

Es war eines der spektakulärsten Experimente: 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 Zentimeter dicker Stahl im Boden schirmten die sogenannte 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.

DAS GRÖSSTE „REAGENZGLAS“ DER WELT

Doch die Natur machte den Forschern einen Strich durch die Rechnung. Anders als es Berechnungen voraus gesagt 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.

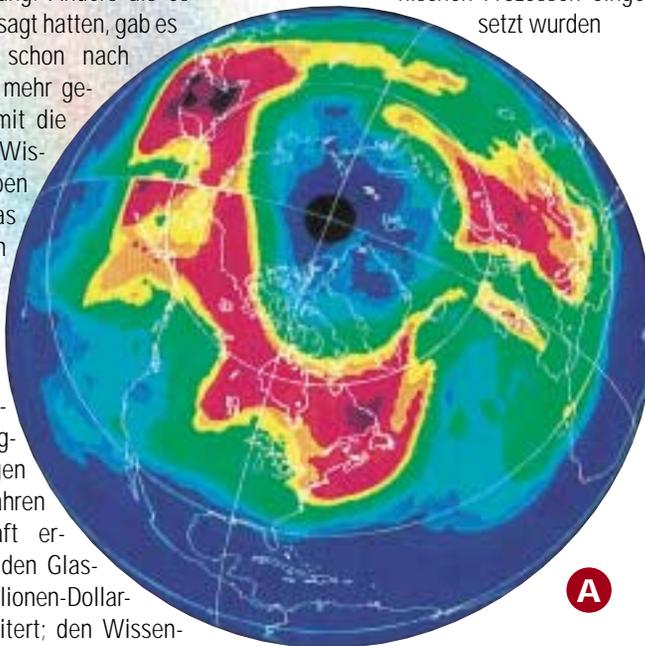
ALARMIERENDES OZONLOCH

Denn das Interesse der Wissenschaft an den komplizierten ökologischen Kreisläufen war Anfang der 90er Jahre noch relativ neu. Es resultierte vor allem aus einer aufsehenerregenden Entdeckung Mitte der 80er Jahre: Englische Forscher meldeten eine erhebliche Verringerung der Ozonkonzentration in der

GESUCHT: ELEMENT NR. 6 –

Warum Forscher nach Kohlenstoff fahnden

Stratosphäre über der Antarktis. Das Alarmierende daran: je geringer die Ozonkonzentration dort, desto mehr energiereiche UV-Strahlung erreicht die Erdoberfläche. Die Hauptursache für das **Ozonloch** (Abbildung A) war schnell gefunden – Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die bis dahin in vielen technischen Prozessen eingesetzt wurden



Auch über der Arktis gibt es ein Ozonloch.

Die Falschfarbenskala bezieht sich auf Dobson-Einheiten: 100 Dobson entsprechen 1 Millimeter Ozon bei Luftdruck in Meereshöhe. Normalerweise bewegt sich der Luftdruck der Atmosphäre zwischen 300 und 450 Dobson.



BIOGEOCHEMIE – den Klimaveränderungen auf der Spur

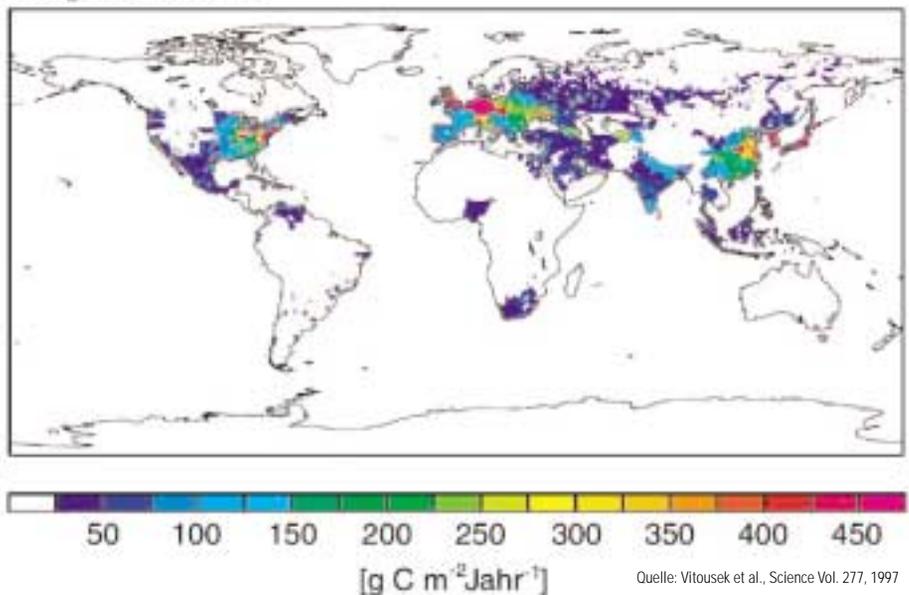
Die meisten Wissenschaftler sind sich inzwischen einig: durch die industrielle Produktion, die intensive Landwirtschaft und den Verkehr beeinflusst der Mensch das Klima nachhaltig. Der anthropogene Treibhauseffekt, verursacht durch die Emission von Kohlendioxid bei der Verfeuerung fossiler Brennstoffe, ist der beste Beweis dafür. Was aber geschieht mit dem freigesetzten CO₂? Und wie lässt sich der angerichtete Klima-„Schaden“ begrenzen? Um diese Fragen zu beantworten, untersuchen die Forscher des 1997 gegründeten **Max-Planck-Instituts für Biogeochemie in Jena** den natürlichen Kohlenstoffkreislauf auf der Erde. Unter anderem erheben sie dazu Daten mit weltweiten Messnetzen. Mit Hilfe komplizierter Computersimulationen wollen sie dann die Klimaveränderungen erklären und Prognosen für den weiteren Verlauf erstellen.

oder als Treibmittel in Sprühdosen und als Kühlmittel in Kühlschränken Verwendung fanden, führten zum Abbau der Ozonschicht. Paul Josef Crutzen, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, leistete bei der Aufklärung der Ozonlochursachen Pionierarbeit; er erhielt dafür 1995 den Nobelpreis für Chemie.

WIE DIE ERDE ZUM BACKOFEN WIRD

Schnell entbrannte damals ein Streit unter den Wissenschaftlern, inwieweit der Mensch im Stande ist, das gesamte Weltklima negativ zu beeinflussen. Die Meteorologen hatten nämlich auch entdeckt, dass die globale Mitteltemperatur heute um etwa 0,75 °C höher liegt als noch im 19. Jahrhundert. Heizt der Mensch seit der Industrialisierung die Erde auf wie einen Backofen? Inzwischen lautet die Antwort der Klimaforscher fast einhellig: ja. Durch die industrielle Produktion, intensive Landwirtschaft und Verkehr bringt der Mensch vor allem den natürlichen Kohlenstoffkreislauf durcheinander. Große Mengen Kohlendioxid (CO₂) entstehen zum einen durch die Verbrennung von Öl, Gas und Kohle, die allesamt aus Kohlenwasserstoffen bestehen. Zum anderen wird weltweit pro Minute eine Waldfläche abgeholzt, die

CO₂-Emissionen

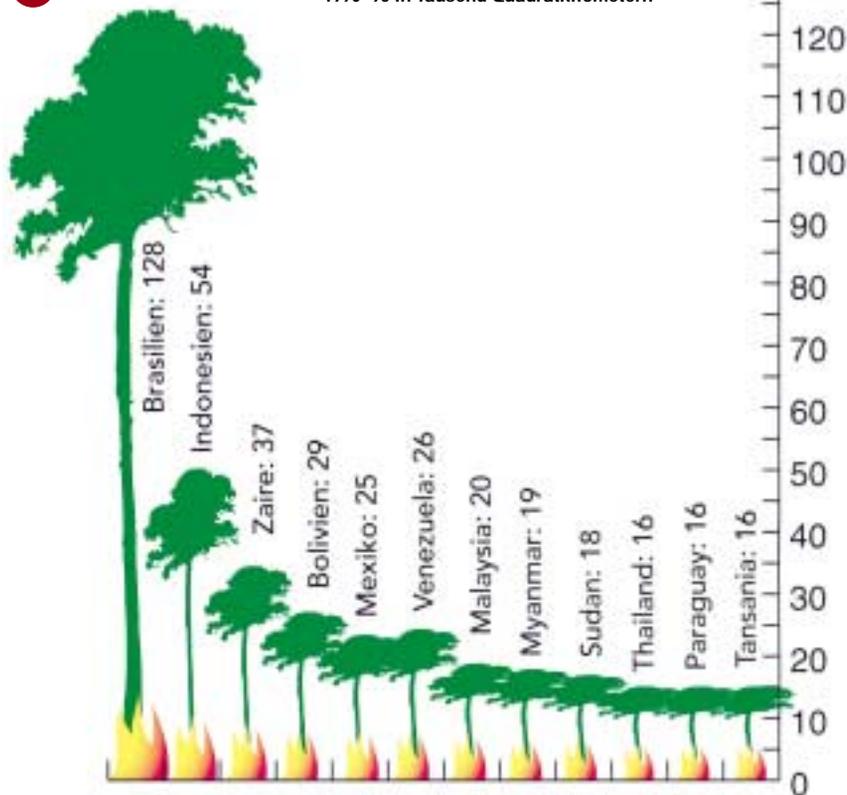


größer ist als 40 Fußballfelder (Abbildung B). Dadurch verschwinden immer mehr Pflanzen, die bei der Photosynthese das CO₂ in pflanzliche Kohlenstoffverbindungen umwandeln und dabei O₂ abgeben. Die Konzentration des CO₂ in der Troposphäre ist deshalb seit Beginn der Industrialisierung von ca. 280 ppm (parts per million) auf etwa 370 ppm im Jahr 1999 angestiegen. Und dies verhindert - wie

die Glaswand eines Treibhauses -, dass die auf die Erde treffende Sonnenenergie als Wärmestrahlung (IR) ins Weltall abgegeben wird. Das Ergebnis: die Erde erwärmt sich. Neben dem CO₂, das mit fast 60% den größten Anteil hat, sind es Methan mit knapp 20%, halogenierte Kohlenwasserstoffe mit 15% und Distickstoffoxid mit 5%, die zum anthropogenen, also vom Menschen verursachten **Treibhauseffekt** beitragen.

B

Verlust an Waldfläche durch Brandrodung 1990–95 in Tausend Quadratkilometern



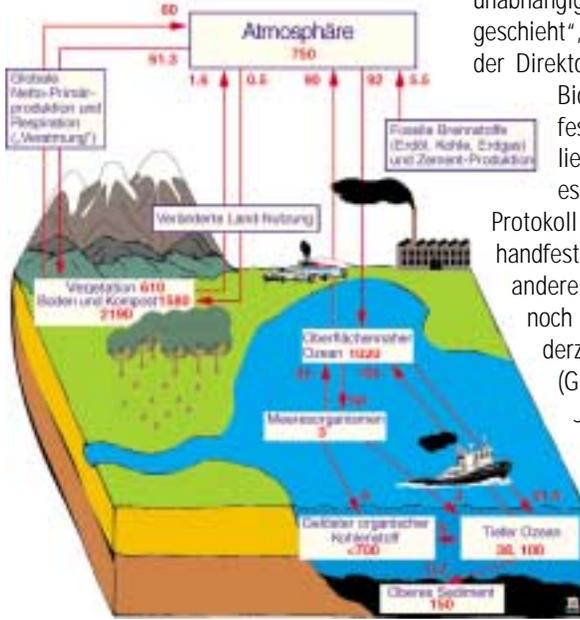
KLIMA AUF DER KIPPE

Die Frage lautet schon längst nicht mehr, ob die beobachtete Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen zu einer globalen Erwärmung führt - Berechnungen von Klimaforschern zeigen, dass die mittlere Temperatur der Erdatmosphäre bis zum Jahr 2050 um bis zu 2,5°C ansteigen könnte -, sondern welche Auswirkungen das z.B. auf den Wasserkreislauf und für bestimmte Regionen hat. So befürchten Klima-Pessimisten, dass es zu einem Schmelzen der Gletscher (wie erst kürzlich am Nordpol beobachtet), einem Anstieg des Meeresspiegels und Extremereignissen wie Überschwemmungen und schweren Stürmen, die weite Landstriche verwüsten, kommen könnte.

Nachdem diese Warnungen laut wurden, fingen Politiker aus aller Welt an, über eine Klima-Rahmenkonvention zu verhandeln, die die globalen Emissionen von Treibhausgasen regeln soll (Abbildung C). Das Ergebnis einer der Sitzungen in Japan im Jahr 1996 war das **Kyoto-Protokoll**. In ihm verpflichten sich 30 Länder - darunter vor allem die westlichen

D

Globaler Kohlenstoff-Kreislauf



lanzierung eingeht, bestimmt, ob ein Land die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls erfüllt – unabhängig davon, was in der Atmosphäre geschieht“, stellt Ernst-Detlef Schulze, einer der Direktoren am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena, nüchtern fest. Die Gründe für diesen Konflikt liegen auf der Hand. Zum einen geht es vielen Politikern, die das Kyoto-Protokoll ausgehandelt haben, um handfeste wirtschaftliche Interessen. Zum anderen wissen selbst Klimaforscher noch immer nicht genau, was mit den derzeit etwa 7,1 Milliarden Tonnen (Gigatonnen, Gt) Kohlenstoff pro Jahr geschieht, die der Mensch in Form von CO₂ emittiert (Abbildung D). Weltweite Messungen zeigen, dass 3,2 Gt C in der Atmosphäre enden. Die Ozeane nehmen wahrscheinlich rund 2,0 Gt C auf. Damit klafft eine Lücke von 1,9 Gt C in

hat in einem 460 Seiten umfassenden Bericht Schätzungen zu möglichen Kohlenstoff-Senken aufgeführt: Danach könnten die Industriestaaten ihre Zielsetzungen aus dem Kyoto-Protokoll (Senkung um 200 Megatonnen Kohlenstoff pro Jahr) auch durch Änderungen in der Landnutzung statt durch Emissionsreduzierungen erreichen (siehe Tabelle). Bevor Wissenschaftler den Kohlenstoffkreislauf nicht besser verstehen, wird sich aber die politisch brisante Frage, was wie in die Netto-Bilanz der einzelnen Länder eingehen soll, nicht eindeutig beantworten lassen.

BIOGEOCHEMIKER ALS KLIMADETEKTIVE

Die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena nehmen deshalb in Zusammenarbeit mit Forschergruppen aus der ganzen Welt bestimmte Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs genauer unter die Lupe. Dabei geht es immer um die Frage: Wo „verschwindet“ wieviel Kohlenstoff und in welcher

Industrienationen – ihre CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2010 unter die Werte von 1990 abzusenken. Die EU versprach damit ihren Ausstoß um insgesamt 8%, Deutschland sogar um 21% zu senken. 159 Mitgliedsstaaten – darunter vor allem die ärmeren Länder – sind nicht bereit das Kyoto-Protokoll zu unterschreiben. Ihr Hauptargument: ihre CO₂-Emissionen seien zur Zeit ohnehin niedrig; außerdem hätten auch die Bewohner der noch nicht industrialisierten Länder Anspruch auf eine Steigerung des Lebensstandards, der unweigerlich mit einem wachsenden Energieverbrauch und damit zunehmenden CO₂-Emissionen verbunden sei.

den Bilanzen, die oft als „missing sink“ oder „fehlende Senke“ bezeichnet wird. Neben der

Schätzungen zu neuen möglichen „Kohlenstoff-Senken“
(in Megatonnen C/Jahr; Quelle: Science, Vol. 288, Mai 2000)

Neu aufgeforstete Wälder	197 bis 584
Rodung	-1788
<i>Besseres Management von:</i>	
Feldern (durch Erosionskontrolle etc.)	125
Weideland	240
Wäldern (Auswahl der Arten etc.)	170
Nutzungsänderungen bei Plantagen	390
Umwandlung von Feldern in Weideland	38
Sonstige	42

DIE SUCHE NACH DEM „VERLORENEN“ KOHLENSTOFF

Bemerkenswerterweise sieht das Kyoto-Protokoll 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. Was allerdings offiziell als CO₂-Senke anerkannt werden sollte, darüber herrscht unter Klimaforschern und Politikern seitdem großer Streit. „Die Definition, was eine Senke ist, und in welchem Umfang sie in die Bi-

Biomasse in alten Bäumen von Urwäldern ist vor allem im Boden eine längerfristige Speicherung von Kohlenstoff möglich. Humusreiche Böden speichern dabei u.U. mehr Kohlenstoff als bisher angenommen. Das von den Vereinten Nationen geförderte *Intergovernmental Panel On Climate Change* (IPCC)

Form? Dabei sind die Jenaer Wissenschaftler mehr als Forscher anderer Disziplinen auf Freilanduntersuchungen angewiesen. Ein wichtiges Forschungsgelände ist ein ausgedehnter Buchenwald in Thüringen nördlich von Eisenach. 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

Strahlungsmessgeräte an einem mikrometeorologischen Messturm



E

nahezu unbeeinträchtigt „Urwald“, wie er vor ein paar hundert Jahren noch in weiten Teilen Europas verbreitet war, und können untersuchen, wie hier der Kohlenstoffkreislauf funktioniert.

EIN VERSUCHSLABOR ÜBER DEN BAUMWIPFELN

Dazu haben die Jenaer Forscher im Nationalpark zwei Messstationen errichtet: einen großen Messturm für Gasanalysen und eine Station, an der Bodenproben gesammelt werden. Mit dem gut 40 Meter hohen Messturm wollen die Wissenschaftler die Differenz zwischen dem vom Wald aufgenommenen und abgegebenen CO_2 messen, um dann die seit langem diskutierte Frage zu beantworten, ob ein Wald mit altem Baumbestand eine natürliche CO_2 -Senke darstellt. Um den Netto- CO_2 -Fluss zu bestimmen, haben die Jenaer Forscher mehrere Geräte auf ihrem Messturm montiert (Abbildung E). 20 mal pro Sekunde können sie damit Schwankungen der momentanen CO_2 -Konzentration in der Luft messen, die an der Spitze des Turms vorbei streicht. Außerdem werden Temperatur, Windstärke, Luftfeuchtigkeit und andere Parameter registriert. Mit ihrer Bodenmessstation wollen die Jenaer Wissenschaftler erfassen, 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 Isotopenverhältnisanalyse, die Hinweise liefert, wie eine Pflanze CO_2 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 CO_2 -Moleküle der unterschiedlichen Isotope gleich; ihre physikalischen Eigenschaften und ihre Reaktionsgeschwindigkeiten sind jedoch unterschiedlich. Das führt dazu, dass Pflanzen $^{12}\text{CO}_2$ aus der Luft schneller verarbeiten als $^{13}\text{CO}_2$ oder $^{14}\text{CO}_2$. Indem die Forscher das Verhältnis von ^{12}C zu ^{13}C und ^{14}C beispielsweise in einem Blatt bestimmen, können sie die Photosyntheseraten berechnen

und damit die Kapazität, mit der die Pflanze der Atmosphäre CO_2 entzieht.

WALDSCHUTZ IST KLIMASCHUTZ

Die Untersuchungen werden von der EU finanziert, die dazu den Forschungsverbund *CarboEurope* ins Leben gerufen hat. Bisherige Ergebnisse deuten darauf hin, dass alte Wälder in der Tat Kohlenstoff-Senken sind, während Wiederaufforstungen dagegen eher Kohlenstoff freisetzen – vor allem, weil sie die Biochemie im Waldboden erst einmal gehörig durcheinander bringen. Die Forscher wollen nun erreichen, dass sich diese Erkenntnisse auch im Kyoto-Protokoll niederschlagen. Danach müssten Länder, die Urwälder abholzen, stärker zur Verantwortung gezogen, Nationen, die nachhaltige Waldwirtschaft betreiben dagegen „belohnt“ werden.

„BLACK CARBON“ AUS SIBIRIEN

Allein wegen ihrer gewaltigen Ausdehnung könnten die Wälder in Nordamerika, Europa und Sibirien eine starke Kohlenstoff-Senke darstellen. Eine genauere Erfassung der CO_2 -Flüsse in dieser Region ist also nicht nur wissenschaftlich, sondern auch politisch bedeutsam. Die Wissenschaftler haben daher schon 1993 mit den Messungen von Kohlenstoff-Flüssen in Sibirien begonnen (Abbildung F). Etwa alle 30 Jahre kommt es hier zu Bodenfeuern, in denen ein Teil der

BIOMAX – GEOMAX aktuelle Forschungsergebnisse

In der Reihe BIOMAX und GEOMAX, die alternierend jeweils zweimal im Jahr erscheinen, bereitet die Max-Planck-Gesellschaft aktuelle Forschungsergebnisse aus ihren Instituten auf. Zielgruppe sind vor allem Lehrer und Schüler.

Jungpflanzen, der Streuschicht und der Humusaufgabe zerstört wird. Diese Brände führen dazu, dass – verglichen mit der Biomasse in den Waldbeständen – im Humus und im Mineralboden nur eine geringe Kohlenstoffmenge vorhanden ist. Dafür ist ein sehr hoher Anteil dieses Bodenkohlenstoffs als sogenannter „black carbon“, d.h. schwer abbaubare Holzkohle, festgelegt. Er muss in die Rechnungen der Klimaforscher als Kohlenstoff-Senke eingehen.

SCHNELLE RECHNER FÜR DIE KOHLENSTOFF-FAHNDER

Solche und viele andere Einzelergebnisse aus der Freilandforschung werden letztendlich dazu verwendet, hochkomplexe Rechenmodelle aufzustellen, die das Klima auf der Erde simulieren sollen. Damit wollen die Wissenschaftler beispielsweise ausrechnen, um wieviel Grad die Welttemperatur ansteigen wird, wenn – wie im Moment absehbar – die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls nicht erfüllt werden. Oder ob die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre sinken würde, wenn abgeholzte Urwälder wieder aufgeforstet würden. Viel Zeit bleibt nicht, um diese wichtigen Fragen zu beantworten und den weltweiten Klimaschutz endlich voranzutreiben.

Schlagwörter:

Ozonloch,
Treibhauseffekt,
Kyoto-Protokoll,
 CO_2 -Senken,
Kohlenstoff-
kreislauf

Leseempfehlungen:

Paul J. Crutzen, Chemie der Atmosphäre, Spektrum Verlag 1994;
Brockhaus Mensch, Natur, Technik, Bd. Lebensraum Erde, 2000;

Internet: www.bio2.edu

Montagearbeiten an einem Messturm in Sibirien

