



Foto: Esser

Bachtal in Zentralamazonien: Die inneren Tropen mit ihrem halbgelassenen Wasserkreislauf sind die wichtigste „Klimaküche“ der Erde.

Der Mensch verändert den Wasser- und Energiehaushalt der Erde

Gießener Modell verbessert die Risikoabschätzung

Von Gerd Esser

Die fortgesetzte Emission des Treibhausgases Kohlendioxid – zur Zeit jährlich 24 Milliarden Tonnen mit zunehmender Tendenz, seit vorindustrieller Zeit mehr als 1 Billion (10^{12}) Tonnen – hat den natürlichen Treibhauseffekt der Erdatmosphäre verstärkt. Das führte zu einer Temperaturerhöhung an der Erdoberfläche und zu einer Abkühlung der (höheren) Atmosphäre. Die Wirkung des Kohlendioxids und anderer Treibhausgase wird durch Rückkoppelungseffekte noch verstärkt. So wirken zum Beispiel die Zunahme des Wasserdampfgehalts, die Abnahme der Schneebedeckung und der mit Meereis bedeckten Flächen in den Polargebieten verstärkend auf den Treibhauseffekt. Als Folgen der drohenden Erwärmung werden zum Teil Horrorszenarien entworfen. Doch wie zuverlässig sind eigentlich die wissenschaftlichen Grundlagen für solche Vorhersagen?

Aus der Masse der Beobachtungsdaten zeichnet sich deutlich das umfassende Bild einer sich erwärmenden Erde ab: Die global gemittelte Oberflächentemperatur der Erde erhöhte sich im 20. Jahrhundert um 0.4–0.8°C. Obwohl Emissionsszenarien sowie das Verständnis der Rückkoppelungsprozesse in den Klimamodellen noch immer Unsicherheiten bergen, ist von einer weiteren Erhöhung der mittleren Temperatur der Erde um 1.3–5.6°C in den nächsten 100 Jahren auszugehen.

Diese Ausführungen, hier zusammenfassend wiedergegeben, machte am 18. Juli 2001 Thomas R. Karl, Direktor des National Climate Data Center (NCDC) der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), vor dem US-Senat.

Erschreckende Zukunftsperspektiven...

Man kann die Folgen dieser drohenden Erwärmung vorhersehen:

Abnahme des Bodenwassergehalts, daher Verkürzung der Vegetationsperioden und als Folge davon: Rückgang der Produktivität der Vegetation und der Landnutzungssysteme. Viele Länder vor allem der Dritten Welt werden ihre Bevölkerung nicht mehr ernähren können. Es wird dann zu Migrationen großer Bevölkerungsschichten und zur Destabilisierung der betroffenen Quell- und Zielländer und ihrer Verbündeten kommen.

...müssen laufend hinterfragt werden

Wie zuverlässig sind eigentlich die wissenschaftlichen Grundlagen der Vorhersage solcher Horrorszenarien?

Gerade die entscheidenden Transferprozesse für Wasser und Energie zwischen den Landoberflächen und der Atmosphäre sind in Klimamodellen bisher unzureichend, weil unvollständig, beschrieben. Diese Prozesse sind „organismisch“ beeinflusst: Die Energie wird zusammen mit dem von Pflanzen verdunsteten Wasser in Form von „latenter Wärme“ (Verdunstungswärme) in die Atmosphäre eingetragen. Dabei spielt auf dem Land die Leitfähigkeit (Konduktanz) der Vegetation für Wasserdampf im System Boden-Atmosphäre die entscheidende Rolle.

Diese Transferprozesse müssen auf ökophysiologischer Grundlage neu formuliert werden. Die Beschreibung muss bei den eigentlich wirksamen Mechanismen auf biochemischer Ebene ansetzen, und die Parameter der Gleichungen müssen experimentell bestimmbar sein.

Mit dieser Zielvorgabe habe ich ab 1993 zusammen mit meinen damaligen Mitarbeitern damit begonnen, ein Modell für die Transferprozesse zwischen Vegetation und Atmosphäre zu konzipieren, das inzwischen unter dem Namen „Giessen Global Generic Water Conductance Model“ (GIWACOM)

bekannt geworden ist (Esser et al. 2000).

Eine neue Antwort auf die Herausforderung: GIWACOM

GIWACOM (Giessen Global Generic Water Conductance Model) ist ein Modell der Landoberflächen-Konduktanz, also der Leitfähigkeit eines Quadratmeters Landoberfläche für den Wasserfluss vom Boden in die Atmosphäre. Es wurde entwickelt als ein Instrument zur Untersuchung der Rolle der Pflanzen bei der Veränderung der Konduktanz als Folge der Veränderung von Umweltbedingungen, wie Wettersituationen, Bodenfeuchte, Bodenstruktur und -textur, atmosphärische Kohlendioxidkonzentration. Der veränderliche Systemzustand selbst, also beispielsweise bei veränderter Pflanzenbedeckung, wechselndem Vegetationstyp oder veränderter Landnutzung, wird vom Modell ebenfalls vollständig erfasst und seine Auswirkungen werden berücksichtigt.

GIWACOM musste folgende Bedingungen erfüllen: (1) alle bekannten relevanten Prozesse berücksichtigen; (2) zur Beschreibung der Prozesse universelle (generische) Funktionen verwenden in dem Sinn, dass sie gültig sein sollten für alle auf der mit Pflanzen bewachsenen Landoberfläche vorkommenden Bedingungen; (3) die Funktionen so gestalten, dass ihre Parameter und Koeffizienten durch experimentelle Untersuchungen bestimmt werden können; (4) eine global gültige Parameterisierung (siehe Kasten „Parameterisierung“) der Funktionen bereitstellen, die eine zukünftige Überarbeitung aufgrund weiterer experimenteller Untersuchungsergebnisse unterstützt.

GIWACOM hat zwei Hauptkomponenten: ein Verfahren zur Berechnung der stomatären Konduktanz (regelbare Leitfähigkeit für die Wasserdampfdiffusion der Stomata, also

Wasserlimitierte Systeme wie diese Trichocereus pasacana-Savanne, 4000 m hoch in den argentinischen Anden, liefern wesentliche Daten für die Parameterisierung des Modells GIWACOM.



Foto: Esser

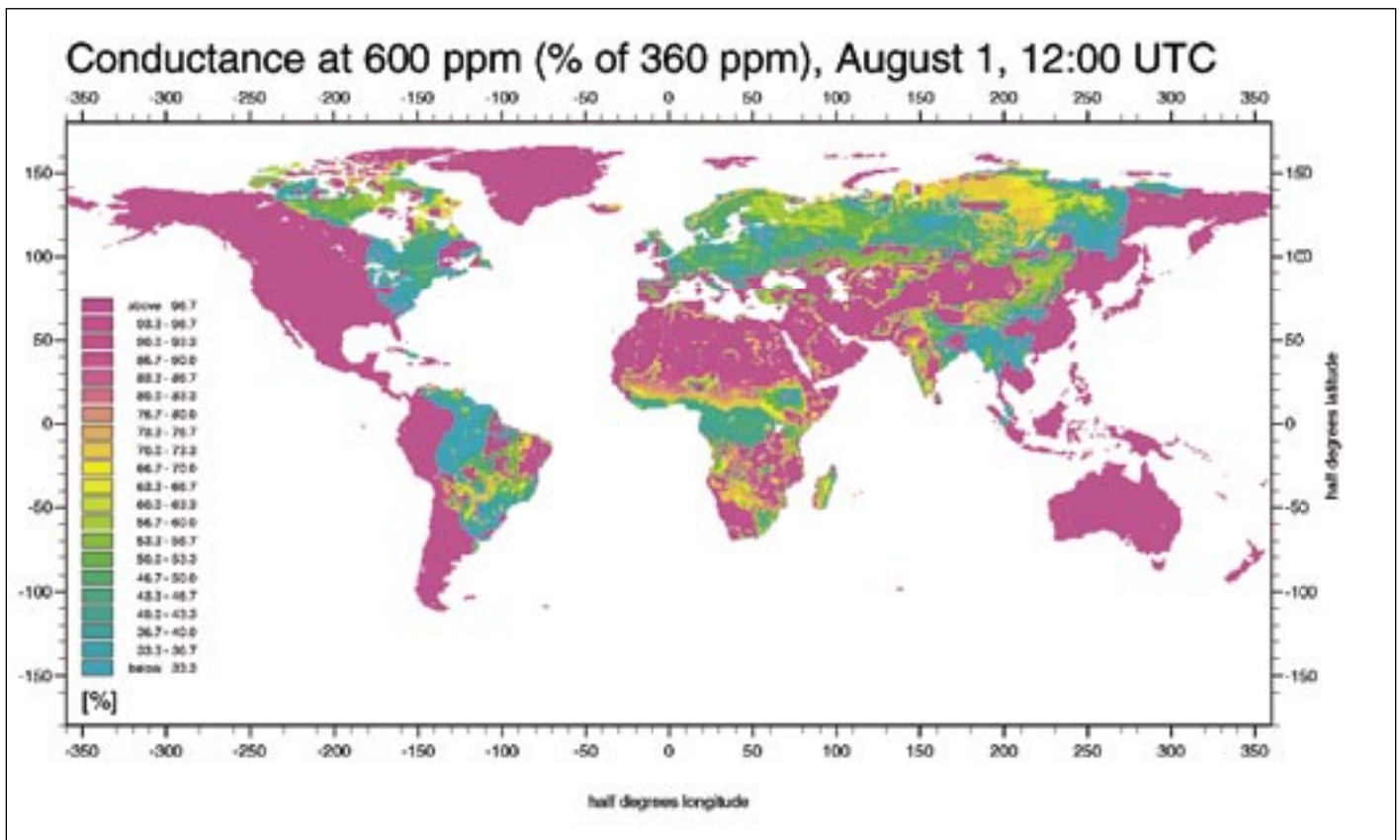


Abb. 1: Stomata-Konduktanz der Vegetation der Erde bei $600 \mu\text{l} \cdot \text{l}^{-1}$ CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre in Prozent des Wertes bei $360 \mu\text{l} \cdot \text{l}^{-1}$ für den 1. August um 12:00 UTC. Die Daten wurden mit zwei Vergleichsläufen von GIWACOM unter Variation der CO_2 -Konzentration und Beibehaltung aller anderen Umweltbedingungen berechnet. Die Ergebnisse gelten für 12:00 Uhr UTC. Auf der Nachtseite der Erde sind die Konduktanzen unverändert, da die Stomata geschlossen sind.

der Spaltöffnungen des Blattes) sowie ein Schema zur Aggregation der blattbezogenen Konduktanz über eine Flächeneinheit der Landoberfläche unter Berücksichtigung der Struktur der Vegetation. Die Strukturinformation bezieht GIWACOM auf mein High Resolution Biosphere Model (HRBM, Esser et al. 1994), das direkt angekoppelt wird.

GIWACOM wurde entwickelt, um „on-line“, d.h. unter Austausch

von Zustandsgrößen in jedem Zeitschritt, mit dem Klimamodell ECHAM-4 (Roeckner et al. 1996) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, gekoppelt zu werden.

Der Weg zum Modell GIWACOM

Neben der Aufstellung der Differentialgleichungssysteme ist deren Parameterisierung (siehe Kasten) eine große Herausforderung bei der Konstruktion eines Systemmodells. Für eine globale Parameterisierung mussten zunächst Parametersätze für möglichst unterschiedliche Klimazonen und Vegetationstypen der Erde gemessen werden. Meine weitere Strategie sah vor, mit Hilfe dieser Datensätze Korrelationen der Modellparameter mit leicht zugänglichen Klimavariablen, Bodendaten oder Vegetationseigenschaften zu finden, daraus Funktionen abzulei-

ten und diese dann während eines Modelllaufs zur flächendeckenden Berechnung der Modellparameter auf die gesamte Landoberfläche der Erde anzuwenden.

Langjährige Feldmessungen

Unsere experimentellen Arbeiten zur Parameterisierung von GIWACOM begannen 1993. Seitdem haben wir mehr als 500 Messserien an Pflanzenarten aus verschiedenen Klimazonen und Vegetationsformationen durchgeführt. Unter den Vegetationsformationen waren subpolare Tundren und Birkenwälder, boreale Wälder, gemäßigte Laub- und Nadelwälder, Gebirgswälder und alpine Staudenfluren, warmgemäßigte Wälder, mediterrane Wälder und Gariguen, subtropische feuchte und trockene Wälder, tropische Regenwälder, Savannen und Campos Cerrados. Stets wur-

JUSTUS-LIEBIG-
UNIVERSITÄT
GIESSEN

Prof. Dr. Gerd Esser

Institut für Pflanzenökologie
IFZ für Umweltsicherung
Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen
Tel.: 0641/99-35310, Fax: 0641/99-35309
e-mail: Gerd.Esser@bot2.bio.uni-giessen.de



Gerd Esser, Jahrgang 1942, studierte 1962 – 1969 in Heidelberg Biologie, Chemie, Physik und Geologie. 1970 Promotion. 1970 – 1973 wissenschaftlicher Leiter der Lemförder Orchideenzucht, 1973 – 1980 Projektleiter am Battelle-Institut Frankfurt/M. 1980 – 1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Hochschulassistent an der Universität Osnabrück. 1985 Habilitation für das Fach Biologie, Schwerpunkt Ökologie. 1990 bis 1991 Leiter des „Biosphere Dynamics Project“ am Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) in Laxenburg bei Wien. Seit 1991 Professor für Pflanzenökologie an der Universität Gießen. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt auf der Untersuchung biogeochemischer Kreisläufe und den Haushalten von Kohlenstoff, Mineralstoffen und Wasser. Ziel war die Entwicklung global einsetzbarer hochauflösender Modelle. Modelle wie das „Osnabrücker Biosphärenmodell“ (1983), das „High Resolution Biosphere Model“ (1994), das „Nitrogen Carbon Interaction Model“ (1997) und das „Gießen Global Generic Water Conductance Model“ (2000) sind international anerkannt. Prof. Esser ist Mitherausgeber mehrerer internationaler Periodika sowie Fachgutachter für das BMBF und die Kommission der EU.

den, soweit vorhanden, landwirtschaftliche Systeme mit berücksichtigt. Insgesamt haben wir mehr als 4000 Stunden unter oft schwierigen logistischen und klimatischen Bedingungen an natürlichen Pflanzenstandorten gemessen.

Bei den Messungen werden die transpirierenden Pflanzenorgane, meist die Blätter, in eine voll klimatisierte und beleuchtete Küvette eingeschlossen, die mit Luft unterschiedlicher Feuchte und unterschiedlicher Kohlendioxidkonzentration durchströmt wird. Aus der durch die Blätter verursachten Veränderung der Luftzusammensetzung lassen sich mithilfe eines komplexen Rechenverfahrens die Leitfähigkeiten der Stomata berechnen.

Auf diese Weise werden Sätze von Rohdaten erhalten, aus denen wiederum durch inverse Modellierung die Modellparameter abgeleitet werden können.

Inverse Modellierung: Die Aschenputtel-Methode

Die inverse Modellierung zur Bestimmung von Modellparametern aus aggregierten, d.h. durch mehrere Prozesse beeinflussten, Messgrößen ist ein trickreiches Verfahren, das es unter bestimmten Voraussetzungen erlaubt, messtechnisch nicht zugängliche Prozessparameter aus messbaren Größen abzuleiten. Es funktioniert so ähnlich wie das Auffinden der richtigen Braut im Märchen „Aschenputtel“: Man hat den richtigen Pantoffel (aggregierten Messwert) und muss herausfinden, welcher Fuß (Parametersatz) dazu passt.

Bei unseren Messungen war die Leitfähigkeit der Stomata die aggregierte Größe. Bekannt waren außerdem die Eingangsvariablen des Modells, wie Bodenwasserpotential, Bestrahlungsstärke, Temperatur, atmosphärische Kohlendioxidkonzentration etc. Nun musste durch Versuch und Irrtum ein Parametersatz gefunden werden, der für die jeweils gemessenen Eingangsvariablen die richtige, gemessene Konduktanz lieferte.

Parameterisierung

Unter Parameterisierung verstehen wir das Erstellen von Werten für die Parameter der Gleichungen. Ein einfaches Beispiel: Das exponentielle Wachstumsgesetz für Mikroorganismen-Populationen lautet: $\frac{dB}{dt} = k_1 \cdot B(t) - k_2 \cdot B(t)$ mit $B(t)$ der Biomasse, k_1 und k_2 sind Koeffizienten des Modells für die Nahrungsaufnahme und die Veratmung von Reserven. Diese Koeffizienten sind temperaturabhängig. So gilt zum Beispiel für den Respirationskoeffizienten: $k_2 = k_{2ref} \cdot q10^{\frac{T-T_{ref}}{10}}$. Die Parameter des Modells sind hier also: k_{2ref} , der Respirationskoeffizient bei Referenztemperatur, die Referenztemperatur T_{ref} , sowie die Temperaturwirksamkeit $q10$. Diese Parameter sind für eine Organismengruppe typisch (genetisch festgelegt). Sie müssen bei der Parameterisierung des Modells für diese Organismengruppe durch experimentelle Untersuchungen mit Werten versehen werden.



Wasserreicher, jedoch Mineralstoff-limitierter Wald von Polarbirken (*Betula tortuosa*) in Schwedisch-Lappland (Abisko).

Globalisierung

Die Parameter des Modells sind nach Auswertung der Experimente zunächst nur für die Messpflanzen unter den im Experiment herrschenden Bedingungen bekannt. Eine globale Parameterisierung erfordert dagegen, dass das Modell für jede auf der Erde vorkommende Konstellation von Vegetationseinheiten und Umweltvariablen definierte Werte für die Parameter zur Verfügung hat.

Dieser Schritt wurde vollzogen, indem für die an Messpflanzen bestimmten Parameter Korrelationen von diesen Parametern mit flächendeckend bekannten Variablen, wie

Klimadaten, Bodendaten, Vegetationsdaten, gesucht wurden. Dies macht Sinn: Pflanzen kommen nicht zufällig irgendwo vor, sondern ihre Physiologie ist an die Eigenschaften des Lebensraums angepasst. Daher kann man umgekehrt hoffen, aus den Eigenschaften des Lebensraums auf die Physiologie der Pflanzen schließen zu können. Wie sich zeigte, war dieser Ansatz erfolgreich.

Erste Ergebnisse: Entwarnung oder nicht?

Diese Frage interessiert natürlich in erster Linie. Trotzdem wird nie-

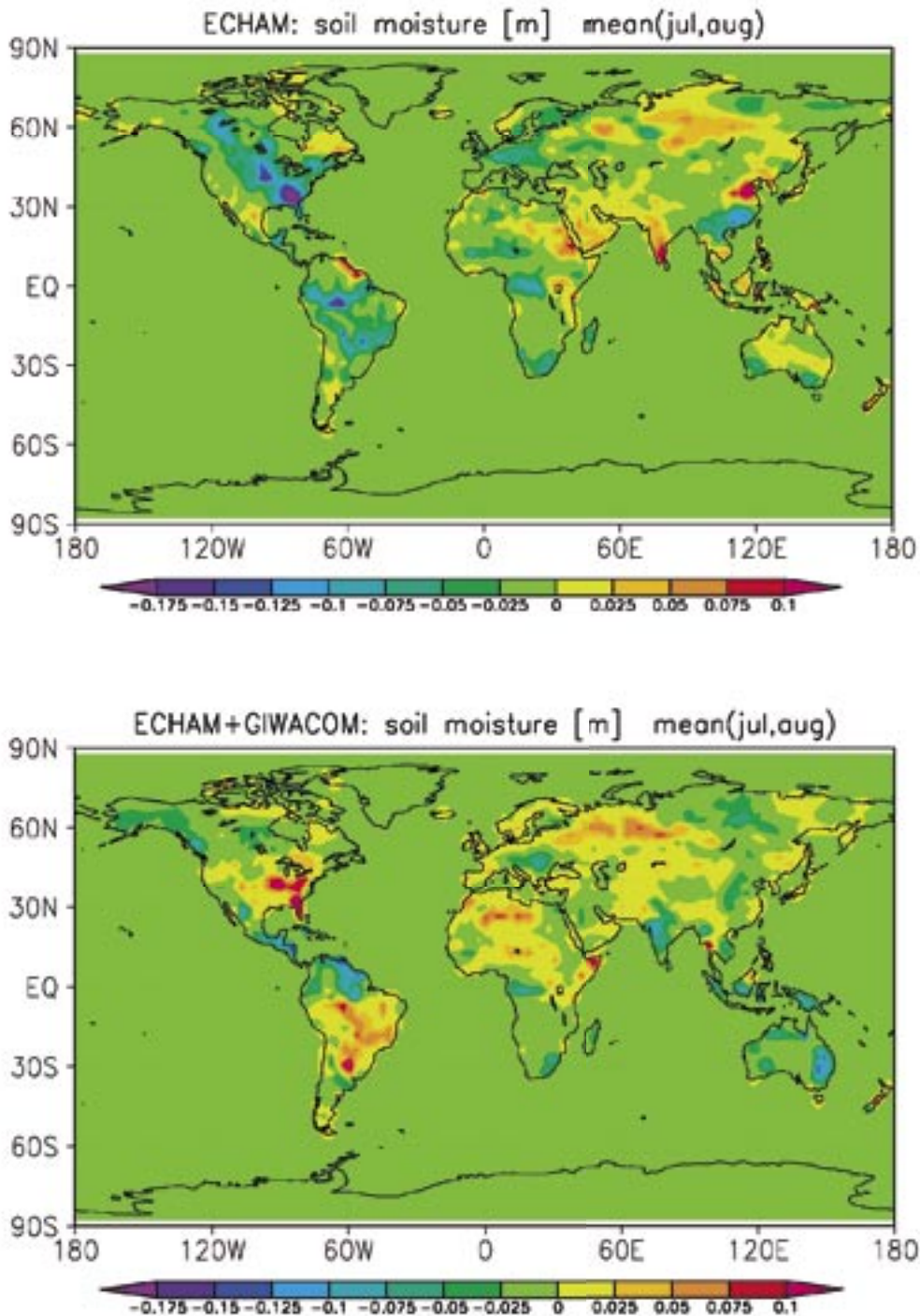


Abb. 2: Veränderung [\pm m Ws] der Bodenfeuchte in den Monaten Juli und August bei einer Verdoppelung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration. Oben: Ergebnis des Klimamodells ECHAM-4 mit traditioneller Parameterisierung der Landoberflächenprozesse. Unten: Ergebnisse der Modellkoppelung zwischen ECHAM-4 und dem Giessen Global Generic Water Conductance Model GIWACOM.

mand erwarten, dass sie sich anhand der ersten Ergebnisse eines neuen Modells vollständig beantworten lässt. Hier ist noch viel Arbeit zu leisten, bis alle technischen und inhaltlichen Einschränkungen einer so komplexen Modellkoppelung zur Zufriedenheit aller behoben sind. Aber einige aufsehenerregende Hinweise und Ergebnisse zeichnen sich bereits jetzt ab und sollen im Folgenden kurz angesprochen werden.

Was macht GIWACOM mit den Stomatikonduktanzen?

Beim Vergleich der Konduktanzen, die das Modell für eine zukünftig zu erwartende Verdoppelung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration (auf $600 \mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$) berechnet, mit den Konduktanzen für die ($360 \mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$) der 90er Jahre, ergibt sich eine Verminderung der Leitfähigkeit um bis zu 50% (Abb. 1). Dies ist ein sehr gravierender Befund, der – sollte er sich bestätigen – weitreichende Konsequenzen für den Wasserhaushalt der Landoberflächen der Erde hätte. Rückwirkungen der verminderten Verdunstung auf die Vegetation und den Boden sind dabei allerdings noch nicht berücksichtigt.

Solche Rückkoppelungsmechanismen sind aber zur Beurteilung möglicher zukünftiger Entwicklungen außerordentlich wichtig. So kann eine verminderte Transpiration dazu führen, dass ein höherer Level des Bodenwassers und damit ein weniger negatives Bodenwasserpotential während der Vegetationsperiode vorherrschen, was dem durch die erhöhte Kohlendioxidkonzentration bewirkten Schließen der Stomata entgegenwirken würde. Andererseits wird durch die geringere Transpiration der Transport latenter Wärme verringert und daher die Blatttemperatur ansteigen, was trotz stark verringerter Konduktanzwerte ein Absinken der Transpiration dämpft. Es gibt eine ganze Reihe weiterer negativer aber auch positiver Rückkopplungen.

Koppelung mit Klimamodellen: Wie wirken die Rückkoppelungen?

Zur Untersuchung dieser Frage haben wir GIWACOM an das Klimamodell ECHAM-4 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie gekoppelt und bereits einige Läufe mit den gekoppelten Modellen durchgeführt.

Insgesamt ist eine vergleichende Beurteilung der Ergebnisse dieser Modellläufe mit gekoppelten Modellen (ECHAM mit GIWACOM) mit denjenigen des Modells ECHAM-4 alleine schwierig. Das liegt daran, dass in den verschiedenen Modellläufen zur gleichen Modellzeit unterschiedliche Wettersituationen (Perioden schönen und schlechten Wetters) in Erscheinung treten, deren (kurzfristiger) Einfluss auf den Wasser- und Energiehaushalt den eigentlich interessanten (langfristigen) klimatologischen Einfluss übertrifft und damit maskiert. Wählt man jedoch zur Beurteilung des Einflusses langsam veränderliche Zustandsvariablen aus, so werden die Einflüsse der unterschiedlichen Wettersituationen gedämpft, und die klimatologischen Unterschiede treten deutlich hervor. Eine dieser geeigneten Zustandsvariablen ist der Wassergehalt des Bodens.

In Abbildung 2 ist die Situation der mittleren Bodenfeuchte für die Monate Juli und August für die Bedingung „doppelte vorindustrielle Kohlendioxidkonzentration“ dargestellt, wie sie nach der Mitte des 21. Jahrhunderts zu erwarten ist: Während das Klimamodell ECHAM-4 mit seiner bisherigen Beschreibung der Landoberflächenprozesse aufgrund des Treibhauseffekts in den meisten Gebieten der Erde einen Rückgang der Bodenfeuchte vorhersagt, berechnet das gekoppelte Modell ECHAM + GIWACOM in vielen Gebieten im Gegensatz dazu eine Zunahme der Bodenfeuchte. Es gibt aber auch bemerkenswerte Ausnahmen, z.B. Indien, Guayana, SO-Australien.

So vorläufig diese Ergebnisse sein mögen, zeigen sie doch, dass selbst nach mehr als 20-jähriger Arbeit der internationalen Wissenschaftsgemeinde durch Einführung neuerer und fundierterer Beschreibungen von Prozessen die Ergebnisse von Klimarechnungen noch immer auf den Kopf gestellt werden können. Diese Forschungsrichtung ist also keinesfalls ausgeschöpft sondern

erfordert auch in Zukunft intensive Anstrengungen, um zu einer verlässlichen Abschätzung der zukünftigen Lebensbedingungen auf der Erde zu kommen.

Ausblicke

Mit GIWACOM wurde ein Modell entwickelt, dessen neuartiges Strukturkonzept der vollständigen Orientierung an realen physiologischen Prozessen enorme Entwicklungsmöglichkeiten eröffnet: Es kann ohne Eingriffe in bestehende Modellteile nach Bedarf erweitert werden, wenn weitere Prozesse berücksichtigt werden sollen. Dann wird lediglich eine Erweiterung der Parameterisierung um die neuen Parameter erforderlich, da alle schon vorhandenen Parameter experimentell bestimmt wurden und daher nicht verändert werden müssen. Die Parameterisierung selbst kann durch neue experimentell gewonnene Daten fast beliebig verbessert und erweitert werden. •

Die Arbeiten wurden gefördert vom Bundesforschungsministerium, der Kommission der Europäischen Union und vom Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto.

LITERATUR

- Karl, T.R., 2001, Testimony before the committee on governmental affairs United States Senat, http://www.senate.gov/~gov_affairs/071801_karl.htm
- Esser, G.; Hoffstadt, J.; Mack, F.; Wittenberg, U., 1994, High Resolution Biosphere Model, Documentation, Model Version 3.00.00. Mitteilungen aus dem Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen, Heft 2, 68 S.
- Esser, G.; Hoffstadt, J., 2000, Giessen Global Generic Water Conductance Model (GIWACOM) Documentation: Model versions 2.10 and 2.20. Mitteilungen aus dem Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen Heft 4, 51 S.
- Roeckner, E.; Arpe, L.; Bengtsson, L.; Christoph, M.; Claussen, M.; Dümenil, L.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Schlese, U.; Schulzweida, U., 1996, The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. MPI Report No. 218, Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 90 S.