit usw. aufgenommen oder freigesetzt wird.

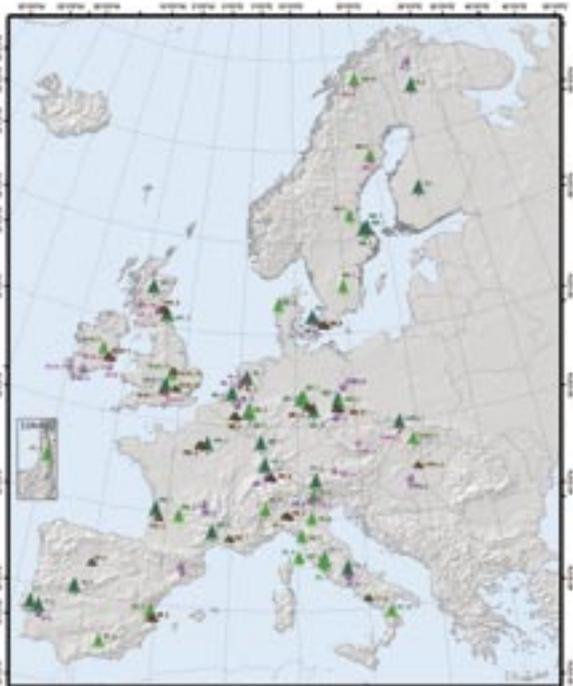
Auf diese Weise konnten wir vor kurzem eine wichtige Feststellung machen: die Wälder und Grasländer der EU nehmen natürlicherweise erhebliche Mengen Kohlenstoff auf, zwischen 7 und 11% der europäischen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Diese wichtige Feststellung führt uns jedoch wieder zurück zu den größten unbekanntesten Faktoren: was passiert mit dem Kohlenstoff, der von diesen natürlichen europäischen Senken aufgenommen wird? Wird er lang- oder nur kurzfristig gespeichert? Wie anfällig sind natürliche Senken gegenüber dem Klimawandel?

3. Wie gehen wir vor?

Eine Vielzahl an Methoden und Beobachtungsstandorten

Das Grundprinzip ist einfach: um die Kohlenstoffbilanz Europas so genau wie möglich abzuschätzen und die beteiligten Steuerungsmechanismen besser zu verstehen, müssen wir die Anzahl der Mess-Standorte vervielfachen, die Häufigkeit unserer Beobachtungen erhöhen und unsere Beobachtungen und Modellierungen enger miteinander verbinden. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl aufeinander abgestimmter Tätigkeiten:

- ein Netzwerk von etwa 100 Messstandorten, von denen jeder mit einem Turm zur Messung des Spurengasaustauschs zwischen Atmosphäre und Biosphäre ausgestattet ist.
- ein Netzwerk von etwa einem Dutzend sehr großer Türme, die bis zu 400 Meter hoch sind und den Spurengasaustausch für eine ganze Region (etwa 500 km² verglichen mit 1 km² bei normalen Türmen) „beobachten“ und in verschiedenen Höhen der unteren Atmosphäre Konzentrationen messen können.



Mess-Standorte und hauptsächliche Landnutzung
Wald Grausland Ackerland
Hauptstandort
Nebenstandort

Datenquelle:
USGS GTOPO30
GISCO Country Borders

CarboEurope-IP Mess-Standorte

© CarboEurope-IP

- ein Netzwerk von Bodenstationen in vom Menschen kaum beeinflussten Gegenden (auf Inseln oder alpinen Gipfeln), um natürliche Mechanismen vom durch den Menschen verursachten „Rauschen“ zu unterscheiden
- sechs Luftstützpunkte, von denen aus regelmäßig für den wissenschaftlichen Bedarf ausgerüstete Flugzeuge starten und Luftproben sammeln
- eine intensive regionale Kampagne, die alle verfügbaren Geräte und Technologien verbindet, um mit größtmöglicher Genauigkeit arbeiten zu können. Eine solche Kampagne fand 2007 in Frankreich in der Gegend von Bordeaux statt.
- ein ganzes Heer vernetzter Computer und Rechner, um Modelle zu entwickeln und Daten auszutauschen und zu integrieren.

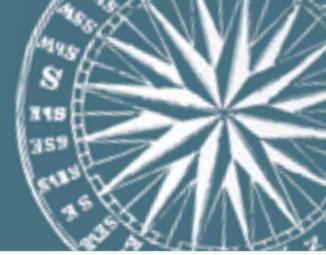
Diese Tätigkeiten ermöglichen es uns, den Kohlenstoffkreislauf des gesamten Kontinents so klar wie möglich zu beleuchten. Eines unserer größten Probleme ist, den Fokus nicht zu verlieren, wenn man den Maßstab immer weiter vergrößert.

Flüsse und Konzentrationen

Als Fluss bezeichnet man die Menge eines Stoffes (in diesem Fall CO₂ oder Kohlenstoff), der pro Zeiteinheit durch eine gegebene Querschnittsfläche hindurchtritt. Die hier betrachteten Flüsse sind in vertikaler Richtung entweder positiv oder negativ, je nach dem ob sie aufwärts (Emission) oder abwärts (Aufnahme) gerichtet sind. Beispiel: +7g Kohlenstoff pro Tag und Quadratmeter.

Konzentration bezeichnet den Anteil eines Gases (in diesem Fall CO₂) in einer Mischung (hier in Luft), und wird deshalb durch einen relativen Wert ausgedrückt. Zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort: z.B. am Ende des 20. Jahrhunderts betrug die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre etwa 370 ppm (parts per million).

Flüsse sind sowohl zeitlich als auch örtlich sehr begrenzt: in Abhängigkeit von der Art der Vegetation, der geographischen Breite, der Jahreszeit und den meteorologischen Bedingungen variieren sie ständig von einem Ort zum anderen und von einem Zeitpunkt zum nächsten. Im Gegensatz dazu sind die Konzentrationen in der Atmosphäre globaler und weniger variabel: CO₂ verteilt sich sehr schnell innerhalb der Atmosphäre. Die Konzentrationen sind daher gewissermaßen der Mittelwert aller Flüsse eines Kontinents. Allerdings bleiben einige sehr aufschlussreiche Unterschiede bestehen. Beispielsweise werden auf der Nordhalbkugel Gehalte beobachtet, die zwischen 3 und 4 ppm über dem Durchschnitt liegen: das liegt daran, dass die meisten Emissionen auf der Nordhalbkugel freigesetzt werden. Über großen Wäldern, den wichtigsten natürlichen Senken für CO₂, sind die Konzentrationen niedriger.



Je größer desto unschärfer...

Das Dilemma ist ganz einfach:

- Je kleiner der untersuchte Gegenstand, desto genauer und schärfer ist er sichtbar, aber desto weniger repräsentativ ist er.
- Und andersherum: Je größer der untersuchte Gegenstand, desto eher bekommt man ein Bild des Ganzen, aber eben weniger genau und unschärfer.

Unser Bestreben ist es daher, die Details immer klarer zu sehen – und das bei ständig zunehmendem Maßstab innerhalb des europäischen Kontinents. Da wir nicht ganz Europa mit Messtürmen im Abstand von einem Kilometer zupflastern können, müssen wir uns einen Trick ausdenken.

Das Schlüsselwort lautet Hochrechnung (Extrapolation), d.h. man entwickelt Methoden, um auf der Grundlage der wenigen verfügbaren genauen, aber lokalen Beobachtungen abzuleiten, was auf der Ebene des großräumigsten Maßstabs passiert. Dabei versucht man, sowohl räumlich als auch zeitlich möglichst wenige Fehler zu machen.

Der Trick, oder anders ausgedrückt, die methodologische Antwort von CarboEurope, besteht nun darin, möglichst viele Untersuchungsmethoden einzubeziehen: durch die Vervielfachung der Datenquellen, Mess- und Auswertungsverfahren können wir die größtmögliche Informationsmenge verarbeiten und so nach und nach immer genauere Trends identifizieren. Dieses Vorgehen wird als „Annäherung von verschiedenen Seiten“ (multiple constraint approach) bezeichnet.

...und je mehr man einbezieht, desto deutlicher (schärfer) wird das Bild

Diese Strategie der maximalen Vernetzung wirft drei beträchtliche wissenschaftliche Herausforderungen auf:

- 1) Die Einbindung von Maßstäben: mittels der Verknüpfung von Geräten, die viele Dinge auf kleinem Maßstab „sehen“ (zum Beispiel Türme zur Messung von Spurengasflüssen) mit solchen Geräten, die weniger Dinge auf einem größeren Maßstab sehen (große Türme, Flugzeuge und Satelliten), können wir die entsprechenden Daten vergleichen und folglich mit größerer Sicherheit extrapolieren.
- 2) Die Vernetzung aller Komponenten, in denen Austausch stattfindet – Wälder, Grasland, Ackerland, Feuchtgebiete, Boden, Atmosphäre, usw. durch Messstationen in den Hauptklimazonen Europas, vom Mittelmeer bis zum Polarkreis.

3) Die Vernetzung von Modellierungsverfahren:

- Die direkte Methode geht von „unten“ nach „oben“ vor. Auf der Grundlage dessen, was wir bereits über die beteiligten natürlichen Prozesse und tatsächlichen Spurengasflüsse an den wenigen Orten, an denen ein Turm steht, wissen, simulieren wir die Flüsse für ein ganzes Gebiet und berechnen anschließend die erwartete Auswirkung dieser Flüsse auf die globale CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Wir führen so lange eine Feinabstimmung des Modells durch, bis die simulierten Konzentrationen mit den gemessenen übereinstimmen.
- Die umgekehrte Methode geht von „oben“ nach „unten“ vor. Auf der Grundlage der Schwankungen der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen, gemessen über einem größeren Gebiet, lässt man das Modell andersherum laufen, um die Flüsse, die diese Schwankungen vermutlich verursacht haben, möglichst genau lokalisiert zu rekonstruieren.

Beide Methoden haben sowohl ihre Stärken als auch Schwächen; durch die Kombination beider Methoden erhält man ein realistischeres Bild. CarboEurope wird zum ersten Mal beide Methoden gleichzeitig verwenden, um wöchentlich bis monatlich Karten der europäischen Kohlenstoffbilanz mit einer Auflösung von 50 x 50 km zu erstellen.



Wartungsarbeiten am mikrometeorologischen Messturm im Nationalpark Hainich in Deutschland

© Bertram Smolny, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Deutschland

Die CO₂-Karte Europas: Wie können die Lücken gefüllt werden?

Eines der Hauptziele CarboEuropes, nämlich die Erfassung der CO₂-Flüsse Europas in Form einer Karte, zeigt deutlich, wie der Ansatz der „Annäherung von verschiedenen Seiten“ funktioniert, um die Kohlenstoffbilanz eines Kontinents zu erstellen.

Auf welche Informationen können wir uns beim Erstellen dieser Karte stützen?

- 1) Zum einen haben wir die Daten der „flux towers“: sehr lokalisierte Dauermessungen. Daraus erhalten wir eine Karte, die mit Ausnahme einiger weniger sichtbarer Punkte nahezu unbeschrieben ist. Für diese Punkte liegt jedoch eine Menge an Informationen vor.
- 2) Am anderen Ende des Maßstabes liefern uns Konzentrationsmessungen Informationen, die auf kontinentaler Ebene gelten, die uns jedoch sehr wenig über die Herkunft des gemessenen CO₂s sagen. Andererseits werden kleine Konzentrationsänderungen durch Schwankungen in den CO₂-Flüssen verursacht. Mit Hilfe der Konzentrationen können wir die Auswirkungen der Flüsse für ganz Europa in einer Karte darstellen. Aber deren Bild ist so verschwommen, dass es beinahe in eine einzige Farbe übergeht, die sich von Tag zu Tag nur wenig ändert. Veränderungen dieser „Farbe“, seien sie noch so klein, sind sehr wertvolle Hinweise.
- 3) Schließlich haben wir Daten von Satelliten, die sowohl lokalisiert als auch weitreichend sind: sie liefern genaue Informationen über jeden Punkt auf der Karte für den gesamten Kontinent. Allerdings ist das immer noch nicht genau die Karte der CO₂-Flüsse, die wir haben möchten (Satelliten können keine Flüsse erkennen). Satellitenbilder ergeben stattdessen eine Serie anderer detaillierter und lückenloser Karten für Erscheinungen, die in Beziehung zu den Flüssen stehen: zum Beispiel der Energieaustausch am Erdboden oder meteorologische Daten.

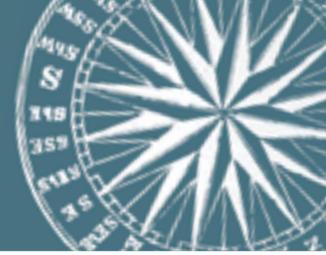
Indem wir diese drei Gruppen von Beobachtungen übereinander lagern, erhalten wir eine Karte die sowohl voller Lücken als auch voller Information ist. Zusammengefasst stellt sie eine Reihe von Gleichungen mit zahlreichen Unbekannten dar. Das Geheimnis, wie man Gleichungen mit vielen Unbekannten löst, besteht darin, diese untereinander aufzuschreiben und mit den Hinweisen aus einer Gleichung die Unbekannten der nächsten Gleichung zu verringern und so weiter. Je unterschiedlicher die Informationsquellen, desto mehr wird das Problem eingeschränkt, und desto größer wird die Chance, die Antworten zu finden. An dieser Stelle kommen unsere Computermodelle ins Spiel: diese sind wunderbare Werkzeuge zur Lösung komplizierter Gleichungen.

Einfach ausgedrückt: eine sehr genaue Karte, die zu 99% lückenhaft ist (aus den Messdaten der „flux towers“) + eine sehr verschwommene aber vollständige Karte (aus Konzentrationsmessungen) + sehr genaue Karten der Daten, die indirekt mit den CO₂-Austauschprozessen verbunden sind (von Satelliten) + gute Computermodelle + fünf Jahre an Messungen, Rechenoperationen, Fehlern und Annäherungen = am Ende des CarboEurope Projekts eine wunderbare Karte der CO₂-Flüsse für Europa!



In der atmosphärischen Überwachungsstation Lutfjewad an der Nordseeküste (Niederlande) werden zweimal wöchentlich CO₂-Proben genommen, wobei CO₂ in Natriumhydroxid gebunden wird.

© Rolf Neubert, Zentrum für Isotopenforschung, Universität Groningen, Niederlande



CARBOOCEAN

Verringerung der Unklarheiten über Senken und Kohlenstoffquellen im Meer



Arktischer Mond – transarktische Expedition mit dem Schwedischen Eisbrecher Oden

© Toste Tanhua, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Deutschland

Man schätzt, dass die Weltmeere gegenwärtig pro Jahr 20 bis 40% allen CO₂s aufnehmen, das durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre freigesetzt wird. Dadurch bewirken sie eine beachtliche Verzögerung der globalen Erwärmung. Aber sind es eher 20 oder eher 40%? Mit einem solchen Unsicherheitsbereich ist es schwierig, die Entwicklung des Klimas genau vorherzusagen.

Welche Menge an CO₂ genau wird absorbiert? Welche Austauschprozesse finden statt? Wie wird CO₂ in den Ozeanen transportiert und gespeichert? Welche Konsequenzen hat die CO₂-Anreicherung für das Wasser? Wie wird sich all das in einer Umwelt entwickeln, die in zunehmendem Maße durch den Menschen gestört wird?

Mit diesen wichtigen Fragen beschäftigen sich seit Januar 2005 40 Institutionen aus 25 Ländern in einem zweiten integrierten Forschungsprojekt der EU, nämlich CarboOcean. Über einen Zeitraum von fünf Jahren und mit einer EU Beteiligung von 14,5 Millionen Euro an den Gesamtkosten von ungefähr 30 Millionen Euro werden wir eine umfangreiche Flotte ozeanographischer Schiffe, Frachter, Bojen für Unterwasserexperimente usw. über die Weltmeere entsenden, um in einem in Europa noch nicht da gewesenen Umfang zu beobachten, zu analysieren und zu modellieren.

Das US-amerikanische, als Eisbrecher ausgelegte Forschungsschiff USCGC (United States Coast Guard Cutter) HEALY

© CarboOcean

1. Was sind unsere Ziele?

CarboOcean wagt sich an eine Aufgabe, die zugleich einfach und doch sehr hochgesteckt ist: mit verdoppelter Genauigkeit herauszufinden, wie viel CO₂ global von den Ozeanen gebunden wird, für den Atlantik und die Südlichen Ozeane sogar mit vierfacher Genauigkeit!

Um das zu erreichen (für einen Zeitraum von -200 bis + 200 Jahre), werden wir versuchen:

- den CO₂-Austausch zwischen der Luft und dem Meer mit unerreichter Genauigkeit räumlich und zeitlich zu beschreiben, ebenso wie die Entwicklung dieses Austauschs sowie zahlreicher damit verbundener Parameter (Kohlenstoffkonzentrationen im Wasser, Temperatur, Salinität, biologische Faktoren usw.) bei steigenden CO₂-Gehalten in der Atmosphäre. Wir beabsichtigen, jährliche Karten der CO₂-Konzentrationen im Nordatlantik zu erstellen, die CarboEurope dann zur Verfeinerung der terrestrischen CO₂-Karten verwenden kann.
- die zahlreichen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse besser zu verstehen, die den CO₂-Austausch zwischen Atmosphäre und Ozeanen und zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser steuern.

Schließlich wird CarboOcean dazu beitragen, zwei entscheidende Fragen zu beantworten, vor die die Gesellschaft durch den Klimawandel gestellt wird: „Was wird aus uns?“ und „Wieviel wird es uns kosten?“. Indem wir die CO₂-Menge, die von Ozeanen gespeichert wird, genauer abschätzen, werden wir mit größerer Genauigkeit vorhersagen können:

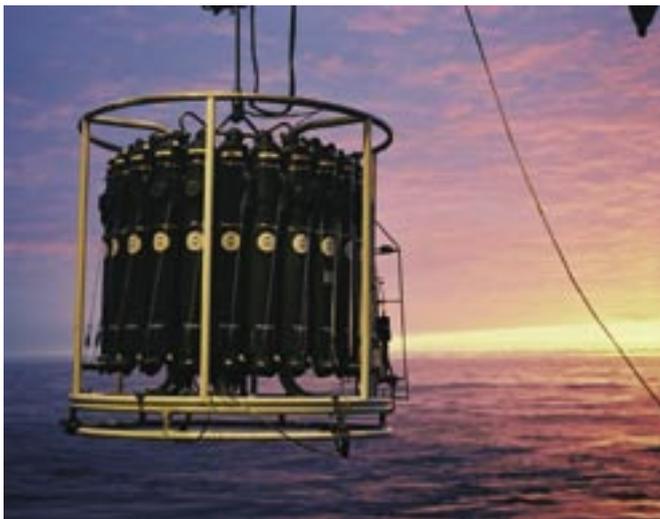
- wie groß das Ausmaß der Erwärmung bei verschiedenen CO₂-Emissionsszenarien ist
- wie die Effizienz verschiedener vorstellbarer Lösungsansätze (Verringerung der Emissionen, Anpassungsmaßnahmen usw.) im Vergleich zu ihren Kosten ist.



2. Worauf stützen wir uns?

CarboOcean wurde nach einigen nationalen und internationalen ozeanographischen Projekten gegründet, die während der vergangenen zehn Jahre schrittweise durchgeführt wurden, um ein globales Beobachtungsnetzwerk für marinen Kohlenstoff aufzubauen. Dieses globale Netzwerk, dessen europäischer Beitrag CarboOcean darstellt, ist unsere Hauptdatenquelle zur Erforschung des marinen Kohlenstoffkreislaufes.

So konnten neueste Studien zeigen, dass während des 19. und 20. Jahrhunderts (d.h. eines Großteils des industrialisierten Zeitalters) annähernd 30% des CO₂s aus anthropogenen Quellen (freigesetzt bei der Rodung von Wäldern und der Verbrennung von Kohle und Öl) durch die Ozeane gebunden wurden, insgesamt 118 Gigatonnen mit einem möglichen Fehler von +/- 19 Gt.



© Dorothee Bakker, Universität East Anglia, Norwich, Großbritannien

Aber während es möglich war, diese Zahl für die letzten zwei Jahrhunderte relativ genau zu bestimmen, wissen wir nicht genau, welche Mengen pro Jahr zwischen Luft und Meer ausgetauscht wurden: die CO₂-Aufnahme der Ozeane unterscheidet sich von Jahr zu Jahr. Je nach Jahreszeit, Jahr und in Abhängigkeit von noch wenig bekannten Phänomenen variiert der Austausch natürlicherweise sehr stark. Wir müssen diese natürlichen Schwankungen besser verstehen, wenn wir den Beitrag des Menschen erfassen wollen. Dies stellt derzeit eine der größten Herausforderungen für das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufes dar.

7) Quelle: Sabine et al. 2004

8) Etwa 118 Gt anthropogenen Ursprungs von insgesamt etwa 40.000 Gt Kohlenstoff im Meer, d.h. weniger als 0,3%; dagegen sind in der Atmosphäre etwa 165 Gt Kohlenstoff aus anthropogenen Quellen von insgesamt etwa 750 Gt, also 22%.

3. Wie gehen wir vor?

Genauso wie in CarboEurope müssen wir die Beobachtungen, Experimente und Modellierungen – mit dem Ziel der Beschreibung, des Verständnisses bzw. der Vorhersage – so eng wie möglich miteinander verknüpfen um voranzukommen.



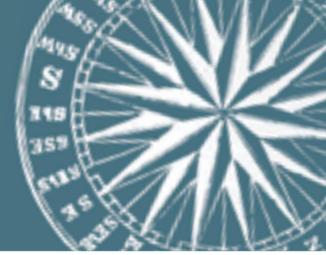
Einsatz des Schwerelots im Fahrwasser zwischen den Färöer und den Shetland-Inseln während der Expedition NO-Clim an Bord des Forschungsschiffes Hakon Mosby

© Dag Inge Blindheim, Bjerknes Zentrum für Klimaforschung, Bergen, Norwegen

Ein CO₂-Beobachtungssystem im Atlantik

Wie viel Kohlenstoff aus anthropogenen Quellen befindet sich in den Ozeanen? Allein die Erhebung dieser grundlegenden Daten ist eine ziemliche Herausforderung: Kohlenstoff ist nicht nur ungleichmäßig verteilt in Abhängigkeit von der geographischen Breite, den Meeresströmungen, der Jahreszeit usw. – hinzu kommt, dass der Anteil, der auf anthropogene Emissionen zurückzuführen ist im Vergleich zur gesamten Kohlenstoffmenge im Ozean extrem klein ist. Die einzige Möglichkeit, ein nicht zu unscharfes Bild von der Verteilung des Kohlenstoffs zu erhalten besteht deswegen darin, so oft wie möglich und an möglichst vielen Stellen Daten zu sammeln.

Seit etwa einem Jahrzehnt ermöglicht uns die Feinabstimmung automatisierter CO₂-Messgeräte, Handelsschiffe auszurüsten und deren regelmäßige Reisen zur Datenerhebung zu nutzen: wir nennen diese Linien „VOS“, für „voluntary



observing ships“ (freiwillige Beobachtungsschiffe). Entlang dieser Schiffrouten können wir dank der regelmäßigen Frequentierung der Linien zeitliche und örtliche Konzentrationsschwankungen verfolgen. Mit Computermodellen versuchen wir dann, diese Schwankungen auf den gesamten Ozean hochzurechnen und Schritt für Schritt eine Karte mit den Konzentrationen zu erstellen.

Um unsere Modelle mit mehr Daten zu versorgen und ihnen schärfere Grenzbedingungen zu setzen, machen wir uns auch ein Netzwerk aus Mess-Stationen zu Nutze (die uns sog. Zeitreihen liefern). Diese Stationen bestehen aus einer Art automatischer Bojen, die ununterbrochen dieselben Daten wie die Schiffe messen, nur eben immer am gleichen Ort. Nicht zuletzt können wir einen anderen Typ automatischer Boje, die wir Carioca nennen (von CARbon Interface OCEan Atmosphere – Austausch von Kohlenstoff an der Grenzfläche Ozean-Atmosphäre), in Meeresströmungen einsetzen und mehr als ein Jahr lang über Satellit ununterbrochen Kohlenstoffmessungen von der Meeresoberfläche übertragen.

VOS Linien, Zeitreihen und Carioca-Bojen bilden mehr oder weniger das marine Äquivalent zum terrestrischen Netzwerk der flux towers von CarboEurope: ein möglichst dichtes Netzwerk an Messpunkten, um die Datenlage für die Computermodelle zu verbessern.



Mario Hoppeme vom Alfred Wegener Institut in Bremerhaven bei der Entnahme einer Wasserprobe während einer Forschungsexpedition im südlichen Ozean auf der R.V. Polarstern.

© Dorothee Bakker, Universität East Anglia, Norwich, Großbritannien



Mit ihrem Schiff MSC Gina arbeitet die Abteilung Meereschemie der Fakultät für Meereswissenschaften an der Universität von Las Palmas (Spanien) (ULPGC-QUIMA) an einer neuen VOS-Linie von Großbritannien nach Kapstadt.

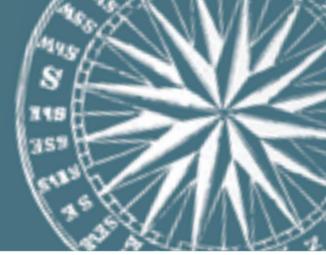
© Chemische Abteilung, Universität Las Palmas, Kanarische Inseln, Spanien

Diese zahlreichen Geräte sind Teil einer weltweiten Beobachtungskampagne, die vom Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Ausschuss der UNESCO koordiniert wird. Auf der Internet-Seite <http://ioc.unesco.org/ioccp/> kann man die Routen der VOS-Linien verfolgen und die Lage der festen Stationen, die die Zeitreihen aufnehmen, auf der ganzen Welt entdecken.

Die wesentliche Einschränkung der automatisierten Systeme besteht darin, dass sie nur an der Wasseroberfläche messen. Wir müssen jedoch auch wissen, was unter der Oberfläche passiert. Dazu werden wir einen neuen Gerätetyp testen, den „autonomen Profil-Schwimmer“, eine Art Mini-U-Boot, das Informationen in verschiedenen Tiefen sammelt und anschließend auftaucht, um die Daten per Satellit zu übertragen. Dann setzt es seinen Weg fort, um an anderer Stelle weitere Messreihen aufzunehmen.

Warum ist über den Kohlenstoffkreislauf im Meer viel weniger bekannt als an Land?

- Die Ozeane sind immer noch relativ unerforscht. Während an Land bereits Fortschritte erzielt wurden und weiterhin werden, gibt es im Vergleich dazu nur wenige Probenahmen in den Ozeanen, teilweise wegen ihrer riesigen Fläche (71% der Erdoberfläche), aber teilweise auch wegen ihrer schlechten Erreichbarkeit. Außerdem sind die Ozeane alles andere als homogen und viele Faktoren beeinflussen ihre Speicherkapazität für CO_2 : Je höher beispielsweise die Temperatur ist, desto weniger Gas kann in Wasser gelöst werden (Man kann das ganz einfach beobachten, wenn man im Sommer eine Sprudelflasche aus dem Kühlschrank nimmt: je mehr sich die Flasche erwärmt, desto mehr Bläschen werden sichtbar und desto mehr Gas wird freigesetzt). Aufgrund dieser Temperaturabhängigkeit können die kalten Gewässer der hohen Breiten große Mengen an CO_2 aus der Luft aufnehmen. Dieses Wasser sinkt ab, wandert langsam in Richtung Äquator und steigt schließlich in den Tropen wieder auf, wo es sich erwärmt und folglich das CO_2 wieder freisetzt. Das hat zur Folge dass:
 - a) die Kohlenstoffverteilung im Meer sehr ungleichmäßig ist. In Abhängigkeit von Strömungen, Temperatur, Salinität, biologischer Aktivität, Jahreszeiten und sogar von einem Jahr zum anderen schwankt die Konzentration von einem Punkt zum anderen, von einem Tag zum anderen und von einem Jahr zum nächsten, erheblich. Im Gegensatz dazu treten in der Atmosphäre Turbulenzen auf, die alles so gut vermischen, dass die durchschnittliche CO_2 -Konzentration über der ganzen Erde an einigen wenigen Mess-Standorten beobachtet werden kann.
 - b) Flüsse (CO_2 -Austausch zwischen der Luft und dem Meer) ganz und gar nicht homogen sind. Mancherorts und zu manchen Zeiten wird durch den Ozean CO_2 freigesetzt, andererseits und zu anderen Zeiten wird CO_2 gebunden. Die Gesamtsumme dieser Quellen und Senken liefert uns die grobe Schätzung, dass 20 bis 40% des CO_2 aus anthropogenen Quellen im Ozean gebunden werden. Wodurch die Entwicklung dieser Quellen und Senken je nach geographischer Breite, Jahreszeit, Jahr usw. bestimmt wird, verstehen wir noch nicht genau.
- Der Zugang zu den Ozeanen ist schwierig und bislang haben wir keine andere Möglichkeit als vor Ort zu messen, um Daten über gelöstes CO_2 zu erhalten. Bis heute gibt es keine Technologie, um diese Messungen aus dem All durchzuführen. Einsätze zur See sind immer teuer und gefährlich und erfolgen oft unter schwierigen Bedingungen, was die Möglichkeiten für Messungen und Versuche einschränkt.
- Die zeitlichen Maßstäbe übersteigen die eines Menschenlebens bei Weitem. Beispielsweise dauert es im Durchschnitt ein Jahrtausend, bis das Wasser einmal vollständig umgesetzt wird (durch die Kombination aus Wind- und Coriolis-Kraft und Dichteveränderungen im Meerwasser befindet sich der Ozean ständig in Bewegung um den Globus).
- Der Ozean ist ein komplexes System und steht in Verbindung mit den Kontinenten und der Atmosphäre, wobei eine Vielzahl eng verknüpfter biologischer, geologischer und chemischer Kreisläufe über zahlreiche Zeitskalen zusammenwirkt. Das ist ein kniffliges Ratespiel, bei dem jede Veränderung Ketten- und Gegenreaktionen mit verschiedensten Geschwindigkeiten und Maßstäben in Gang setzt. Viele dieser Kettenreaktionen sind noch immer nicht gut verstanden. Die Folgen der durch Menschen verursachten Störungen sind deshalb sehr schwer quantitativ zu bestimmen, vor allem, weil nicht alle in dieselbe Richtung führen: bestimmte Gegenreaktionen (Rückkopplungen) verstärken die ursprüngliche Störung, andere schwächen sie ab.



Versuchsreihen zur See, um die Prozesse des CO₂-Austauschs, -Transports und der -Speicherung in Ozeanen besser zu verstehen

Alle diese beschreibenden Daten liefern uns Informationen über das „was“, aber nicht über das „wie“ und „warum“. Was wird aus dem CO₂, nachdem es vom Meerwasser aufgenommen wurde? Um diese Frage aufzulösen, bleibt uns keine andere Lösung als die Segel zu hissen, Messungen zu machen und Proben zu nehmen, die keine Maschine durchführen bzw. nehmen kann.



An Deck der RRS Discovery überwacht Dorethee Baker (Universität East Anglia) die Arbeiten während der ersten CROZEX Expedition.

© Alan Hughes, Nationales Meeresforschungszentrum, Southampton, Großbritannien

Die großen Fragen sind folgende: Was passiert mit dem Kohlenstoff, der vom Oberflächenwasser aufgenommen wurde? Wie dringt er in den Ozean ein, und wie wird er in tiefere Wasserschichten verlagert? Vor allem im Nordatlantik, wo anthropogenes CO₂ am tiefsten nach unten verlagert wird, hoffen wir einige Antworten zu finden. Tatsächlich gibt es große Unstimmigkeiten zwischen Computermodellen und tatsächlich im Meer gemessenen Daten, sowohl was die Menge des im Atlantik aufgenommenen CO₂s angeht, als auch bezüglich der Regionen, wo Aufnahme und Speicherung stattfinden.

Wir suchen Antworten in Regionen, wo Meeresströmungen Oberflächenwasser in die Tiefe ziehen, d.h. an den Polen. Deshalb sind einige Expeditionen ins Grönländische Meer und die Barentssee geplant, um Veränderungen der Kohlenstoffgehalte des Wassers bis zum Meeresboden zu verfolgen.

Durch diese Expeditionen wird es uns auch möglich, Anzeichen von etwaigen Veränderungen in der weltweiten Meereszirkulation zu erkennen. Früher oder später wird die Erwärmung der Atmosphäre die Speicherung und den Transport von Wärme durch die Ozeane verändern, und diese Veränderungen in den Strömungsverhältnissen werden Rückwirkungen auf den CO₂-Austausch haben, die wir derzeit weder vorhersagen noch quantifizieren können.



Operation „Winch“ – transarktische Expedition mit dem Schwedischen Eisbrecher Oden

© Toste Tanhua, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Deutschland

Im Mittelmeer und der Nordsee: wie man Luft, Wasser und Erde zusammenbringt

Es gibt offenkundig keine drei getrennten Kohlenstoffkreisläufe für die Kontinente, die Atmosphäre und die Ozeane: es gibt nur einen einzigen Kreislauf auf der Erde, der aus zahlreichen Kompartimenten besteht, die ständig miteinander in Wechselwirkung stehen.

CarboOcean untersucht den Kohlenstofffluss ins Meer; CarboEurope den an Land. Wie kommen wir von einem so in einzelne Teile aufgespaltenen Bild zu einer ganzheitlichen Vorstellung dessen, was wirklich in der Natur vor sich geht? Eine Pilotstudie in der Nordsee und im westlichen Mittelmeer, die von beiden Projekten in Zusammenarbeit durchgeführt werden soll, wird es uns ermöglichen, die Gesamt-Kohlenstoffbilanz unter Berücksichtigung aller atmosphärischen, terrestrischen und marinen Komponenten aufzustellen. Erstmals werden wir versuchen, die Summe der Stoffflüsse zwischen Luft, Meer und Land experimentell aus *in situ* Messungen und nicht nur aus Computersimulationen zu bestimmen. Die Ergebnisse dieser Studie werden sehr nützlich sein, um diese zahlreichen Komponenten, die wir getrennt voneinander untersuchen, auf globaler Ebene besser zu verbinden.

Modellierung: Integration und Vorhersage

Wie kommen wir von den Rohdaten, die ständig von den vielen Geräten im Meer ausgegeben werden, zu einer Reihe brauchbarer Abbildungen und Karten? Genauso wie in CarboEurope, kann die Methode in einem Wort zusammengefasst werden: Integration und damit Modellierung.

Das Grundprinzip ist für die Ozeane das gleiche wie für die Kontinente: je mehr und je unterschiedlicher die Informationsquellen (VOS-Linien, Zeitreihen, Bojen, Fernerkundung usw.), desto genauer werden die Hochrechnungen und Abschätzungen und desto besser können wir:

- die Wirklichkeit genau abbilden und
- die Entwicklung dieser Wirklichkeit und ihrer verschiedenen Parameter in der Zukunft vorhersagen.

Modellierung stellt die größte wissenschaftliche Herausforderung für CarboOcean dar, weil sie viele Datenquellen sowie die physikalische (Strömungen, Relief des Untergrundes, Temperaturen) und biologische Komplexität des Ozeans berücksichtigen muss.

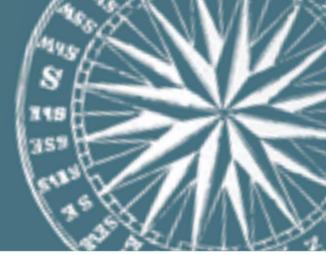
Die Ozeane - riesige Müllkippen für den Abfall aus der Atmosphäre?

Unter den vielen recht erfinderischen und praxisorientierten Lösungsvorschlägen für die Herausforderungen des Klimawandels stechen zwei besonders hervor; beide zielen darauf ab, die CO₂-Speicherung in den Ozeanen zu beschleunigen, um die Konzentration in der Atmosphäre zu senken:

- 1) Die Erhöhung der natürlichen Aufnahmekapazität der Ozeane durch die Düngung des Oberflächenwassers mittels massenhafter Ausbringung von Eisen, einem essentiellen Element für das Wachstum von Plankton. Dieses Phänomen tritt auch ganz natürlich unter dem Einfluss von Winden auf: riesige Planktonblüten werden regelmäßig gesichtet, wenn eisenreicher Sand aus der Sahara vom Scirocco auf die Meere geblasen wird. Allerdings könnte das so zeitweise gespeicherte überschüssige CO₂ ebenso schnell wieder in die Atmosphäre zurückkehren. Außerdem sind die ökologischen Folgen einer künstlichen Düngung der Meere in großem Maßstab nicht bekannt.
- 2) Eine konzentrierte CO₂-Lösung direkt in tiefe Meeresschichten einleiten. CO₂ würde am Entstehungsort der Emissionen in eine Reaktionskammer gepumpt, die Meerwasser und andere Reagenzien enthält, um eine CO₂-angereicherte Lösung herzustellen, die im Anschluss zum Meer transportiert würde und dort mit Rohren direkt in tiefere Schichten des Ozeans geleitet würde. Wie würden sich diese künstlich mit CO₂ angereicherten Schichten verhalten, die sich am Meeresboden verteilen? Welche physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse würden die fortschreitende Verdünnung dieser CO₂-reichen Wassermassen steuern, und was hätte das für Folgen?

Diese Art von Lösungsansätzen basiert auf einem sehr mechanistischem Bild unseres Planeten, verbunden mit der Überzeugung, dass es für alle Probleme eine technische Lösung gibt und mit der veralteten Vorstellung vom Meer als einer großen Mülltonne, die alles verdauen kann; in diesem Fall unseren CO₂-Abfall. Wir haben keine Ahnung von den langfristigen Folgen, außer dass die zunehmende Versauerung zweifelsohne eine Gefahr für Ökosysteme darstellt. Die Vorsicht sollte uns von der Anwendung solcher Methoden abhalten, aber es besteht das Risiko, dass einige Länder es dennoch tun, um damit ihre Verpflichtungen im Rahmen des Kyoto-Protokolls zu erfüllen.

Deshalb wird CarboOcean auch einige Experimente in kleinem Maßstab durchführen, um die Auswirkungen dieser Lösungsansätze besser zu verstehen, um so in der Lage zu sein, auf Augenhöhe mit deren potentiellen Befürwortern zu diskutieren und um die Entscheidungsträger mit dem Rüstzeug auszustatten, das sie für wohlbedachte Entscheidungen benötigen.



Forschung in Aktion

Zwei Feldbeispiele

1. Pianosa, eine wissenschaftliche Schatzinsel



Sonnenuntergang hinter dem Turm zur Kohlenstoffflussmessung in Pianosa

© Abteilung Biometeorologie, Nationaler Umweltforschungsrat (NERC), Swindon, Großbritannien

Von einem alten Gefängnis auf einer verlassenen Insel aus, weit entfernt von der toskanischen Küste, versuchen wir ein besseres Verständnis für den Kohlenstoffkreislauf in terrestrischen Ökosystemen des Mittelmeerraums zu gewinnen. Welchen Beitrag leistet dieser Teilkreislauf zum globalen Kohlenstoffkreislauf, und wie reagiert er auf Klima- und Landnutzungsänderungen? Welcher CO₂-Austausch findet zwischen Luft, Boden und Vegetation statt, je nach Jahreszeit und klimatischen Bedingungen und vor allem, wie können solche Austauschprozesse erklärt werden? Einige Antworten auf diese Schlüsselfragen werden derzeit im „Pianosa Lab“ aufgedeckt, einem Freiluft-Labor für Geowissenschaften im Mittelmeerraum, und einem Mess-Standort von CarboEurope.

Versteckt zwischen Korsika und Elba, unter drückender Hitze und von Macchie überwuchert, ist Pianosa eigentlich einfach nur eine verlassene Insel. Diese 10 Quadratkilometer große ehemalige Gefangeneninsel wurde nach der Schließung der Strafanstalt im Jahr 1992 verlassen, wird aber nach wie vor streng überwacht und ist für Touristen grundsätzlich tabu. Seit unseren ersten Einsätzen im Mai 2000 ist sie so etwas wie unsere eigene Schatzinsel geworden, da auf ihr die wissenschaftliche Besonderheit eines Mikro-Ökosystems beheimatet ist, das von jeglicher menschlicher Störung abgeschirmt ist.

Wir hoffen, auf Pianosa einige der fehlenden Teile des riesigen Puzzles des Kohlenstoffkreislaufs zu finden: diejenigen, die mit der mediterranen Trockenstrauchvegetation zusammenhängen. Die Klimaforschung arbeitet gegenwärtig intensiv auf regionaler Ebene. Während aktuelle Computermodelle mehr oder weniger gut wissen, wie man die Entwicklung des Klimas global nachbildet, geben sie die Realität auf kleinerem Maßstab oft nur sehr dürftig wieder und zeigen dadurch, wo die Lücken in unserem Wissen liegen.

Ein Hoch auf die unerklärten Phänomene!

Wie suchen wir auf einer Insel nach einem Schatz? Man könnte es in zwei Worten zusammenfassen: Beobachten und Experimentieren.

Beobachten bedeutet in diesem Zusammenhang, den Umsatz von Kohlenstoff auf der Insel so umfassend wie möglich zu überwachen. Mit diesem Ziel vor Augen haben wir in der Mitte der Insel einen „flux tower“ aufgestellt, um Wetterdaten (Luftdruck, Feuchte, Wind, Regen, Helligkeit usw.) und CO₂-Flüsse aufzuzeichnen, d.h. die Menge an CO₂, die die Insel als Ganzes über die Zeit freisetzt oder aufnimmt. Die Messungen werden kontinuierlich durchgeführt und liefern uns so das ganze Jahr über Daten zu CO₂-Flüssen der Insel. Deshalb wissen wir zum Beispiel, dass die Insel insgesamt eine Senke für CO₂ darstellt; sie nimmt mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf als sie wieder freisetzt.

Wenn wir verstehen wollen, was die Turmmessungen uns sagen, hilft uns Experimentieren weiter. Obwohl der Turm uns verständliche Daten über den CO₂-Austausch auf Pianosa liefert, erfahren wir von den Messungen allein nichts über die Ursprünge dieser Austauschprozesse, d.h. wodurch und wie viel CO₂ freigesetzt wird, wer wie viel CO₂ aufnimmt, wann und warum? Das ist wie eine ganze Folge von Rechnungen, von denen wir nur das Endergebnis kennen, aber nicht die zugrunde liegenden Zahlen und Formeln. Unser herausragendes Ziel ist es aber, zum Modellieren in der Lage zu sein, d.h. diese Rechnungen in einem Computerprogramm nachzustellen und damit das Verhalten mediterraner Ökosysteme zu simulieren, indem wir basierend auf dem Szenario Pianosa hochrechnen.

Deswegen können wir den vom Turm gemessenen Fluss nicht in einem Modell simulieren, solange wir nicht wissen, warum er sich auf eine bestimmte Art entwickelt. Um das „Warum?“ zu klären, müssen wir die Reaktionen aller beteiligten Elemente (Bäume, Boden, Wiesen usw.) auf jahreszeitliche Schwankungen, Wetterveränderungen usw. miteinander verbinden. Kurz gesagt: es reicht nicht aus, die Flüsse und

9) Zusammenschluss von neun italienischen Laboratorien und vier italienischen Universitäten, die von IBIMET in Florenz koordiniert werden.

ihre Schwankungen zu bestimmen, wir müssen auch deren Ursachen beschreiben. Das ist das Herzstück der Forschung, der eigentliche Zweck aller Messungen und Versuche, die im Feld durchgeführt werden.

Beobachtungen und Messungen ergänzen sich. Und am meisten reizt es uns, etwas zu beobachten, das wir nicht verstehen, denn auf diese Art erweitern wir unseren Wissenshorizont, bestimmen die Richtung unserer Forschung und die Fragen, die untersucht werden müssen. Eine unerklärte Erscheinung ist für uns nichts Übernatürliches, sondern ganz einfach ein Phänomen, das wir noch nicht erklären können.



Wussten Sie, dass der Boden atmet? Mit dieser „Bodenkammer“ messen wir, wie viel CO_2 vom Boden auf Pianosa freigesetzt wird.

© Abteilung Biometeorologie, Nationaler Umweltforschungsrat (NERC), Swindon, Großbritannien

Gewaltige Kohlenstoffemissionen im Hochsommer

Mit wissenschaftlichen Kuriositäten wurden wir bisher in Pianosa verwöhnt. In den Daten, die vom Turm nach Sommergewittern aufgezeichnet wurden, entdeckten wir eine sehr seltsame Unregelmäßigkeit. In der Regel ist der Fluss vor Regen positiv: die Insel setzt CO_2 in die Atmosphäre frei. Das ist für gewöhnlich ein Hinweis auf Wassermangel. Während der Sommerdürre schützen sich Pflanzen, indem sie ihre Spaltöffnungen schließen, wodurch die Photosynthese unterbrochen wird und damit auch die Aufnahme von CO_2 . Andererseits atmen die Pflanzen natürlich weiterhin, solange sie leben, d.h. sie emittieren CO_2 . Während und unmittelbar nach einem Gewitter wird ein Fluss von Null gemessen, und

man nimmt an, dass die Pflanzen, nachdem sie ihren Durst gestillt haben, die Photosynthese wieder aufnehmen. Man erwartet sogar, dass sie in den folgenden Stunden mehr CO_2 als gewöhnlich aufnehmen.

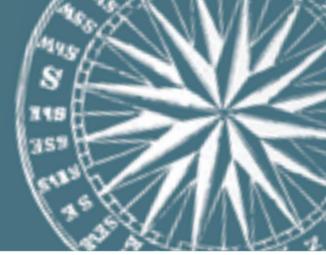
Anstatt jedoch mehr CO_2 aufzunehmen, wie es logisch wäre, beginnt die Insel 12 Stunden nach dem Regen, plötzlich außergewöhnliche Mengen zu emittieren: zehn mal so viel wie vor dem Wolkenbruch! Danach, einige Tage später, kehrt der Fluss langsam zu einem normalen Niveau zurück. Als wir das zum ersten Mal beobachteten, dachten wir, unsere Geräte seien defekt. Aber diese natürlichen CO_2 -Emissionen nach den Sommerregen traten jedes Mal wieder auf. Das war eine gewaltige Überraschung, deren Bedeutung wir nicht für möglich gehalten hätten: wir haben berechnet, dass diese Emissionen die durchschnittliche Gesamtmenge, die jedes Jahr auf Pianosa gebunden wird um 10 bis 15 % verringern.

Plötzlich auftretende CO_2 -Emissionen, die gegen die Naturgesetze verstoßen (zumindest gegen die, die wir kennen) und die unsere Computermodelle verzerren (oder eher deren Lücken hervorheben): Wer ist beteiligt? Warum passierte das jedes Mal ausgerechnet 12 Stunden nach dem Regen und nicht schon nach 6 Stunden oder erst nach 24 Stunden? Wir müssen den Schuldigen finden und die beteiligten Mechanismen aufdecken. Der Turm hat uns auf den richtigen Weg gebracht. Jetzt ist es an der Zeit, mit unseren Untersuchungen zu beginnen und an den Stellen, wo CO_2 -Austausch stattfindet, nach Hinweisen zu suchen: an Blattoberflächen, in der unmittelbaren Umgebung von Wurzeln, im Boden usw.

Welche Auswirkungen hat das Wetter auf die Bodenatmung? Welchen Anteil an den gemessenen CO_2 -Flüssen trägt die Vegetation und welche Pflanzen haben das zusätzliche CO_2 ausgeatmet, das wir in der Luft messen? Was passiert mit dem Kohlenstoff im Boden? Viele solcher Fragen werden unsere verschiedenen Teams für viele Jahre der Schatzsuche beschäftigen.

Mehr zu Pianosa:

http://www.ibimet.cnr.it/biosphere/File_progetti/01_pianosa_lab.htm



2. 'Mesokosmen': Experimentelle Mini-Meere zur Simulation der Zukunft

Zwischen Mikro- und Makrokosmen liegen Mesokosmen. Es ist unmöglich, im makroskopischen Maßstab vergleichende Forschung zu betreiben (dazu bräuchte man eine zweite Erde, auf der man skrupellos das Klima manipulieren könnte). Der Maßstab von Laborexperimenten ist in der Regel zu mikroskopisch, um die Ergebnisse auf den globalen Maßstab übertragen zu können. Mit Hilfe von Mesokosmen, wörtlich „mittelgroße Welten“, können wir jedoch die Reaktion der Ozeane untersuchen.

Von der Espegrend Marine Biological Station in der Nähe von Bergen in Norwegen aus arbeiten wir mitten in einem Fjord auf einem speziellen Floß. Auf dem Floß beherbergt eine Holzhütte ein Labor, das mit neun großen Plastikzelten verbunden ist. Die Zelte sind rund um das Floß im Wasser versenkt und voll gepackt mit Schläuchen und Sensoren. Wie bei Eisbergen ist der Teil unter Wasser am größten: unter diesen Zelten erstreckt sich jeweils eine 10 Meter lange Wassersäule, die vorsichtig in Plastik eingepackt ist, durch das nur Licht dringen kann. So sind diese Säulen gut vom Rest des Fjords abgetrennt, aber trotzdem „in situ“.



Das Mesokosmen-Floß

© Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Deutschland

Zusammen bildet diese Anordnung unseren Mesokosmos, in einem Maßstab, der einfach durch den Menschen gehandhabt werden kann, und dennoch groß genug ist, wenn man nur an die Millionen kleiner Einwohner denkt: das Plankton, das wir untersuchen wollen.

Die Luft wird im ersten Mesokosmos künstlich bei einem CO₂-Gehalt von 370 ppm gehalten (d.h. der momentanen Umgebungskonzentration), in drei anderen bei 750 ppm (was der für 2100 erwarteten Konzentration entspricht, wenn wie bisher weiter emittiert wird) und bei 1150 ppm in den verbleibenden drei (für 2150 erwartete Konzentration). Auf diese Weise können wir besser beobachten, was in der realen Welt bis 2100 bzw. 2150 wahrscheinlich passieren wird.

CO₂-Aufnahme durch die Ozeane: ein Fluch für marine Lebewesen?

Das Prinzip des Versuchs ist einfach. Am ersten Tag geben wir eine Nährstoffmischung in jeden Mesokosmos, um eine Phytoplanktonblüte zu erzeugen und anschließend untersuchen wir fünf Wochen lang die Auswirkungen auf die größtmögliche Anzahl von Parametern. Dann vergleichen wir die drei Mesokosmostypen.

Die Ergebnisse unserer Mesokosmosexperimente bestätigen, was wir in vorangegangenen Laborversuchen gesehen haben: was sich als Segen für das Klimasystem darstellt, erweist sich möglicherweise als Fluch für marine Lebewesen: die Aufnahme großer Mengen anthropogenen CO₂ durch die Ozeane.

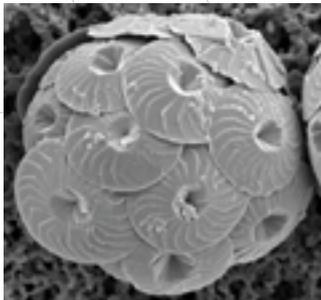
Viele marine Organismen verwenden vorwiegend Kalziumkarbonat zum Aufbau ihrer Skelettstrukturen. Korallen, Schnecken, Muscheln, Seeigel und Seesterne sind marine Kalkbildner, die wir gut kennen. Weil aber die Azidität des Meerwassers mit der Aufnahme von CO₂ zunimmt, sinkt die Konzentration der Karbonationen im Meerwasser, was für kalkbildende Organismen einen höheren Energiebedarf zum Aufbau ihrer kalkhaltigen Strukturen bedeutet.

Halb so viel Kalkbildung in künstlich mit CO₂ angereicherten Mesokosmen

In unseren Mesokosmen leben weder Muscheln noch Seeigel, sondern eine Planktonart namens „Coccolithophora“, eine einzellige Mikroalge, die von einer dichten Schicht aus Kalkplättchen (Coccolithen) bedeckt ist. Obwohl sie aufgrund ihrer winzigen Größe (100-mal kleiner als der Kopf einer Stecknadel) mit bloßen Auge nicht sichtbar sind, sind sie die produktivsten kalkbildenden Organismen unseres Planeten.

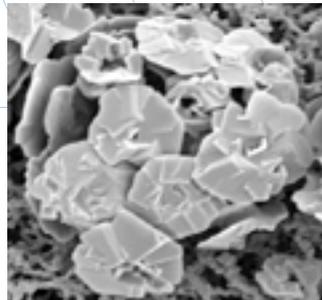
In unseren Mesokosmen wurde die Kalkbildung der Coccolithophora bei hohen CO₂-Gehalten fast um die Hälfte im Vergleich zu niedrigen CO₂-Konzentrationen verringert. Laborversuche zeigen vermehrte Missbildungen und unvollständige Abdeckung der Zellen bei Coccolithophora, die bei erhöhten CO₂-Konzentrationen wachsen.

Diese beiden Bilder zeigen sehr deutlich das Ausmaß der Störung:



Bei momentaner CO₂-Konzentration

© Markus Geisen, Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, Deutschland



Bei für 2100 erwarteter CO₂-Konzentration

© Markus Geisen, Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, Deutschland

Aber obwohl uns diese Ergebnisse vor möglichen negativen Auswirkungen der Versauerung der Ozeane warnen, werfen sie mehr Fragen auf, als sie uns beantworten. Was bedeuten verringerte Kalkbildung und vermehrte Missbildung für die Fortpflanzungsfähigkeit der Coccolithophora? Und werden die Coccolithophora, falls sie mit der Versauerung der Ozeane nicht fertig werden, durch andere nicht-kalkbildende Gruppen ersetzt? Was bedeutet das für das Ökosystem?

Vermutlich werden marine Ökosysteme anfälliger werden

Davon abgesehen stellen wir auch die Stichhaltigkeit unserer Ergebnisse in Frage. Die genetische Vielfalt von marinem Phytoplankton ist, selbst innerhalb ein und derselben Art, immens. Und aus statistischen Gründen werden aller Wahrscheinlichkeit nach auch die im Ozean häufigsten genetischen Stämme in unserem Mesokosmos vorkommen. Sind irgendwelche von den derzeit im Ozean vorhandenen, aber weniger häufigen Stämmen, besser in der Lage, mit den hohen CO₂-Konzentrationen umzugehen? Außerdem müssen wir bedenken, dass wir die CO₂-Gehalte in unseren Experimenten aus praktischen Gründen üblicherweise relativ plötzlich erhöhen. In der Realität wird es 100 Jahre dauern, bis die Gehalte aus unseren Versuchen erreicht sein werden. Bei langsam wachsenden Organismen wie Korallen wird dies keinen großen Unterschied machen, aber Coccolithophora mit einer Lebensdauer von ein bis zwei Tagen können in 100 Jahren bis zu 30.000 Generationen durchlaufen. Ist das ausreichend viel Zeit, um sich an zunehmend saurere Ozeane anzupassen?

Es wäre verfrüht, Vorhersagen zu den Folgen der Versauerung der Ozeane zu treffen. Dennoch können wir mit relativ großer Sicherheit sagen, dass marine Ökosysteme vermutlich an Widerstandskraft verlieren und demzufolge anfälliger gegenüber anderen Umwelteinflüssen, wie der Klimaerwärmung, der Fischerei und der Verschmutzung, werden. Die Verringerung der CO₂-Emissionen in die Atmosphäre scheint der einzige praktikable Weg zu sein, um das Risiko irreversibler Schäden in marinen Ökosystemen zu minimieren. Neben dem Wandel des Klimas ist die Versauerung der Ozeane erwiesenermaßen ein triftiger Grund zum schnellen Handeln und zur raschen Entwicklung alternativer Energiestrategien.

Ein herzliches Dankeschön an Maria-Francesca Cotrufo und Ulf Riebesell, dass sie uns in Pianosa bzw. Espesgrend aufgenommen haben.

Wenn Sie sich für das Mesokosmos-Experiment interessieren:

- Englische Beschreibung des Projektes (pdf) <http://www.carboocean.org/Menue/News/Mesocosm.pdf>
- Webseite des Experiments: <http://spectrum.ifm.uni-kiel.de/peece/>
- Internettagebuch der Forschergruppe aus Mainz: http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Diaries_from_the_field/CarboOcean_4ps.html



Anmerkungen



Anmerkungen



CarboSchools Broschüre für Schulen

Deutsche Fassung: Oktober 2007

Kostenlose Verwendung und Vervielfältigung zu Bildungs- und nicht-kommerziellen Zwecken

Koordination Generaldirektion JRC: Günther Seufert

Text, Koordination: Philippe Saugier (saugier@netcourrier.com)

Entwurf des CarboSchools Logos: Rona Thompson

Korrekturen am Design: Yvonne Hofmann

Durchsicht der englischen Fassung:

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

Übersetzung ins Deutsche:

Angelika Thuille

Diese Veröffentlichung wird von der Generaldirektion der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission, CarboEurope und CarboOcean finanziert. Das Anliegen der GFS ist die wissenschaftliche und technische Unterstützung für die Konzeption, Entwicklung, Umsetzung und Begleitung der Politik der EU. Als wesentlicher Bestandteil der Europäischen Kommission bildet die GFS den Bezugspunkt für wissenschaftliche und technische Anliegen in der Europäischen Union. Durch die enge Verbindung zur Entscheidungsfindung dient sie dem gemeinsamen Interesse der Mitgliedsstaaten unabhängig von einzelnen, privaten oder nationalen Interessen.

Weitere Informationen unter:

www.carboschools.org

www.carboeurope.org

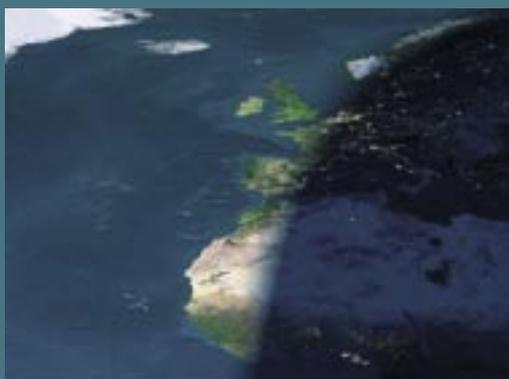
www.carboocean.org

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



An Bord des Segelschiffes Carola bereiten sich Schüler des Städtischen Gymnasiums in Bad Segeberg auf ihre Reise zur Beprobung mariner Flora und Fauna in der Ostsee vor, als Teil des NaT-Arbeitsprojekts des Leibniz-Instituts für Meereswissenschaften in Kiel.

© Avan Antia, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel, Deutschland



Wir, d.h. einige hundert Wissenschaftler von CarboEurope und CarboOcean (zwei Forschungsprojekten der EU zum Klimawandel, die zwischen 2004 und 2009 stattfinden), beteiligen uns am großen Vorhaben, Fortschritte im Wissen über das System Erde zu machen und zu einem besseren Verständnis darüber zu gelangen, wie dieses System vom Menschen durch die Freisetzung enormer Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre gestört wird.

Mit der Initiative von CarboSchools möchten wir Partnerschaften zwischen Wissenschaftlern und Lehrern an weiterführenden Schulen vermitteln, um die Aufmerksamkeit Jugendlicher für die Folgen des Klimawandels auf lokaler und globaler Ebene zu schärfen. Wir möchten sie ermutigen, die wissenschaftliche Forschung zu entdecken und lokal aktiv zu werden, um die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren.

Diese Broschüre, die Lehrern und allen an diesem Thema Interessierten als Referenzquelle vorgeschlagen wird, versucht einen Überblick über die Forschung zum globalen Klimawandel zu geben: Was sind die Hauptfragen? Wie gelangen wir durch wissenschaftliche Forschung zu neuem Wissen? Welchen Beitrag leistet die europäische Forschung derzeit zur Beantwortung der drängenden Frage des Kohlenstoffkreislaufes?

Begleiten Sie uns bei einem großen wissenschaftlichen Abenteuer, teilen Sie unsere Faszination für den Planeten und überlegen Sie sich Lösungen für die Zukunft!