



Es war eines der spektakulärsten Experimente aller Zeiten: Im September 1991 zogen sich vier Frauen und vier Männer in der Wüste Arizonas in ein gigantisches, von Menschenhand erbautes Ökosystem zurück. Auf einer Fläche von knapp zwei Fußballfeldern enthielt dieses einen Regenwald, eine Wüste, eine Savanne, eine Marschlandschaft, einen Ozean, landwirtschaftliche Felder und einen Wohnbereich für die Forscher. Bis zu 23 Meter hohe, futuristische Glaskuppeln und

chemische und sozioökonomische Ansätze miteinander. Die Forscher untersuchen, wo und in welchem Umfang die verschiedenen Stoffe gespeichert und wie die Stoffflüsse zwischen den einzelnen Bereichen gesteuert werden. Die zahlreichen Ergebnisse aus der Freilandforschung werden schließlich dazu verwendet, hochkomplexe Rechenmodelle aufzustellen, die die Vorgänge auf der Erde simulieren und Antworten auf eine der dringendsten Fragen liefern sollen: Wie groß ist



Gesucht: Element Nr. 6 – warum Forscher nach Kohlenstoff fahnden

Zentimeter dicker Stahl im Boden schirmten die so genannte BIOSPHERE II hermetisch vom Rest der Welt ab. Das Ziel der Forscher: Sie wollten zwei Jahre lang in dem künstlichen Ökosystem leben – ohne Zufuhr von Luft oder Nahrung von außen. Doch die Natur machte den Forschern einen Strich durch die Rechnung.

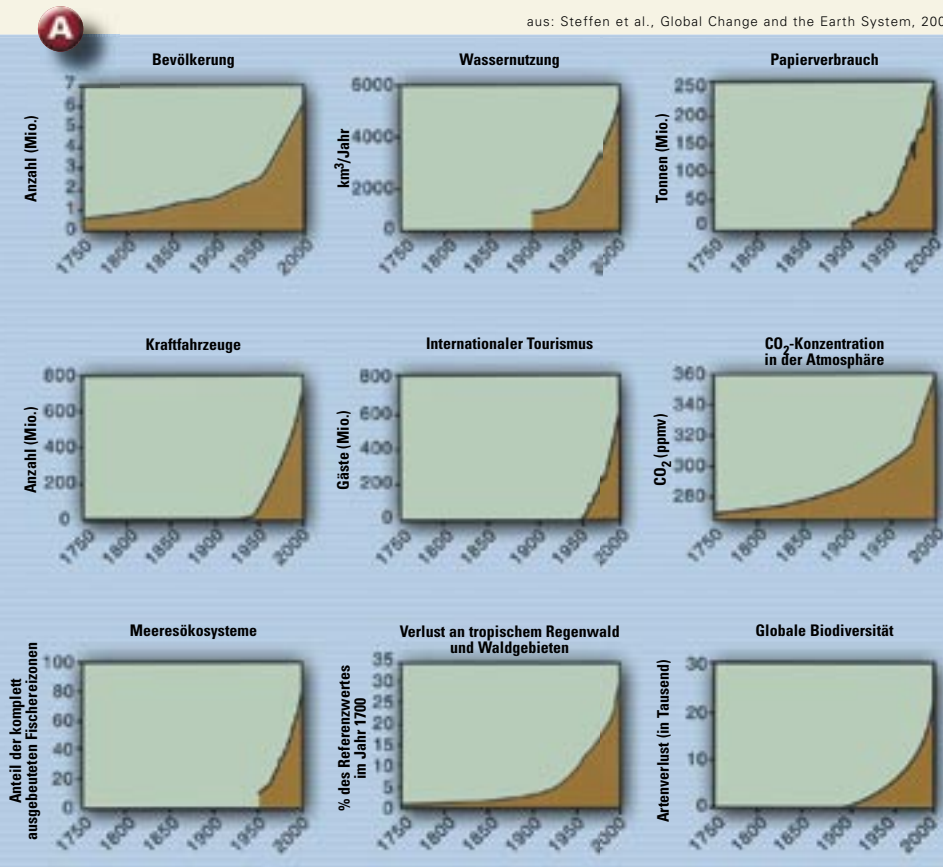
Anders als es Berechnungen vorausgesagt hatten, gab es in der BIOSPHERE II schon nach wenigen Wochen nicht mehr genügend Sauerstoff. Damit die acht eingeschlossenen Wissenschaftler überleben konnten, musste das lebenswichtige Gas von außen zugepumpt werden. Trotzdem starben nach und nach Insekten, Vögel, Frösche und viele andere Tiere und Pflanzen. Ameisen und Schlingpflanzen wurden dagegen zur Plage. Nach zwei Jahren verließ die Mannschaft erschöpft und zerstritten den Glaskuppelbau. Das 200-Millionen-Dollar-Experiment war gescheitert; den Wissenschaftlern war es nicht gelungen, eine Miniaturausgabe der Erde nachzubauen. Der Grund: viele natürliche Wechselwirkungen und lebenswichtige Zyklen wie der Sauerstoff- oder **Kohlenstoffkreislauf** sind bisher nicht ausreichend erforscht.

DER FAKTOR MENSCH

Am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena befassen sich die Wissenschaftler mit den komplexen Stoffkreisläufen zwischen der Landoberfläche, der Atmosphäre und den Meeren und verknüpfen dabei biologische, geowissenschaftliche, physikalisch-



◀ Montagearbeiten an einem Messturm in Thüringen.



▲ Durch Landwirtschaft, Industrieproduktion, Verkehr und Tourismus greift der Mensch in die globalen Stoffkreisläufe ein und beansprucht die natürlichen Ressourcen in unterschiedlichem Ausmaß.

→ der Einfluss des Menschen auf die natürlichen Stoffkreisläufe und welche Konsequenzen ergeben sich daraus?

Zwei Parameter machen den Einfluss des Menschen aus: Zum einen die stetig wachsende Bevölkerung, die inzwischen die 6-Milliarden-Grenze überschritten hat. Zum anderen der Verbrauch an natürlichen Ressourcen (Abb. A). Etwa 50 Prozent der Landfläche sind durch den Menschen verändert worden, mit signifikanten Folgen für die natürliche Vegetation und Artenvielfalt, die Bodenstruktur und -biologie sowie das Klima. Mehr als die Hälfte des globalen Süßwassers wird für menschliche Bedürfnisse eingesetzt. Die industrielle Fixierung von Stickstoff (N₂) übersteigt mittlerweile die natürliche N₂-Fixierung. Und die Konzentration der Klima-relevanten Gase nimmt zu. Seit Beginn der Industrialisierung hat sich die Konzentration an Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre um ein Drittel erhöht. Große Mengen CO₂ entstehen insbesondere durch die Verbrennung von Öl, Gas und Kohle, die allesamt Kohlenstoff beinhalten.

Tatsächlich betrüge die durchschnittliche Temperatur auf der Erde lediglich Minus 18°C, würden nicht Wasserdampf, Kohlendioxid und Spurengase in der Troposphäre

einen Teil der vom Boden abgegebenen Wärmestrahlung absorbieren und wieder reflektieren. Die Wissenschaftler bezeichnen das als **natürlichen Treibhauseffekt**, denn wie die Glasscheiben eines Treibhauses fängt die Schicht der Klimagase Sonnenenergie ein, indem sie das Sonnenlicht durchlässt und die Infrarot-, also Wärmestrahlung zurückhält. Mit zunehmender Menge an Treibhausgasen verlässt bei konstanter Bodentemperatur jedoch immer weniger Energie in Form von Wärmestrahlung die Erde in den Weltraum. Dadurch erhöht sich die Temperatur des Bodens und der unteren Atmosphäre: Schon heute liegt die globale Mitteltemperatur um etwa 0,6°C höher als noch im 19. Jahrhundert (Abb. B). An diesem **anthropogenen**, also vom Menschen verursachten, **Treibhauseffekt** ist CO₂ mit fast 60 Prozent beteiligt, daneben sind es Methan mit knapp 20 Prozent, halogenierte Kohlenwasserstoffe mit 15 Prozent und Distickstoffoxid mit 5 Prozent.

KLIMA AUF DER KIPPE

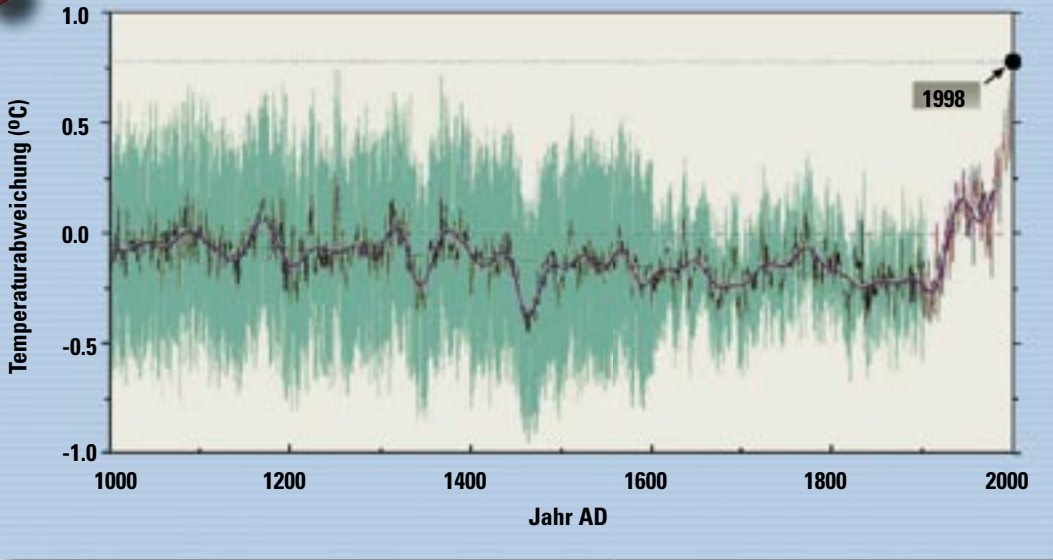
Nach Berechnungen von Klimaforschern könnte bei weiter steigendem Kohlendioxid-Ausstoß die mittlere Temperatur der Erdatmosphäre bis zum Jahr 2050 um bis zu 2,5°C ansteigen – mit verheerenden Folgen für den Wasserkreislauf und für das

Klima in bestimmten Regionen: So könnte es zu einem Abschmelzen der Gletscher und einem Anstieg des Meeresspiegels sowie Überschwemmungen und schweren Stürmen kommen, die weite Landstriche verwüsten. 1997 verpflichteten sich daher die Industriestaaten bei einer Konferenz im japanischen Kyoto auf eine Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen: Zwischen 2008 und 2012 sollen die CO₂-Emissionen um rund fünf Prozent unter den Wert von 1990 sinken. Die USA müssen demnach den Ausstoß an Treibhausgasen um 7 Prozent gegenüber 1990 senken, die Europäische Union um 8 Prozent. Innerhalb der EU strebt Deutschland eine Reduktion um 21 Prozent an. Allerdings tritt das Abkommen erst in Kraft, wenn 55 Staaten es ratifizieren, die 1990 zusammen für mindestens 55 Prozent des in den Industrieländern ausgestoßenen CO₂ verantwortlich waren. Die USA haben das **Kyoto-Protokoll** unter Bill Clinton zwar unterschrieben, aber letztlich nicht ratifiziert – die Unterschrift wurde 2001 von George W. Bush widerrufen. Ende 2003 hatten 120 Staaten (zwei Drittel der Weltbevölkerung) das Protokoll ratifiziert, aber die Summe ihrer Emissionen entsprach gerade mal 44,2 Prozent. Entscheidend war daher die Zusage Russlands im Oktober 2004. Auf Russland entfielen 1990 immerhin 18 Prozent der Treibhausgas-Emissionen in Industrieländern. Damit beträgt der Anteil am Emissionskuchen jetzt 62 Prozent. Nachdem zahlreiche Betriebe aus der Sowjetzeit stillgelegt worden sind, liegt Russland inzwischen weit unter der 18-Prozent-Marke und sieht sich damit in der komfortablen Position, künftig Emissionszertifikate verkaufen zu können. Nach Einschätzung einer norwegischen Analytischen- und Beratungsfirma könnte das Land bis 2012 ein Milliardengeschäft mit dem **Emissionsquotenhandel** machen.

Das Kyoto-Protokoll sieht erstmals vor, dass die Industrieländer ihrer Verpflichtung, weniger CO₂ freizusetzen, nicht nur durch Energiesparen nachkommen können, sondern auch indem sie neue **CO₂-Senken** schaffen. Dies sind Flächen, die – wie zum Beispiel Ozeane oder Wälder – CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und in Form anderer Kohlenstoffverbindungen fixieren. Zu klären ist daher, was mit den derzeit etwa 7,1 Milliarden Tonnen (Gigatonnen, Gt) Kohlenstoff pro Jahr geschieht, die der Mensch in Form von CO₂ freisetzt (Abb. C). Weltweite Messungen zeigen, dass 3,2 Gt/Jahr in der Atmosphäre enden. Die Ozeane nehmen wahrscheinlich rund 2 Gt/Jahr auf – in ers-

B

© nach Kerr (2000), Science 288:589



◀ Messungen der Durchschnittstemperatur der nördlichen Hemisphäre während der letzten 1000 Jahre zeigen einen signifikanten Temperaturanstieg zum Ende des 20. Jahrhunderts.

ter Linie aufgrund der guten Löslichkeit von Kohlendioxid (CO_2) in Wasser. Drei Formen stehen dabei untereinander im reaktionschemischen Gleichgewicht: gelöstes CO_2 (<1%), Carbonat CO_3^{2-} (8%) und Hydrogencarbonat HCO_3^- (91%). Mit der Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration nimmt die Aufnahmekapazität des Meerwassers für Kohlendioxid jedoch ab.

DIE SUCHE NACH DEM KOHLENSTOFF

Die Biomasse der lebenden Organismen im Ozean ist etwa tausendmal geringer als die des terrestrischen Ökosystems. Trotzdem produziert marines Plankton jährlich dieselbe Menge an organischem Material wie die terrestrischen Organismen. Nach dem Absterben dieser Lebewesen sinkt das organische und mineralische Material auf den Meeresboden, wo es allmählich durch die Aktivität von Bakterien zersetzt wird oder sich in Sedimenten ablagert. Dabei zieht es Kohlenstoff und andere Elemente mit sich – etwa 25 Prozent des fixierten Kohlenstoffs sinkt in die Tiefe, wo er über Hunderte oder Tausende von Jahren gespeichert wird und damit der Atmosphäre entzogen bleibt. Diesen Prozess bezeichnen die Wissenschaftler als **biologische Pumpe**. Änderungen in der Stärke der biologischen Pumpe der Ozeane über längere Zeiträume stellen einen der wichtigsten Kontrollmechanismen der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration dar: Ohne diese biologische Pumpe würde nach Schätzung von Experten die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre um 200 ppm ansteigen.

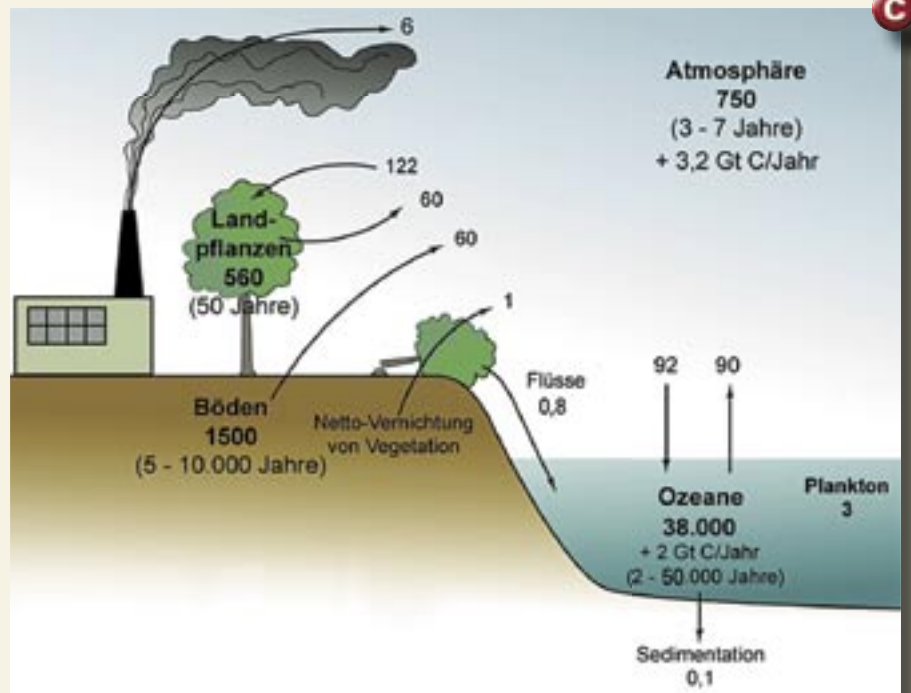
Es bleibt eine Lücke von 1,9 Gt/Jahr in der Kohlenstoff-Bilanz, die oft als „missing sink“ oder „fehlende Senke“ bezeichnet wird. Eine

weitere Speicherung von Kohlenstoff ist vor allem in der terrestrischen Biosphäre, also Böden und Wäldern, möglich. Denn Pflanzen wandeln im Rahmen der Photosynthese Kohlendioxid in Kohlenstoffverbindungen um. Durch Abbau von Pflanzenmaterial oder Vernichtung durch Feuer gelangt Kohlendioxid aber auch wieder in die Atmosphäre zurück, und zwar wesentlich schneller als beim marinen Kohlenstoff-Kreislauf. „Nach ca. 15 bis hundert Jahren kehrt ein Teil des Kohlenstoffs als Kohlendioxid wieder in die

Atmosphäre zurück“, erklärt Ernst-Detlef Schulze, Direktor am Max-Planck-Institut in Jena. Welche Rolle die biologischen Kohlenstoff-Senken bei der Umsetzung des Kyoto-Protokolls spielen, ist daher noch umstritten.

KLIMADETEKTIVE VOR ORT

Zusammen mit Forschergruppen aus der ganzen Welt nehmen die Max-Planck-Wissenschaftler bestimmte Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs genauer unter die Lupe. Dabei geht es immer um die Frage: →



© Schlesinger, 1997

▲ Der globale Kreislauf des Kohlenstoff (C) gemessen in Giga (= Milliarden) Tonnen (Poolgrößen fett gedruckt). Das größte Reservoir sind die Ozeane (38 000 Gt C), die Böden mit 1500 Gt C das zweitgrößte. In der Atmosphäre sowie in der Biomasse von Pflanzen werden 750 bzw. 560 Gt C gespeichert (in Klammern die mittlere Verweildauer). Unter natürlichen Bedingungen sind die Aufnahme- und Abgabeprozesse fast ausgeglichen. Die Kohlenstoffbilanz wird durch den Menschen jedoch verändert. (Angaben für 1980-2000)

→ Wo „verschwindet“ wie viel Kohlenstoff – in Form molekularer Verbindungen – in der Natur? Ein wichtiges Forschungsgelände für die Jenaer ist ein ausgedehnter Buchenwald in Thüringen nördlich von Eisenach (**Abb. D**). Das Besondere daran: Der Wald, der heute zum Nationalpark Hainich gehört, liegt unmittelbar an der ehemals deutsch-deutschen Grenze und wurde deshalb in den letzten 60 Jahren kaum bewirtschaftet. Die Forscher treffen also auf einen von Menschen nahezu unbeeinträchtigten „Urwald“ wie er vor ein paar hundert Jahren noch in weiten Teilen Europas verbreitet war. Zwei Messstationen haben die Jenaer Forscher im Nationalpark aufgebaut: einen gut 40 Meter hohen Messturm für Gasanalysen und eine Bodenstation, an der vor allem Humusproben gesammelt werden. Mit dem Messturm können die Wissenschaftler das Verhältnis messen zwischen dem vom Wald aufgenommenen und dem abgegebenen Kohlendioxid, um dann die seit langem diskutierte Frage zu beantworten, ob ein Wald mit altem Baumbestand eine natürliche Kohlenstoff-Senke darstellt. Um den Netto-CO₂-Fluss zu bestimmen, haben die Jenaer Forscher mehrere Geräte auf ihrem Messturm montiert (**Abb. E**). 20-mal pro Sekunde lassen sich damit Schwankungen der momentanen CO₂-Konzentration in der Luft messen, die an der Spitze des Turms vorbei streicht. Außerdem werden weitere Parameter wie Temperatur, Windstärke und Luftfeuchtigkeit erfasst. Mit ihrer Bodenmessstation wollen die Jenaer Wissenschaftler herausfinden, in welchem Umfang Waldböden eine Kohlenstoff-Senke darstellen. Die im Nationalpark Hainich gesammelten Humus- und Pflanzenproben werden im Institut mit modernen Analysegeräten untersucht. Pflanzenteile wie Blätter,

Wurzeln oder Holz müssen zuvor allerdings gereinigt, zerkleinert und getrocknet werden. Danach wandert das Material zur Isotopenanalyse, die Hinweise liefert, wie schnell eine Pflanze CO₂ aus der Luft per Photosynthese verarbeitet. Die Forscher nutzen dazu die Tatsache, dass Kohlenstoff in der Natur nicht nur mit der Masse 12 vorkommt, sondern ein winziger aber bekannter Anteil auch mit den Massen 13 und 14. Chemisch verhalten sich die verschiedenen schweren CO₂-Moleküle der unterschiedlichen Isotope gleich; ihre physikalischen Eigenschaften und ihre Reaktionsgeschwindigkeiten sind jedoch unterschiedlich. Das führt dazu, dass Pflanzen ¹²CO₂ aus der Luft schneller verarbeiten als ¹³CO₂ oder ¹⁴CO₂. Indem die Forscher das Verhältnis von ¹²C zu ¹³C und ¹⁴C beispielsweise in einem Blatt bestimmen, können sie die Photosynthesegeschwindigkeiten berechnen und damit die Kapazität, mit der die Pflanze der Atmosphäre CO₂ entzieht.

FORSCHER ZIEHEN BILANZ

Die Untersuchungen werden von der EU finanziert, die dazu den Forschungsverbund *CarboEurope* ins Leben gerufen hat. Mehr als 100 kontinentale Messstationen, verteilt über alle Klimaregionen und Ökosysteme Europas, liefern dabei Daten über den Beitrag zum Kohlenstoffhaushalt. In der Projektphase zwischen 1998 und 2000 hat *CarboEurope* zu einer ersten europäischen Kohlenstoffbilanz geführt: Danach gibt es in der terrestrischen Biosphäre von Kontinentaleuropa (bis zum Ural) eine geschätzte Netto-Kohlenstoffsenke zwischen 135 und 205 Millionen Tonnen pro Jahr. Das entspricht 7-12 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlenstoff-Emissionen im Jahr 1995. Zum Vergleich: Weltweit



▲ Strahlungsmessgeräte an einem mikrometeorologischen Messturm.

nimmt die Biosphäre bis zu einem Drittel der vom Menschen verursachten Kohlenstoff-Emissionen auf. Europas Biosphäre ist somit nur eine kleine Kohlenstoffsenke, verglichen mit den überdurchschnittlich hohen europäischen Emissionen aus fossilen Brennstoffen. Die Hochrechnungen der Wissenschaftler haben ergeben, dass Wälder und möglicherweise auch Grünland CO₂ aufnehmen, während Äcker und Moorflächen CO₂ in ähnlicher Größenordnung wieder abgeben. Land- und Forstwirtschaft haben somit einen entscheidenden Einfluss auf die Kohlenstoffbilanz Europas. Eine gezielte Bewirtschaftung könnte deshalb die Kohlenstoffaufnahme für die nächsten Jahrzehnte erhöhen. Doch Aufforstung und Kohlenstoff-Management in Wäldern erlaubt nur vorübergehend zusätzlichen Kohlenstoff zu speichern. „Es ist bislang ungeklärt, ob die Speicherkapazität der Biosphäre gesättigt wird“, erklärt Ernst-Detlef Schulze. „Inwieweit die Biosphäre durch Klimawandel oder durch Nutzung der neu aufgebauten Biomasse und veränderte Landnutzung wieder zu einer Kohlenstoff-Quelle wird, können wir nicht sagen. Die Studie zeigt klar die Grenzen unseres heutigen Wissens.“ Ziel muss es sein, langfristig die Kohlendioxid-Emissionen einzudämmen – auch deshalb hat die EU unlängst ein Nachfolgeprojekt bewilligt.

Schlagwörter: Kohlenstoffkreislauf, natürlicher/anthropogener Treibhauseffekt, Kyoto-Protokoll, CO₂-Senken, Emissionsquotenhandel, biologische Pumpe

Leseempfehlungen: Paul J. Crutzen, *Chemie der Atmosphäre*, Spektrum Verlag 1994; Hartmut Graßl, *Wetterwende – Vision: Globaler Klimaschutz*, Campus Verlag, 1999; Brockhaus *Mensch, Natur, Technik*, Bd. Lebensraum Erde, 2000; Dieter Walch und Harald Frater, *Wetter & Klima – Das Spiel der Elemente – Atmosphärische Prozesse verstehen und deuten*, Springer Verlag Berlin, 2003

Internet: www.biosphere.llu.edu, www.treibhauseffekt.com



▲ Wissenschaftler des MPI für Biogeochemie bei der Proben-Entnahme im Buchenwald.

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-reihe.mpg.de

BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX erscheinen jeweils zweimal im Jahr und berichten über aktuelle Forschungsergebnisse aus den Max-Planck-Instituten vor allem für Lehrer und Schüler. Weitere Exemplare können unter folgender Adresse kostenlos bestellt werden: