

## Biosphäre und globaler Wandel

Gundolf H. Kohlmaier, Peter Ramge, Stefan Habermehl

### Synopsis

During the last decade the terms *Biosphere* and *Global Change* have reached an important rank within international multidisciplinary research efforts. A considerable number of national, European and global integrated research projects on the interaction between biosphere, atmosphere and climate do exist. Some of the most important global problems are for instance the reduction of stratospheric ozone, destruction of the last nature and wildlife preserves and the global warming caused by increasing emission of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases into the atmosphere.

Within the context of the global carbon cycle the biosphere constitutes an important sink for atmospheric CO<sub>2</sub>. In order to evaluate the carbon fluxes between atmosphere and biosphere our working group has developed a high resolution global biosphere model, the so-called *Frankfurt Biosphere Model (FBM)*. Within a future greenhouse climate the primary production of plant material as well as the autotrophic and heterotrophic respiration will change considerably. With regard to the temperate and boreal ecosystems the *FBM* calculations have shown that there will be a substantial decrease in net primary production due to both elevated respiration rates and reduced water availability within the soils if we do not consider the CO<sub>2</sub> fertilization effect.

However, *Global Change* does not only stand for the changing climate, but also for the problems caused for instance by the increase of the world's population as well as by deforestations in tropical and nowadays also in boreal regions, heavily reducing the richness in species and having a considerable influence on the global climates via the emission of CO<sub>2</sub>.

We fully agree with the *Rio Declaration*, which calls for a fast transition from the expansive development of today to a model of development which fulfills the principle of sustainability.

*Biosphäre, globaler Wandel, Kohlenstoffkreislauf, Treibhauseffekt, CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt, Biosphärenmodell, Nettoprimärproduktion, Kohlenstoffbilanz, temperierte und boreale Wälder, Altersklassenverteilung.*

*Biosphere, global change, carbon cycle, greenhouse effect, CO<sub>2</sub> fertilization effect, biosphere model, net primary productivity, carbon balance, temperate and boreal forests, age class distribution.*

### Einleitung

Die Raumfahrt hat uns nicht nur den Blick in den Weltraum eröffnet, sondern vielmehr auch die Einzigartigkeit der Lebensbedingungen auf unserer Erde, dem blauen Planeten, vor Augen geführt. Wir sind besorgt, daß der Mensch durch seinen immer größeren Einfluß auf den Lebensraum diese günstigen Bedingungen verändert und das gewachsene Zusammenspiel von Flora, Fauna und geophysikalischer Umwelt zerstört. Roger Revelle, ein amerikanischer Naturforscher, hat 1957 den berühmten Satz formuliert, daß die Menschheit mit der zunehmenden Verbrennung fossiler Energieträger das größte geophysikalische Experiment eingeleitet hat, dessen ungewisser Ausgang die gesamte Menschheit betrifft. Wir sind besorgt, daß ein rasch eintretender Klimawandel die Nahrungsmittelversorgung der wachsenden Weltbevölkerung extrem erschwert und daß Inseln und küstennahe Gebiete durch den, wenn auch langsamer als zunächst angenommen steigenden Meeresspiegel vom Untergang bedroht sind. Wir befürchten, daß die natürlichen Ökosysteme dem erwarteten schnellen Wechsel zum Treibhausklima nicht in harmonischer Anpassung werden folgen können, so daß es zumindest zwischenzeitlich zum Zusammenbruch größerer Lebensgemeinschaften kommen könnte. Wir wissen auch, daß infolge des Bevölkerungswachstums, weltwirtschaftlicher Disparitäten und des extrem hohen Ressourcenverbrauchs der Industriestaaten der Nutzungsdruck auf die natürlichen Ökosysteme zunimmt; dies gilt sicher nicht nur für die Tropen und ihre Regen- und Trockenwälder, sondern auch für die borealen Wälder Kanadas und Sibiriens, die Weltmeere und insbesondere für dicht besiedelte Trockengebiete wie beispielsweise südlich der Sahara gelegene Teile Afrikas. In der Bevölkerung ist das Bewußtsein für Klima- und Umweltschutz in den letzten Jahren laufend gewachsen. Zahlreiche regionale, nationale und globale (Nichtregierungs-)Organisationen haben den Umweltschutz zum zentralen Thema erhoben. Umwelt- und Klimafragen haben auch Eingang in die Politik gefunden, etwa in Form von Parteien oder Regierungsinstitutionen.

Auch in der Wirtschaft ist der Umweltschutz zu einem wichtigen Faktor der Unternehmenspolitik geworden. Das Prinzip der Kreislaufführung (Recycling) hat einen entscheidenden Stellenwert erreicht.

Es wird klar erkannt, daß nicht nur die Begrenztheit der Ressourcen zu einem sparsamen Umgang mit den Rohstoffen zwingt, sondern daß vielmehr die endliche Belastbarkeit der Umwelt Anlaß zu einem Umdenken bezüglich der Produktionsprozesse geben sollte. Der amerikanische Ökonom Boulding hat von einem Paradigmenwechsel gesprochen, in dem der Übergang von der früheren »Cowboy«-Wirtschaft mit Ressourcen und Land ohne Grenzen zur »Raumschiff-Erde«-Wirtschaft mit Stoff-Kreislaufführung und immer knapper werdendem Raum, stattfindet.

### 1.1 Umweltpolitik und Forschungsprogramme zum globalen Wandel

Die Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro (Juni 1992) hat in der Agenda 21 ein globales Programm für Umwelt und Entwicklung für das 21. Jahrhundert festgelegt, in dem die Nachhaltigkeit von Entwicklung eine zentrale Zielgröße darstellt. In Rio selbst wurden auch schon die *Klimakonvention*, die *Konvention über biologische Vielfalt* und die *Walderklärung* dokumentarisch niedergelegt. Diese Vereinbarungen von Rio sind als Rahmenbedingungen in die Umweltpolitik der Bundesrepublik Deutschland eingegangen. Der Bundestag hat mit seinen beiden Enquete-Kommissionen, nämlich der *Kommission zum Schutz der Erdatmosphäre* und der *Kommission für Mensch und Umwelt* die wissenschaftlichen Grundlagen gesammelt und ausführlich erörtert.

In den letzten fünf bis zehn Jahren hat der Zusammenschluß von Forschungsgruppen im Rahmen nationaler, europäischer und internationaler Programme einen wachsenden Raum eingenommen. Bezüglich der globalen Probleme ist hier vielleicht an erster Stelle das internationale *Biosphären-Geosphären-Programm*, kurz *IGBP*, zu nennen, das vom International Council of Scientific Unions gegründet wurde. Das nationale Programm wird in Deutschland durch die Koordinationsstelle am Institut für Meteorologie der Freien Universität in Berlin und durch das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung betreut. Schon seit Beginn der globalen Betrachtungen standen die biogeochemischen Kreisläufe im Vordergrund, wie zum Beispiel der globale Kohlenstoffkreislauf, mit dem sich unser Arbeitskreis schon seit längerer Zeit beschäftigt. Für die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Klima sind insbesondere die folgenden drei Kernprojekte des IGBP zu nennen: *Global Change and Terrestrial Ecosystems*, *International Global Atmospheric Chemistry Project* und *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycles*.

Es ist interessant, daß hier die interdisziplinäre Zusammenarbeit die Grundvoraussetzung ist, um die globalen Wechselwirkungen von Biosphäre und Geo-

sphäre zu verstehen und zu analysieren. Bezüglich der Ökologie gibt es aus unserer Sicht noch eine zu geringe Beteiligung, zumindest von deutscher Seite. Dies hängt sehr wahrscheinlich damit zusammen, daß der Ökologe oft kleinräumig arbeiten muß, um stringente Aussagen machen zu können. Dadurch gerät er in Konflikt mit dem geforderten globalen Ansatz, vor allem weil bis heute noch keine verlässliche Methodologie entwickelt worden ist, um ein »upscaling« konsequent durchführen zu können. Hier ist meiner Ansicht nach die *Gesellschaft für Ökologie* gefordert mitzuarbeiten, um die großen globalen Probleme nicht unbeachtet an sich vorüberziehen zu lassen.

Neben dem erwähnten IGBP-Programm sollte das im Rahmen der UNESCO organisierte Programm *Man and Biosphere (MAB)* Erwähnung finden, das deutlich den Einbezug des Menschen und seiner Aktivitäten in den Vordergrund stellt. Im Zusammenhang mit der erwarteten Klimaänderung hat sich eine internationale Plattform gebildet, das *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, das nicht nur die wissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels analysiert, sondern sich auch mit dessen – über die Veränderung der Biosphäre und Geosphäre vermittelte – Einwirkung auf die menschlichen Gesellschaften beschäftigt.

### 1.2 Globale Umwelt- und Bevölkerungsprobleme

Im folgenden ist eine Zusammenstellung der wichtigsten globalen Probleme aufgeführt.

- **Bevölkerungszunahme** (weltweit jährlich 90 Mill., ca. 1,7%) bei gleichzeitiger wirtschaftlicher **Unter- bzw. auch Fehlentwicklung**, der **Nichtexistenz** selbst **elementarer, materieller und sozialer Voraussetzungen** wie **Nahrung, Bildung** und **Wohnung** für einen großen Teil der Weltbevölkerung
- Zunehmende **Industrialisierung u. Technisierung der Industriestaaten** und damit **ständig wachsende Umweltbelastung** und **steigender Ressourcenverbrauch**.

Von Seiten der Entwicklungsländer werden mit Recht die zunehmende Industrialisierung und Technisierung der Industrieländer, die weltwirtschaftlichen Disparitäten und die Ressourcenverschwendung kritisiert, wobei bis heute nur **ein Viertel** der Weltbevölkerung für **drei Viertel** der globalen Umweltbelastung verantwortlich zu machen ist. Deshalb wird auch eine drastische Reduktion der Umweltbelastungen von allen Industrieländern gefordert, bei gleichzeitiger Mithilfe bei der Entwicklung der Länder der Dritten Welt, beispielsweise im Sinne eines fairen Technologietransfers und des Ausgleichs von Handelsnachteilen.

Im Rahmen der zunehmenden Umweltbelastung sind heute vor allem drei Problemkreise von Interesse:

- **Beginnender zusätzlicher Treibhauseffekt und befürchteter rascher Klimaumschwung** durch CO<sub>2</sub>-Emission aus fossilen Energieträgern (ca. 6 Mrd t C) und Rodungen von Wäldern (ca. 1,5 Mrd t C) sowie durch die Emission von Methan, FCKW's und N<sub>2</sub>O.
- **Zerstörung der Artenvielfalt** und der Naturreservate in den Tropen, aber auch in den mittleren und höheren Breiten.
- **Beginnende Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht** und damit des Filters für die UV-B-Strahlung, hauptsächlich verursacht durch FCKW's und stratosphärisches NO<sub>x</sub>.
- **Weltweite Bedrohung der Böden durch Verseuchung** (Pestizide, Schwermetalle, Radioaktivität), **Verminderung des Wasserrückhaltevermögens** durch Verdichtung und Verlust der Vegetationsdecke (Rodungen) und damit **Austrocknung und Erosion**.

Das beginnende Treibhausklima wie auch die Reduktion des stratosphärischen Ozons ist auf eine Veränderung der in die Atmosphäre emittierten Spurengase zurückzuführen. Für die Reduktion der Ozonschicht sind im wesentlichen die Emissionen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) verantwortlich, wobei auf Grund internationaler Abkommen zu hoffen ist, daß die Produktion bis zum Jahre 2000 völlig eingestellt sein wird. Auf Grund der langen Lebensdauer der FCKW in der Atmosphäre wird die Regeneration der stratosphärischen Ozonschicht um mehrere Jahrzehnte verzögert, selbst bei sofortiger Einstellung aller Emissionen.

Mit dem Recht auf Entwicklung der Länder der Dritten Welt und der Schwellenländer wird es auch im Falle größter Anstrengungen der Industrieländer sehr schwierig sein, den globalen Ausstoß von CO<sub>2</sub> zu reduzieren. Gerade in diesem Zusammenhang ist es auch wichtig, die noch intakten Ökosysteme der Welt zu schützen, da die Vegetation und die Böden einen gewissen Ausgleich auf das Klima über ihre vermehrte CO<sub>2</sub>-Aufnahme unter erhöhtem atmosphärischem CO<sub>2</sub>-Partialdruck schaffen können. Hier gehen die Gründung von Naturreservaten und die Erhaltung der Artenvielfalt Hand in Hand mit dem Schutz des Klimas.

## 2. Struktur des Frankfurter Biosphärenmodells (FBM)

### 2.1 Hintergrund

Die Rolle der Biosphäre für die Entwicklung des zukünftigen Klimas ist vielschichtig; der vielleicht wichtigste Prozeß ist der CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen

Atmosphäre und den Ökosystemen der Erde bei einem Klimawechsel. Der zentrale Prozeß für die Aufnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ist die Photosynthese der Pflanzengesellschaften. Die in der Jahresbilanz durch Photosynthese gebildete pflanzliche Biomasse heißt Nettoprimärproduktion (NPP) und ist von der Bruttoprimärproduktion (BPP) zu unterscheiden, welche die gesamte Jahres-Assimilation beschreibt, von der im Durchschnitt etwa 50% durch die Wachstums- und Erhaltungsrespiration aufgezehrt wird. Bei einer Untersuchung der Nahrungsketten in den einzelnen Ökosystemen wird deutlich, daß global gesehen durchschnittlich über 90% der terrestrischen Primärproduktion direkt in die Detritus-Nahrungskette überführt wird, in der die Zersetzung des organischen Materials durch Mikroben und andere Bodenorganismen sowie die Wiederfreisetzung von anorganischen Nährstoffen abläuft. Nur weniger als 10% der pflanzlichen Produktion werden in die Weidegänger-Nahrungskette überführt, zu der die Herbivore, Carnivore und Übercarnivore gehören.

Im Rahmen unserer Untersuchungen des globalen Kohlenstoffkreislaufes wird einzig und allein das Element Kohlenstoff unabhängig von seinen unterschiedlichen Verbindungsformen bilanziert. Im terrestrischen Bereich ist die Masse der tierischen Lebewesen gegenüber der der pflanzlichen Organismen fast vernachlässigbar; sie bewegt sich im Bereich von 1‰ bis 1%. In der Bilanzierung der Kohlenstoffverbindungen tritt deshalb im Modell neben der pflanzlichen Biomasse der Wälder und Grasländer nur die entsprechende tote Biomasse in der Streuschicht und im Boden auf. Die tierischen Organismen einschließlich der Mikroorganismen werden nicht direkt bilanziert; sie haben jedoch eine wichtige Funktion in der Umwandlung der organischen Stoffe und bestimmen die Reaktionskinetik des Um- und Abbaus. Als Kohlenstoffflüsse zwischen der Atmosphäre und der Vegetation einschließlich der Böden werden die pflanzliche Nettoprimärproduktion, aufgelöst im saisonalen Verlauf, und die entsprechende heterotrophe Respiration bilanziert. Sowohl die Photosynthese wie auch die Zersetzung werden wesentlich durch die Parameter Lichtangebot, Niederschlag und bodennahe Temperatur gesteuert. Insgesamt werden im Frankfurter Biosphärenmodell 33 verschiedene Vegetationstypen unterschieden.

### 2.2 Kompartimentierung

Das FBM ist ein Kompartimentmodell, das den Kohlenstoff der terrestrischen Biosphäre in drei Kompartimente (Pools) aufteilt. Nach JANECEK & al. (1989) wird für jedes Ökosystem die gleiche Grundstruktur bezüglich der Kompartimente und der Flüsse verwendet.

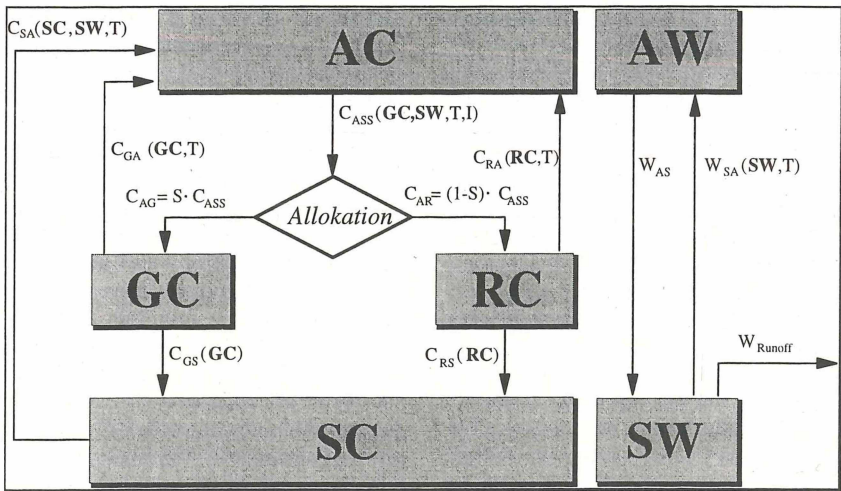


Abb. 1

**Modellstruktur, AC:** Kohlenstoffbestand in der Atmosphäre, **GC:** Kohlenstoffbestand in grüner Biomasse (Blätter, Feinwurzeln und Assimilatspeichern, **RC:** Kohlenstoffbestand der übrigen lebenden Biomasse, **SC:** Kohlenstoffbestand in Streu, Humus und toter Biomasse. **AW:** Wasser in der Atmosphäre, **SW:** Bodenwasser. Die Kohlenstoffflüsse werden mit **C**, die Wasserflüsse mit **W** bezeichnet, die Indices geben jeweils die Quelle und die Senke an. In den Klammern stehen die funktionalen Abhängigkeiten der Flüsse: **T:** stündliche Lufttemperatur, **I:** stündliche mittlere Intensität der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR). **S** ist ein normierter Allokationsfaktor ( $0 \leq S \leq 1$ ), der jahreszeitabhängig die Assimilate auf GC und RC verteilt. Die Zustandsvariable **SW** koppelt die Wasserbilanz mit dem Kohlenstoffkreislauf.

Der Gesamtkohlenstoffbestand der lebenden Biomasse (**BC**) teilt sich in zwei Kompartimente auf: Ein Kompartiment umfaßt die Biomasse mit einer kurzen Verweildauer, das sind Blätter, Feinwurzeln und Speicherassimilate. Dieses Kompartiment wird als **GC**-Kompartiment bezeichnet. Das andere Kompartiment bilanziert die vorwiegend holzige Biomasse mit struktureller Funktion und einer langen Verweildauer (**RC**-Kompartiment). Die Blattmasse wird als konstanter Anteil des **GC**-Kompartiments angenommen. Zur Modellierung der Zersetzung der toten Biomasse dient ein weiteres Kompartiment, welches den Kohlenstoff der Streuproduktion (Abfall) und des Humus umfaßt (**SC**-Kompartiment).

Zusätzlich besteht ein Bodenwasserkompartiment (**SW**-Kompartiment) zur Berechnung der aktuellen Bodenwasserverfügbarkeit. Der atmosphärische  $CO_2$ - und Wassergehalt (**AC** und **AW**) werden nur formal als Modellkompartimente betrachtet, aber nicht bilanziert. Sie können als »lokale Atmosphäre« über jedem Rasterelement angesehen werden und als Schnittstelle zu einem atmosphärischen Transport-

Fig. 1

**Model structure, AC:** Carbon content of the atmosphere; **GC:** Carbon content of green biomass (leaves), feeder roots and assimilate storage; **RC:** Carbon content of the woody parts of living biomass; **SC:** Carbon content of litter, humus and dead biomass; **AW:** Water content of the atmosphere; **SW:** Soil water. Carbon fluxes are marked with **C**, water fluxes with **W**, the indices denote the respective source or sink. Functional dependences of the fluxes in parentheses: **T:** hourly air temperature; **I:** hourly mean intensity of photosynthetically active radiation (PAR). **S** is a normalized allocation factor ( $0 \leq S \leq 1$ ), which seasonally distributes the assimilates to GC and RC, respectively. The state variable **SW** couples the water balance with the carbon cycle.

modell dienen. Abbildung gibt die Wasser- und Kohlenstoffflüsse zwischen den genannten Kompartimenten und der Atmosphäre wieder. Die Flüsse hängen von den Klimavariablen und den Bestandesgrößen der Kompartimente ab; beide sind wiederum zeitabhängig. Mit dieser Struktur berechnen wir die Bilanz der Kohlenstoffflüsse sämtlicher Pixel der festen Erdoberfläche in einer zeitlichen Auflösung von 24 Stunden. Der Vorteil dieser Struktur liegt in der begrenzten und gleichbleibenden Anzahl von Modellparametern.

Die vom Modell berechneten biosphärischen  $CO_2$ -Quellen und Senken hängen also ab von:

1. den externen Klimavariablen
2. den internen Variablen der Vegetationstypen:
  - a) Bestandesgrößen
  - b) Vegetationsparameter
3. der Vegetationsverteilung.

Abbildung 2 zeigt die Arbeitsweise des Modells am Beispiel eines Rasterelements mit dem Vegetationstyp

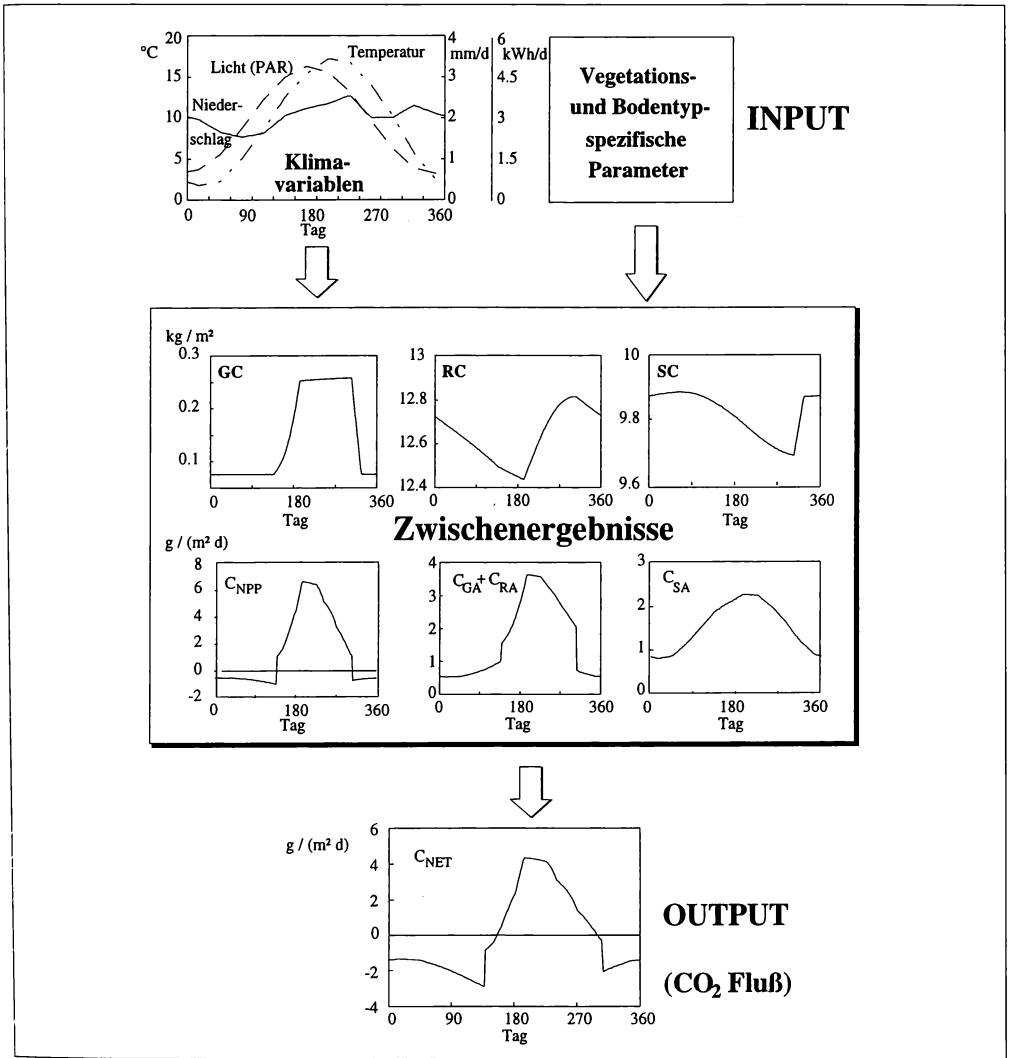


Abb. 2  
 Beispielhafte Darstellung des jährlichen Nettokohlenstoffaustauschlusses  $C_{NET}$  zwischen Atmosphäre und einem mit temperiertem, laubabwerfendem Wald besetzten Gitterelement. Die treibenden Klimavariablen erzeugen den jährlichen Verlauf des Nettokohlenstoffaustauschlusses  $C_{NET}$  zwischen der Atmosphäre und der Vegetation eines Gitterelements. Die jährlichen Verläufe des Kohlenstoffbestands in den Kompartimenten und der Flüsse  $C_{NPP} = C_{ASS} - C_{GA} - C_{RA}$  (Austauschfluß zwischen der lebenden Vegetation und der Atmosphäre),  $C_{GA} + C_{RA}$  (autotrophe Respiration) und  $C_{SA}$  (heterotrophe Respiration) sind als Zwischenergebnisse dargestellt.

Fig. 2  
 Exemplary depiction of the climate driven annual net carbon exchange flux  $C_{Net}$  between atmosphere and a grid element covered with temperate deciduous forest. The annual courses of the carbon content of the compartments as well as the fluxes  $C_{NPP} = C_{ASS} - C_{GA} - C_{RA}$  (exchange flux between living vegetation and atmosphere),  $C_{GA} + C_{RA}$  (autotrophic respiration) and  $C_{SA}$  (heterotrophic respiration) are depicted as intermediate results.

temperierter laubabwerfender Wald«. Für die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs ist in diesem Falle der Nettokohlenstoffaustausch zwischen einem Gitterelement der Biosphäre und der Atmosphäre

besonders wichtig (HEIMANN & KEELING 1989). Darüber hinaus berechnet das FBM eine Reihe von Zwischenergebnissen, die mit verfügbaren empirischen Daten über den Biomassebestand bestimmter

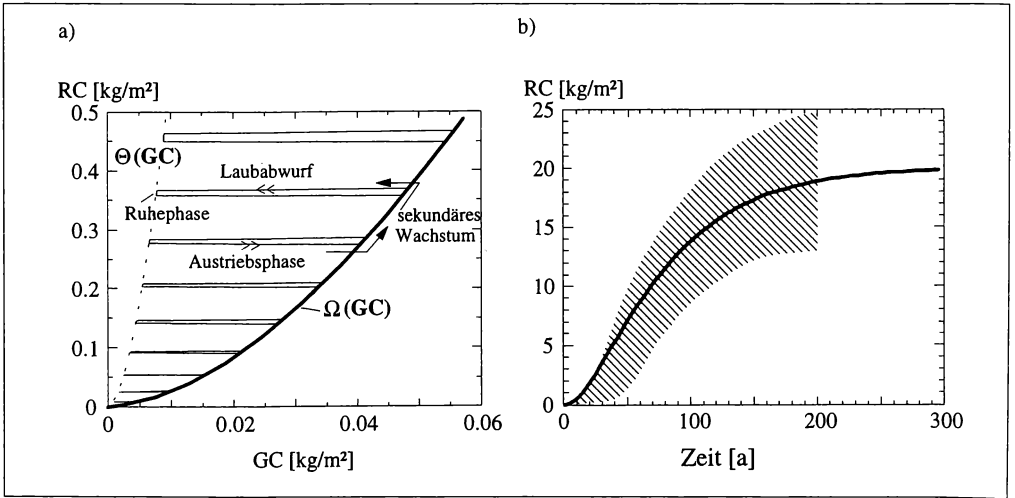


Abb. 3

a) Trajektorie in der GC-RC Phasenebene für einen Eichenbestand in den ersten 10 Jahren. b) Langzeitentwicklung des RC-Kompartiments. Die schraffierte Fläche gibt den Bereich von Feldmessungen an (SCHÖBER 1975).

Fig. 3

a) Trajectory in the GC-RC phase plane for an oak stand during the first decade. b) Long term development of the RC compartment. The hatched area denotes the range of results of field measurements (SCHÖBER 1975).

Regionen oder Aufzeichnungen über die Saisonalität der Blattmasse verglichen werden können. Dies ist eine wertvolle Hilfe für die Bewertung der Modellergebnisse und von großer Bedeutung bei der Verifikation des Modells.

### 2.3 Kohlenstoffallokation

Aus Abbildung 1 geht hervor, daß der Assimilationsfluß  $C_{ASS}$  vom Bestand des GC-Kompartiments abhängt, denn der GC-Bestand legt die Blattfläche fest. Ferner ist der Assimilationsfluß vom Bodenwassergehalt  $SW$  und den externen treibenden Variablen  $T$  (Temperatur) und  $I$  (Lichtintensität) abhängig. Dieser Fluß teilt sich im Folgenden auf. Einerseits müssen die zur Aufrechterhaltung der Photosynthese notwendigen Teile der Pflanze, Blätter und Feinwurzeln (GC-Kompartiment) aufgebaut und versorgt werden, andererseits dient ein Teil des Assimilats dem Aufbau des Stamms, der Äste und der Wurzeln (RC-Kompartiment). Zusätzlich müssen Assimilate in spezielle Speicherorgane transportiert werden, die zum GC-Kompartiment gerechnet werden.

Der Allokation, d.h. der Aufteilung des Assimilationsflusses in einen Fluß ins GC-Kompartiment und einen Fluß ins RC-Kompartiment liegt folgende Annahme zugrunde:

- Die Vegetation versucht, die photosynthetisch aktive Biomasse zu maximieren.

- Im Zustandsraum der Vegetation (GC-RC-Ebene) lassen sich »verbotene Zonen« festlegen.

Der Kohlenstoff des RC-Kompartiments hat eine strukturierende und versorgende Funktion für die grüne Biomasse des GC-Kompartiments. Die verbotenen Zustände erklären sich aus der Tatsache, daß es RC-Werte gibt, die nicht hinreichend groß sind, um diese Funktion zu erfüllen, mit anderen Worten, der Bestand an holziger Biomasse reicht nicht aus, um die Blätter zu tragen und zu versorgen. Der Minimalbestand an RC, der notwendig ist, um die Funktion der Assimilationsorgane (GC) zu gewährleisten, wird durch die Kurve  $\Omega(GC)$  festgelegt. Die Kurve selbst wurde unter Verwendung von Daten aus Felduntersuchungen bestimmt (REICHLE 1981). Theoretische Überlegungen und experimentelle Ergebnisse legen einen parabolischen Verlauf der Kurve, wie ihn Abbildung 3a zeigt, nahe (JANECEK & al. 1989).

### 2.4 Phänologie

Innerhalb eines Jahreszyklus lassen sich in der GC-RC-Phasenebene vier phänologische Phasen unterscheiden. Zusätzlich werden bezüglich der Phasen ohne Nettowachstum zwei Phänotypen, immergrüne und laubabwerfende Vegetation, unterschieden. Zur Steuerung der Phasenlage wird im FBM der Nettobiomassenzuwachs benutzt. Das System kann somit folgende Phasen durchlaufen:

Tab. 1  
**Bedingungen für den Wechsel der Phänophasen in der laubabwerfenden Vegetation. In der Ruhephase stellt  $C_{ASS}$  die potentielle Assimilation dar.**

	Austriebsphase	Wachstumsphase	Laubabwurfphase	Ruhephase
$\Delta BC$	$> 0$	$> 0$	$\leq 0$	$\leq 0$
$\wedge RC$	$> \Omega(GC)$	$= \Omega(GC)$	$< \Theta(GC)$	$= \Theta(GC)$

mit  $BC = C_{ASS} - C_{GA} - C_{GS} - C_{RA} - C_{RS}$  (Nettobiomassenzuwachs)

Tab. 1  
**Conditions for the change of phenophases of the deciduous vegetation. Within the dormancy phase  $C_{ASS}$  constitutes the potential assimilation.**

**2.4.1. Austriebsphase:**

Die Kohlenstoffassimilation ist größer als der Kohlenstoffverlust durch Respiration und Streuproduktion. Das System alloziert den größten Teil der Assimilate so lange ins **GC**-Kompartiment, bis die Trajektorie die  $\Omega(GC)$ -Kurve erreicht.

**2.4.2. Sekundäre Wachstumsphase:**

Es erfolgt ein gleichzeitiges Auffüllen des **GC**- und des **RC**-Kompartiments entsprechend der Funktion  $\Omega(GC)$ .

**2.4.3. Standby Phase**

**(nur bei immergrüner Vegetation):**  
 Gleichzeitige Abnahme von **GC** und **RC**.

**2.4.4. Abwurfphase**

**(nur bei laubabwerfender Vegetation):**  
 Am Ende der Vegetationsperiode wird das **GC**-Kompartiment durch Laubabwurf reduziert. Dieser Laubabwurf verläuft irreversibel, vollzieht sich mit konstanter Rate  $\Delta$  und wird – unabhängig von den treibenden Variablen – erst beendet, wenn die Trajektorie die Kurve  $RC = \Theta(GC)$  erreicht.

**2.4.5. Ruhephase:**

Die Ruhephase beginnt, wenn die Trajektorie die  $\Theta(GC)$ -Kurve erreicht. Respirations- und Streuverluste werden so verteilt, daß die Trajektorie der Kurve  $RC = \Theta(GC)$  folgt. Diese Phase wird verlassen, wenn die Wetterbedingungen wieder einen Nettobiomassenzuwachs erlauben.

tions- und Respirationsflüsse haben einen unterschiedlichen saisonalen Verlauf und eine unterschiedliche Temperaturabhängigkeit. Im FBM wird die NPP entsprechend der Physiologie als Bilanz der beiden Prozesse modelliert.

**2.5.1.  $CO_2$ -Aufnahme**

Der effektive Assimilationsfluß kann in Form einer Produktfunktion berechnet werden (RICHTER 1985). Diese besteht aus einem Term, der die Abhängigkeit vom Licht und der Kronenstruktur beschreibt; jeweils ein weiterer Term beschreibt die Temperaturabhängigkeit sowie die Bodenwasserabhängigkeit der Assimilation. Die Abhängigkeit der Photosynthese von der Strahlungsintensität wird nach MONSI & SAEKI (1953) berechnet. Das einfallende Licht wird hierbei durch das Kronendach abgeschwächt. Die Temperaturabhängigkeit der Assimilation wird durch eine Optimumkurve mit den drei Werten Maximal-, Minimal- und Optimaltemperatur der Photosynthese beschrieben. Die Abhängigkeit der Assimilation von der Verfügbarkeit des Bodenwassers **SW** wird durch eine Sättigungsfunktion beschrieben. Der bodenwasserabhängige Faktor ist Null beim permanenten Welkepunkt und geht in die Sättigung über, wenn sich der Bodenwassergehalt der Feldkapazität nähert.

Die Kohlenstoffassimilationsrate ist im allgemeinen von der Konzentration des  $CO_2$  in der Atmosphäre abhängig. Die Veränderung der Kohlenstoffassimilationsrate ( $\alpha$ ) infolge erhöhter  $CO_2$ -Konzentration kann unter Verwendung folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\alpha(CO_2, T) = \alpha_0(CO_2^0, T^0) \cdot \frac{f(CO_2, T)}{f(CO_2^0, T^0)}$$

hierbei ist  $\alpha_0$  die Assimilationsrate bei der Referenzkonzentration  $CO_2^0$  und der Referenztemperatur  $T^0$ . Die Funktion  $f(CO_2, T)$  hängt von der  $CO_2$ -Konzentration  $c_i$  im Innern der Blätter und vom  $CO_2$ -Kompensationspunkt  $\Gamma^*$  ab.

**2.5 Berechnung der Flüsse**

Die Nettokohlenstoffaufnahme der Pflanzen ist die Differenz der Kohlenstoffassimilation,  $C_{ASS}$  (also der Kohlenstoffixierung durch Bruttophotosynthese), und der autotrophen Respiration,  $C_{GA}$  und  $C_{RA}$ . Assimila-

$$f(\text{CO}_2, T) = \frac{c_1 - \Gamma^*(T)}{c_1 - 2 \cdot \Gamma^*(T)}$$

In guter Näherung kann  $c_1$  bei  $C_3$ -Pflanzen und bei  $C_4$ -Pflanzen als proportional zur Außenkonzentration von  $\text{CO}_2$  angenommen werden,  $c_1 \approx 0.7 \cdot \text{CO}_2$  für  $C_3$ -Pflanzen.

$\Gamma^*$  ist der  $\text{CO}_2$ -Kompensationspunkt und berechnet sich nach KIRSCHBAUM (1993) zu  $\Gamma^* = 40.6 \cdot e^{(9.46/T-25)/T+273.2}$ . Die Temperatur stellt hier die mittlere Temperatur der Lichtstunden des Tages in Grad Celsius dar.

Das FBM ist also in der Lage, die Reaktion der Vegetation auf veränderte Klimabedingungen auch unter Berücksichtigung der physiologischen Wirkung einer  $\text{CO}_2$ -Konzentrationssteigerung ( $\text{CO}_2$ -Düngung) zu beschreiben.

### 2.5.2. Freisetzung von $\text{CO}_2$ durch autotrophe Respiration

Die Kohlenstoffflüsse aus der lebenden Biomasse,  $C_{GA}$  und  $C_{RA}$ , in die Atmosphäre resultieren im wesentlichen aus der Erhaltungs- und der Wachstumsatmung. Die Respirationsflüsse für das **GC**- und das **RC**-Kompartiment werden auf die gleiche Weise modelliert. Die Respiration ist proportional zur Größe des Kompartiments und wächst exponentiell mit der Temperatur. Das FBM verwendet einen konstanten  $Q_{10}$ -Wert für alle Ökosysteme (RYAN 1991).

### 2.5.3. Streuproduktion

Die durch den Streufall verursachten Flüsse ins Bodenkompartment,  $C_{GS}$  und  $C_{RS}$ , sind proportional zur jeweiligen Bestandsgröße des Quellkompartiments. Der Verlust des **GC**-Kompartiments vollzieht sich bei der laubabwerfenden Vegetation während der Abwurfphase mit konstanter Rate.

### 2.5.4. Freisetzung von $\text{CO}_2$ durch heterotrophe Respiration

Der Einfluß der klimatischen Variablen auf die Zersetzung der toten organischen Materie im Boden (Humus) wird nach einem Konzept von FUNG & al. (1987) modelliert. Dabei wird eine lineare Abhängigkeit des Respirationsflusses  $C_{SA}$  von der Kompartimentsgröße angenommen. Die heterotrophe Respiration ist auch vom Bodenwassergehalt abhängig. Diese Abhängigkeit wird analog der Bodenwasserabhängigkeit der Assimilation modelliert (siehe oben). Die heterotrophe Respiration wächst exponentiell mit der Temperatur, wobei für verschiedene Bodentypen unterschiedliche  $Q_{10}$ -Werte gelten sollen.

### 2.5.5. Wasserflüsse

Die aktuelle Evapotranspiration  $W_{SA}$  wird aus dem Produkt der potentiellen Evapotranspiration  $W_{PET}$ ,

berechnet nach THORNTHWAITE (1948), und einer bodenwasserabhängigen Funktion berechnet.  $W_{Runoff}$  setzt sich sowohl aus dem Oberflächenabfluß als auch aus dem Drainage-Abfluß zusammen und ist das Wasser, das vom Boden bei gegebener Feldkapazität nicht mehr gehalten werden kann.

## 3. Das Verhalten der Vegetation der gemäßigten und borealen Ökosysteme der nördlichen Hemisphäre in einem zukünftigen Treibhausklima

In einer ersten Anwendung des im vorangehenden Kapitel vorgestellten Frankfurter Biosphärenmodells wurden Gleichgewichtsrechnungen für das heutige Klima sowie für das vom Hamburger Max-Planck-Institut (MPI) für Meteorologie berechnete Klima, das sich aus dem dort verwendeten General Circulation Model (GCM) bei einer effektiven Verdreifachung des heutigen atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalts (» $3x\text{CO}_2$ -Klima«) ergibt, durchgeführt. Die effektive  $\text{CO}_2$ -Konzentration schließt dabei die anderen Treibhausgase wie Methan, Distickstoffoxid und FCKW formal mit ein. Bei einem »Business-as-usual-Szenario« wird schon in knapp 100 Jahren eine Verdopplung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehaltes erwartet, entsprechend einem Gesamtanstieg der Spurengase von  $3x\text{CO}_2$  effektiv. Die hier vorgestellten, entkoppelten Gleichgewichtsrechnungen für die beiden Klimate stellen nur einen ersten Schritt zur Abschätzung der Auswirkungen eines vorgegebenen anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionsszenarios auf Klima und Vegetation dar, weil die Rückkopplung zwischen Klimaänderung und  $\text{CO}_2$ -Quellen/Senkenverhalten der Vegetation und der Böden nicht berücksichtigt wird. Die durchgeführten Rechnungen erlauben jedoch zumindest über das Vorzeichen der Differenz des Gesamtkohlenstoffgehalts der Ökosysteme für die beiden Klimaregime eine Aussage und damit über eine zu erwartende positive oder negative Rückkopplung (oder Neutralität) der Biosphäre im Rahmen einer anthropogen induzierten globalen Erwärmung. Die hier vorgestellte Untersuchung berücksichtigt die Reaktion der potentiellen Vegetation und der Böden auf eine Änderung im jährlichen Verlauf von Temperatur und Niederschlag, sowie den direkten Einfluß der erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf die pflanzliche Produktion. Die Entwicklung direkter Eingriffe des Menschen in die Ökosysteme (Rodungen, Änderungen in der Bewirtschaftung von Waldgebieten, usw.) wird zunächst separat betrachtet. Die vorläufige Beschränkung auf natürliche Systeme erlaubt jedoch auch einige Aussagen über das Verhalten bewirtschafteter Flächen. So erreicht z. B. die intensivste landwirtschaftliche Nutzung die Produktion der potentiellen



Vegetation am gleichen Ort. Im Rahmen eines zu erwartenden Treibhausklimas sind für die höheren Breiten die größten Klimaveränderungen zu erwarten.

Die hier vorgestellten Rechnungen beziehen sich deshalb auf die folgenden acht Vegetationstypen der mittleren und höheren Breiten mit einer Gesamtfläche von  $36.2 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>:

- **Laubabwerfende Wälder**, Gehölze und  
Gesträuche
- **Immergrüne Wälder**, Nadelgehölze und  
Gesträuche
- **Mischwälder** und **Tundra-Ökosysteme**.

Dabei sollen im folgenden beispielhaft die Laub- und Nadelwälder der mittleren und höheren Breiten sowie die Tundra näher betrachtet werden.

### 3.1 Ausgangsdaten zur Charakterisierung der Ökosysteme und der Klimate

Der die Vegetation beschreibende Teil des FBM ist durch ein zweidimensionales gewöhnliches Differentialgleichungssystem charakterisiert, dessen Parameter durch den Vegetationstyp bestimmt sind. Zur Bestimmung der regionalen Verteilung der obengenannten Vegetationstypen wurde eine modifizierte Vegetationskarte nach MATTHEWS (1983) mit einer Auflösung von  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  verwendet. Die zwei zusätzlichen Differentialgleichungen für Bodenkohlenstoff und Bodenwasser wurden in Bezug auf Feldkapazität und Welkepunkt gemäß der Bodenkarte von WILSON (1985) mit der gleichen räumlichen Auflösung und einer Zuordnung von Vegetationstyp und Bodenrespirationstyp nach FUNG (1987) parametrisiert. Hiermit ist die Abbildung jedes Ortsgitterpunktes auf die Parameter des dort geltenden Differentialgleichungssystems gegeben.

Zur vollständigen Bestimmung sind nun noch die zeitabhängigen treibenden Klimavariablen notwendig. Für die Rechnungen zur Referenz-Klimasituation wurden hierfür die Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag dem Klimaatlas von LEEMANS & CRAMER (1992) entnommen. Dessen Monatsmittelwerte wurden aus Wetterstationsdaten der Jahre 1930–1960 gewonnen und auf ein Gitternetz von  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  projiziert. Für unser Modell wurden die Monatsmittelwerte auf mittlere Tageswerte glatt interpoliert. Der stündliche Lichtverlauf wurde aus der Geometrie des Sonnenstands und einem mittleren globalen Bewölkungsgrad bestimmt, während den Tagestemperaturmitteln stündliche Temperaturwerte gemäß mittleren täglichen Maximum- und Minimumtemperaturen (hier vegetationsstypabhängig) aufgeprägt wurden.

Zur Bestimmung des mittleren jährlichen Verlaufs von Niederschlag und Temperatur im  $3xCO_2$ -Klima wurden die Resultate des GCM (general circulation model, räumliche Auflösung: ca.  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ ) des MPI für Meteorologie in Hamburg verwendet, die auf ein  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  Gitter linear interpoliert wurden.

### 3.2 Resultate der Modellrechnung zum Übergang vom $1xCO_2$ - zum $3xCO_2$ -Klima

Mit den oben charakterisierten Inputdaten wurden die Modellgleichungen an den Gitterpunkten der betrachteten Vegetationstypen für beide Klimadatensätze bis zum Erreichen des Klimaxzustandes iteriert. Im saisonalen FBM ist der Klimaxzustand durch einen stabilen Grenzyklus gekennzeichnet, d.h. die Zustandsvariablen **GC**, **RC**, **SC** und **SW** erreichen nach Ablauf eines Jahres wieder ihren Ausgangswert.

Von Gitterelement zu Gitterelement unterscheidet sich dieser stabile Grenzyklus aufgrund der Variation in den treibenden Klimavariablen (innerhalb eines Vegetationstyps) und unterschiedlichen Parameterwerten (zwischen unterschiedlichen Vegetationstypen).

Die Ergebnisse der Reaktion der Vegetation auf die Klimaveränderung werden in den Abbildungen 4–6 dargestellt. Dabei wird zunächst in Abb. 4 gezeigt, daß sich der Schwerpunkt der Netto-primärproduktion, NPP, in den betrachteten Vegetationszonen nach Norden verschiebt. Offenbar findet am südlichen Rand der Waldgebiete ein deutlicher Produktionsrückgang statt, der auf die verminderte Bodenwasserverfügbarkeit zurückzuführen ist, während in den höheren Breiten die Produktion infolge der Erwärmung und der länger werdenden Vegetationsperiode zunimmt.

Das Verhalten auf der Biom-Ebene bezüglich einer Klimaveränderung ist in Abb. 5 dargestellt. Hier erkennt man, daß nach unserem Modell die klimatischen Veränderungen durch den Treibhauseffekt zu einem Rückgang in der Produktion sowohl der Nadel- wie auch der Laubwälder führt, wenn die atmosphärische  $CO_2$ -Erhöhung nicht berücksichtigt wird. Erst unter Einbeziehung des  $CO_2$ -Düngungseffektes findet eine Steigerung der Produktion in allen drei Biomen statt. Obwohl es heute mehr als 1000 Experimente zum  $CO_2$ -Düngungseffekt (vergl. z.B.: ROGERS & al. 1994) gibt, die eine Zunahme der Photosynthese und der pflanzlichen Produktion unter  $CO_2$ -Düngung bestätigen, ist man immer noch nicht sicher, wie sich langfristig ein Pflanzenbestand unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration entwickeln wird. Dies hängt im wesentlichen damit zusammen, daß verschiedene Pflanzenarten, selbst wenn sie zur gleichen Gruppe der C3-, C4- oder CAM-Pflanzen gehö-

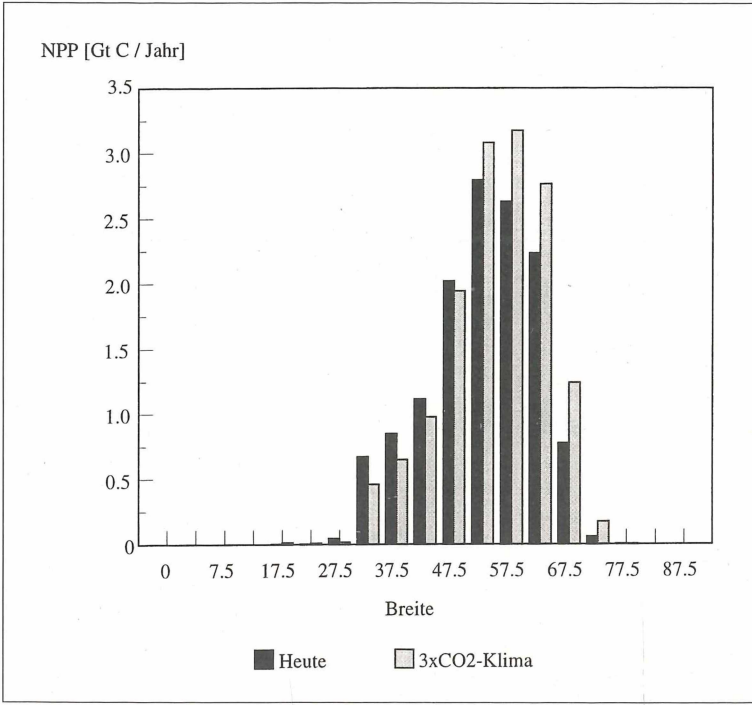


Abb. 4 Vergleich der Breitenverteilung (5°-Gürtel) der NPP der gemäßigten und borealen Wälder sowie der Tundra-Ökosysteme für die heutige Situation und das 3xCO<sub>2</sub>-Klima.

Fig. 4 Intercomparison of the the latitudinal distribution (5° belts) of the NPP of the temperate and boreal forests as well as tundra ecosystems for the present situation and for the 3xCO<sub>2</sub> climate, respectively.

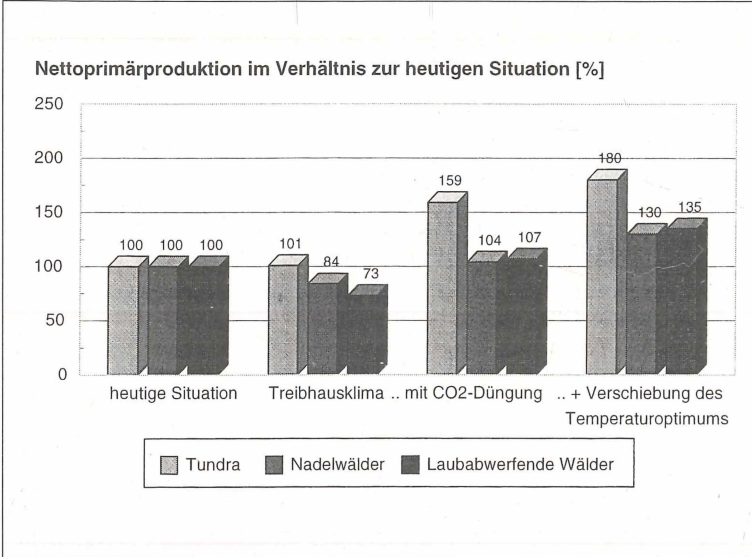


Abb. 5 Mit dem FBM berechnetes Antwortverhalten ausgewählter Biome im Treibhausklima. Die Abbildung zeigt Veränderungen der NPP relativ zur heutigen Situation (100%) unter verschiedenen Annahmen bezüglich der Reaktion der Vegetation auf eine Klimaänderung.

Fig. 5 Response of selected biomes to a greenhouse climate as calculated with the FBM. The graph shows the NPP changes in relation to the present situation (100%) under different assumptions of the vegetation's reaction on climate change.

ren, oft ein ganz unterschiedliches Response-Verhalten zeigen, daß sich die Ergebnisse von Kurz- und Langzeitexperimenten (heute bis max. fünf Jahre) unterscheiden, daß das Phänomen der langfristigen Akklimatisierung nicht verstanden ist und daß die Nährstoff- und Wasserversorgung einen wichtigen Einfluß haben. Wichtig ist auch, nicht nur das Antwortverhalten der Pflanzen, sondern das des

gesamten Ökosystems einschließlich des Bodens, kurz die Ökosystem-Response in bezug auf den CO<sub>2</sub>-Austausch zu betrachten.

Nach der Theorie der Photosynthese, in der die Konkurrenz von Carboxylierung und Oxygenierung des Substrats Ribulose-bis-phosphat eine wichtige Rolle spielt, sollte der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt zu einer eindeutigen Steigerung in Photosyntheserate und

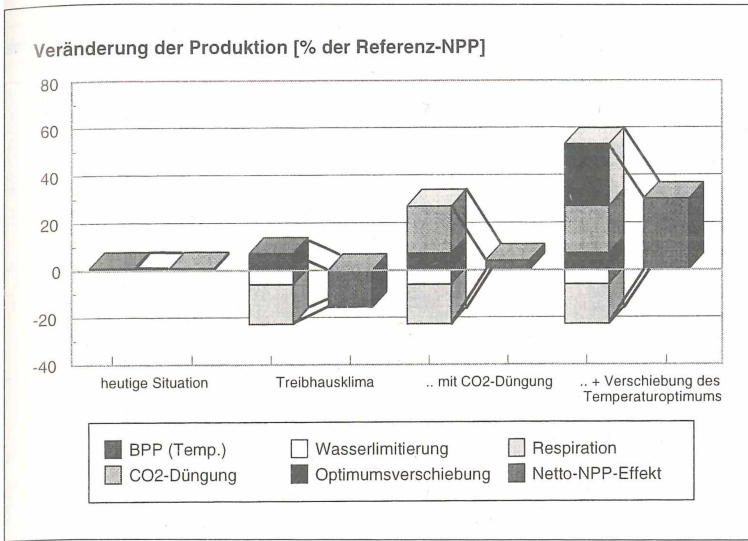


Abb. 6  
Netto-NPP-Effekt unter verschiedenen Annahmen bezüglich der Reaktion der Vegetation auf eine Klimaänderung und Bruttoeffekt der Annahmen auf Primärproduktion und Respiration.

Fig. 6  
Net NPP effect under different assumptions of the vegetation's reaction to climate change and gross effect of the assumptions on primary production and respiration.

NPP führen. Da die Oxygenierung stärker temperaturabhängig ist als die Carboxylierung, sollte in den wärmeren Zonen der Erde dieser Effekt stärker ausgeprägt sein als in den höheren Breiten mit tieferen Temperaturen. Insgesamt erkennen wir aus der Abb. 5, daß die modellmäßige Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts eine wesentliche Erhöhung der Produktion nach sich zieht. Schließlich wird unter »Anpassung« der von LONG & DRAKE (1992) berichtete Effekt verstanden, nämlich daß unter erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt das Temperaturoptimum der Photosynthese sich zu höheren Werten verschiebt, so daß es im zu erwartenden Treibhausklima gleichsam zu einem synergistischen Effekt von Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Erhöhung kommt.

In Abb. 6 wird noch einmal detailliert beschrieben, wie die Produktionsänderung zustande kommt. Beim Übergang vom heutigen Klima zum Treibhausklima würde die Gesamtphotosyntheserate und damit die Bruttoprimärproduktion, BPP, durch die Temperatur erhöht werden, wenn nicht andere einschränkende Faktoren zu berücksichtigen wären. Hier ist einmal die reduzierte Bodenwasserverfügbarkeit zu nennen, die wegen der stärkeren Verdunstung im Treibhausklima zu erwarten ist. Für die NPP findet ein Rückgang deshalb statt, weil die autotrophe Respiration erhöht wird. Erst bei Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes wird die BPP so verändert, daß sie die negativen Effekte von Wassereinschränkung und verstärkter Atmung kompensiert. Schließlich wird die Produktion, wie oben schon beschrieben, noch einmal dadurch verstärkt, daß sich das Temperaturoptimum bei erhöhten CO<sub>2</sub>-Werten zu höheren Temperaturen verschiebt, so daß es zu einer nennenswerten Erhöhung der NPP kommen kann.

#### 4. Kohlenstoffbilanz, Holzeinschlag und Regeneration in den temperierten und borealen Wäldern

##### 4.1 Ergebnisse der UN-ECE/FAO-Studie (United Nations - Economic Commission for Europe and Food and Agriculture Organisation) von 1992

Die Studie benennt auf Länderbasis die Waldfläche, den Bestand an Rundholz, den jährlichen Nettozuwachs (NAI) und den jährlichen Holzeinschlag (NAF). Die Studie konzentriert ihr Augenmerk auf einschlagbare (»exploitable«) Wälder, mit der Definition, daß der jährliche Zuwachs an Industrieholz hier 1.4 m<sup>3</sup> pro ha und Jahr übersteigt, und daß die Waldgebiete nicht unter Naturschutz stehen oder anderweitig dem Holzeinschlag nicht zugänglich sind. Wälder, die diese Kriterien nicht erfüllen, heißen »nicht einschlagbare« (»unexploitable«) Wälder. Gehölze stehen zwischen Wäldern und Grasländern mit einer Baumbedeckung von 5 bis 20%. In der nachfolgenden Tabelle zeigen wir, daß die Gesamtfläche aller einschlagbaren Wälder etwa 900 Millionen Hektar beträgt, während die gesamte Wald- und Gehölzfläche mit etwa 2100 Millionen Hektar mehr als das Doppelte beträgt.

Ursprünglich, vor den umfangreichen Landnutzungsänderungen in den heutigen Industriestaaten, betrug die Waldfläche etwa 2800 Millionen Hektar, wie man Karten der potentiellen Vegetation (MATTHEWS 1983) entnehmen kann. Für die Kohlenstoffbilanzierung sind nun einige Umrechnungsfaktoren notwendig. Jährlicher Zuwachs und Bestandesvolumen wird in der Forstwirtschaft in m<sup>3</sup>

Tab. 2

a) Fläche, stehende Biomasse und jährlicher Nettozuwachs (Net Annual Increment, NAI) für fünf Weltregionen einschlagbarer Wälder;  
 b) Resultierende Kohlenstoffbilanz (1990) aus der Differenz zwischen NAI und jährlichem Einschlag (Annual Fellings, AF).

	Frühere UdSSR	Kanada	USA	Europa	Pazifik	Total
Gesamtfläche von Wäldern und übrigem Waldland [10 <sup>6</sup> ha]	942	453	296	195	178	2064
a) Fläche einschlagbarer Wälder [10 <sup>6</sup> ha]	414	112*	196	133	43	898
Mittlere stehende Biomasse pro Flächeneinheit [t C/ha]	66	72	64	75	63	67.5
Gesamte stehende Biomasse [Gt C]	27.3	8.0	12.5	10.0	2.7	60.6
Mittleres NAI [t C/ha-yr]	0.91	1.03	2.03	2.34	1.13**	1.38
a/b) Gesamt-NAI [Mt C/yr]	378	115	397	312	49	1251
b) Gesamter jährlicher Einschlag [Mt C/yr]	280	85	335	222	28**	950
Resultierende Kohlenstoffbilanz [Mt C/yr]	98	30	62	90	21	301

\* 223·10<sup>6</sup> ha nach KURZ & al. (1992) für produktive Wälder: boreale Wälder, östlich und westlich, kühle und temperierte Wälder, Wälder der Korbilleren.

NAI (jährlicher Nettozuwachs), AF (jährliche Einschläge) beziehen sich auf totale Biomasse, Konversionsfaktor: 0.54 t C m<sup>-3</sup> Rundholz (BIRDSEY 1992).

Pazifik beinhaltet Australien, Neuseeland und Japan.

\*\* Daten sind nur für Australien vorhanden; Neuseeland und Japan sind extrapoliert.

Rundholz (mit oder ohne Rinde) angegeben. Durch einen Expansionsfaktor, der je nach Holzart und Alter des Bestandes zwischen 1.4 und 2.6 liegt (BIRDSEY 1992), kann das Rundholz in das Gesamtholzvolumen (Stamm + Äste + Wurzeln) überführt werden – der angeführten Tabelle wird ein mittlerer Faktor von 2.0 zugrundegelegt. Das Holzvolumen kann entsprechend seiner Dichte in Biomasse im Trockengewicht (durchschnittlicher Faktor 0.54), die Trockenbiomasse in Kohlenstoffmasse durch den Faktor 0.5 überführt werden. Berücksichtigt man alle diese Faktoren, so ergibt sich eine durchschnittliche Umrech-

Tab. 2

a) Area, standing biomass and net annual increment (NAI) for five world regions of exploitable forests;  
 b) Resulting carbon balance (1990) from the difference between NAI and annual fellings (AF).

nung von 1 m<sup>3</sup> Rundholz in 0.54 t Kohlenstoff der Gesamtbiomasse. So sind auch die Zahlen für die mittlere stehende Biomasse und die gesamte Biomasse in t Kohlenstoff zu verstehen. Auch der ursprüngliche jährliche Holzzuwachs in m<sup>3</sup> Rundholz sowie der Holzeinschlag wurden mit diesem Faktor multipliziert. Es ist nun interessant, daß nach dieser Studie der gesamte jährliche Zuwachs in jeder der hier angeführten großen Ländergruppen frühere UdSSR, Kanada, USA, Europa und den Pazifikstaaten Japan, Australien und Neuseeland zur Zeit größer ist als der jährliche Holzeinschlag. In der Bilanz heißt dies, daß

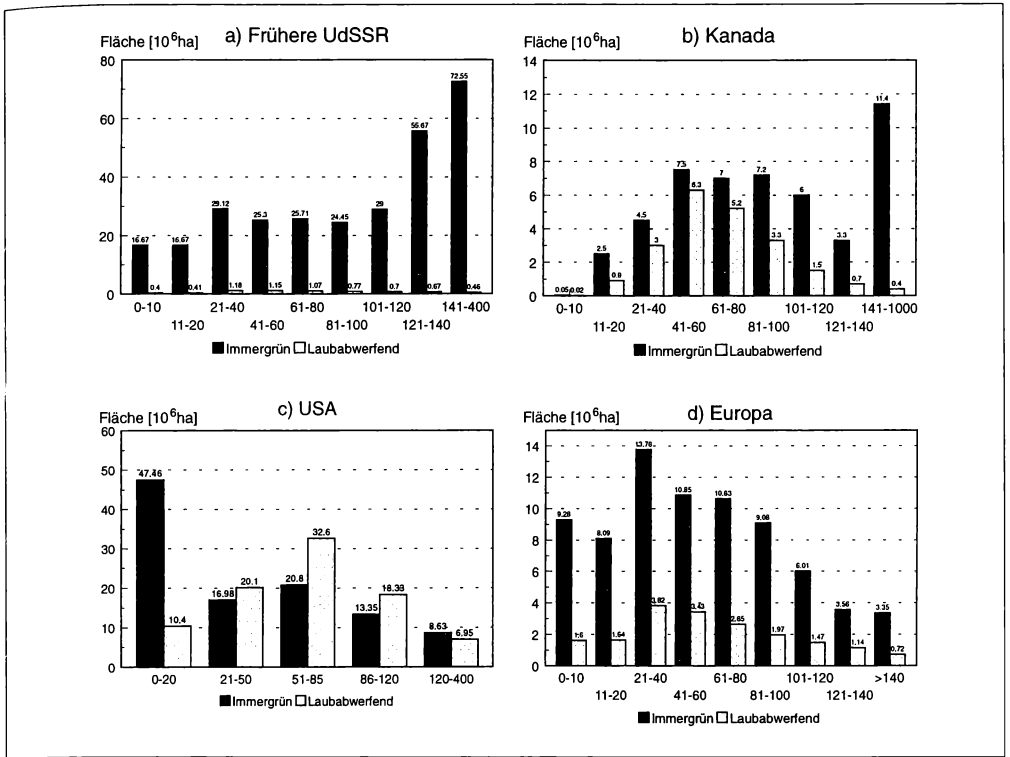


Abb. 7

Altersklassenverteilungen der untersuchten einschlagbaren Waldkomplexe nach der UN-ECE/FAO-Studie (UN 1992)

jährlich etwa 300 Millionen t Kohlenstoff von den einschlagbaren Wäldern gebunden werden, wobei den Wäldern Europas ein Anteil von 90 Millionen t zukommt. Diese Bilanz schließt noch nicht ein, daß mit einem Zuwachs an Biomasse eine gleichzeitige Zunahme an Bodenhumus in Form von organischen Kohlenstoffverbindungen verknüpft sein kann. Nach SEDJO (1992) könnte dieser zusätzliche Speicherungseffekt die Bilanz um den Faktor 1.2 bis 1.6 erhöhen, entsprechend einer Speicherung von 360 bis 480 Millionen t jährlich. In einer vorläufigen Hochrechnung haben wir auch den Anteil der zusätzlichen Speicherung in den nicht einschlagbaren Wäldern abgeschätzt und kommen dann zum Schluß, daß von beiden Waldgruppen insgesamt jährlich 460 bis 960 Millionen t Kohlenstoff gebunden werden könnten. Was sind nun die Ursachen für die dargestellte Senke der temperierten und borealen Wälder?

– Aus der nachhaltigen Forstwirtschaft in Deutschland wissen wir, daß die potentiell einschlagbare Holzmenge stark von der Vorgeschichte des Waldes, insbesondere von seiner Altersklassenverteilung,

Fig. 7

Age class distributions of the investigated exploitable forest complexes after the UN/ECE/FAO study (UN 1992)

abhängen kann. Nehmen wir als Beispiel einen Fichtenwald, der im Durchschnitt nach 80 Jahren eingeschlagen wird. Für eine kontinuierliche und konstante Holzversorgung wäre es optimal, wenn die Altersklassenverteilung so strukturiert wäre, daß gleichgroße Areale für jeden Jahrgang vorliegen. Wenn nun die letzte Altersklasse eingeschlagen und danach sofort wieder neu begründet wird, haben wir die ideale, konstante und nachhaltige Holzversorgung. Aus Abbildung 7, welche die Resultate der ECE/FAO-Studie nach Ländergruppen zusammenfasst, geht hervor, daß diese Gleichverteilung in keinem einzigen Fall realisiert ist.

– Der jährliche Zuwachs an Holz wird relativ zur jährlichen Holzernte immer dann begünstigt sein, wenn neue Flächen mit Wald begründet werden. Umgekehrt wird die Bilanz verschlechtert, wenn im Rahmen der Landnutzungsänderung Wald in Agrarland umgewandelt wird. Die ECE/FAO-Studie kommt für die Zeitperiode von 1980 bis 1990 zu dem Schluß, daß in Europa während dieser Perio-

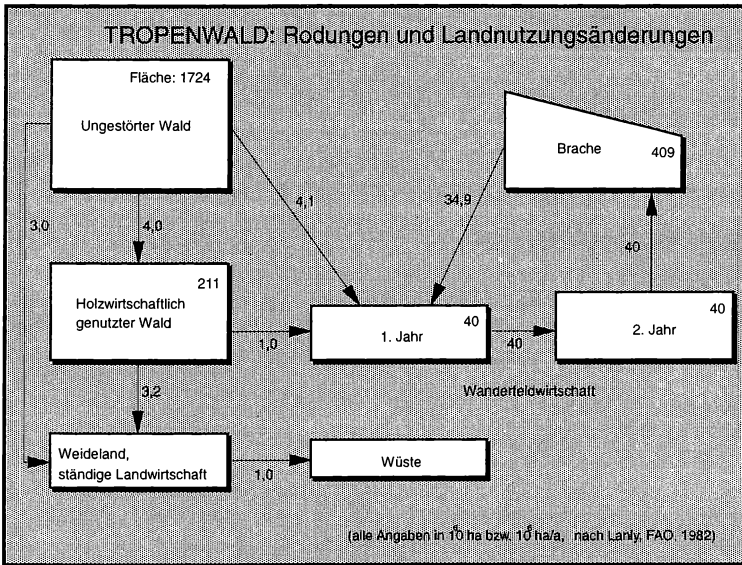


Abb. 8  
**Rodungen und  
Landnutzungsänderungen in  
den tropischen  
Regenwäldern**

Fig. 8  
**Deforestation and land use  
changes in the tropical rain  
forests.**

de die Waldfläche um 3.14 Millionen Hektar durch Aufforstung (2 Millionen Hektar) und natürliche Ausweitung (1.2 Millionen Hektar) gewachsen ist, während andererseits Flächenverluste von 1.9 Millionen Hektar auftraten, so daß es zu einem Nettozuwachs von 1.9 Millionen Hektar kam.

- Für die frühere Sowjetunion einschließlich Weißrußland und Ukraine wird für den gleichen Zeitraum ein Nettozuwachs von 23 Millionen Hektar angegeben, während für die Vereinigten Staaten von Amerika ein Verlust von 3.2 Millionen Hektar genannt wird und für Kanada keine Meldungen vorliegen.
- Vergleiche mit den Ertragstafeln für Holzzuwachs aus den Jahren 1920 bis 1930 (SCHÖBER 1975; KRAMER 1982) zeigen für die deutschen Wälder, daß der Zuwachs pro Flächeneinheit damals wesentlich geringer war als er heute trotz Luftverschmutzung beobachtet wird. Es ist allerdings sehr schwer zu sagen, ob der schon erwähnte CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt einen wesentlichen Anteil an der gesteigerten Produktion trägt, ob der Eintrag von Stickstoff durch Luftverschmutzung die Produktion steigert oder ob es sich um andere, z.B. klimatische Faktoren handelt.
- Schließlich spielt die Nachfrage nach Holz eine ganz wesentliche Rolle für den Einschlag. Wenn bei heute relativ geringer Nachfrage die Bilanz im Sinne einer Kohlenstoffspeicherung noch positiv ist, so kann sich dies durch Veränderungen am internationalen Holzmarkt sehr rasch ändern.

## 5. Die Rolle der tropischen Wälder im globalen Kohlenstoffzyklus

Die Wälder der Tropen gehören mit ihren großen Biomassendichten zu den wichtigsten Kohlenstoffspeichern der Erde. Umwandlungen von Wald in Acker- und Weideland, in für die Forstwirtschaft genutztes Land oder in Siedlungsflächen und Industriegebiete führen zu einer Freisetzung von Kohlenstoff, letztlich in Form von Kohlendioxid, das in der Atmosphäre angereichert wird. Man schätzt, daß heute aufgrund von Landnutzungsänderungen in den tropischen und subtropischen Regionen Lateinamerikas, Afrikas und Asiens jährlich etwa 1.4 bis 1.6 Gt Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt werden. Anfang der achtziger Jahre waren ca. 50 Millionen Hektar jährlich von Landnutzungsänderungen in unterschiedlichem Ausmaß betroffen. 30 bis 40 Millionen Hektar davon waren Sekundärwald, der hauptsächlich im Rahmen der Wanderfeldwirtschaft (shifting cultivation) gerodet wurde. LANLEY (1982) hat in einer umfangreichen, auf der Waldinventur 1980 der FAO basierenden Studie für die Entwicklung des Tropenwaldes eine jährliche Abnahme von 11.3 Millionen Hektar errechnet. Der Anteil der betroffenen Flächen ist in Abbildung 8 dargestellt, dabei werden die 4.1 Millionen Hektar jährlich in die Wanderfeldwirtschaft überführt. Etwa 4 Millionen Hektar werden durch selektiven Holzeinschlag jährlich genutzt, während drei Millionen Hektar direkt in Weide- und Ackerland überführt werden. Es zeigt sich auch, daß beim selektiven Holzeinschlag eine weitere Überführung in Weideland bzw. in Wanderfeldwirtschaft schon vorprogrammiert ist.



Für die Zerstörung der Tropenwälder in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre sind die Zahlen der Landnutzungsänderungen offenbar noch angestiegen; MYERS (1991) schätzt die jährlich gerodete Fläche für die Feuchttropen alleine auf 14 Millionen Hektar (= 1.8 %/a), die FAO gibt sie etwas konservativer mit 17 Millionen Hektar pro Jahr für den gesamten Tropenwald (= 0.9 %/a) an.

Kennt man die entsprechende stehende Biomasse pro Flächeneinheit, läßt sich aus diesen Angaben die Gesamtkohlenstoff-Freisetzung berechnen. Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß die mittlere lebende Biomasse im tropischen Wald großen Schwankungen unterliegt (Mittelwert zwischen 80 und 180 t Kohlenstoff pro Hektar), das gleiche gilt für den Bodenkohlenstoff (Mittelwert zwischen 50 und 120 t Kohlenstoff pro Hektar).

Aufgrund der großen Unsicherheit in der Abschätzung des biotischen Kohlenstoffs und aufgrund der weiteren Unsicherheiten in den jährlichen Rodungsraten ist es verständlich, daß für die CO<sub>2</sub>-Freisetzungen auch eine relativ große Spanne angegeben werden muß. Nach Anhörung vieler Experten hat die Enquete-Kommission des Bundestages »Schutz der Erdatmosphäre« in ihrem letzten Bericht (1992) die CO<sub>2</sub>-Freisetzung auf 1.6 ± 1.0 Gt C pro Jahr beziffert. Diese Zahlen schließen nicht nur den Anteil mit ein, der bei der Brandrodung direkt als CO<sub>2</sub> freigesetzt wird (im Durchschnitt nur etwa 30% der stehenden Biomasse), sondern ebenfalls jene Anteile, die zunächst in der toten Biomasse zurückbleiben und dann langsam zu CO<sub>2</sub> und anderen anorganischen Verbindungen abgebaut werden. Bei konstanter jährlicher Rodungsrate ist die gesamte betroffene Biomasse und die zu CO<sub>2</sub> oxidierte Biomasse identisch, weil jeweils aus den vergangenen Jahren der gleiche Anteil an CO<sub>2</sub> addiert wird, der zunächst nicht verbrennt. Verändert sich jedoch die Rodungsrate – nimmt sie z.B. exponentiell zu – so ergibt sich für den zeitverzögernden Prozeß im Rahmen eines linearen Modells folgender Ausdruck:

$$F_{\text{atm}}(t) = F(t) \cdot \left\{ \alpha + \frac{1}{n} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{1}{k} \cdot (1 - e^{-nk}) \right\}$$

mit der Wachstumskonstanten  $k$ , wobei die Rodungsrate exponentiell anwachsen soll:  $F(t) = F_0 \cdot e^{kt}$ ,  $\alpha$  der Anteil ist, der sofort verbrennt und der Parameter  $n$  die Zahl der Jahre angibt, bis der restliche, nicht verbrannte Anteil zersetzt ist. Für ein typisches Beispiel mit  $\alpha = 0.3$ ,  $n = 10$  und  $k = 0.05$  (5%ige Steigerungsrate der Rodung) erhalten wir  $F_{\text{atm}} = 0.85 F(t)$ . Daraus folgt, daß für das typische Zahlenbeispiel Rodungsrate und Freisetzungsraten sich nicht nennenswert unterscheiden.

Für eine Gesamtbilanzierung des Kohlenstoffs müssen der Bodenkohlenstoffpool und auch der Pool

der bei der Holzverarbeitung entstehenden Produkte mitbilanziert werden. Je nachdem, ob das Holz in der Papierverarbeitung, Spanplattenproduktion oder als Bauholz verwendet wird, sind entsprechend unterschiedliche Verweildauern anzusetzen.

In den letzten Jahren ist ein leichter Rückgang der tropischen Waldrodungen zu verzeichnen, wobei dies auf verstärkte Anstrengungen im Umweltschutz durch die Regierungen der Länder der Dritten Welt zurückzuführen ist, desweiteren auf den Rückgang des Einflusses ausländischer Gesellschaften im Holz-, Papier- und im Nahrungsmittelsektor sowie auf internationale Abkommen zwischen den Ländern der Ersten und der Dritten Welt. Es sei hier noch bemerkt, daß der Rückgang der Rodungen und des Tropenholzeinschlags eine gewisse Kompensation erfahren hat durch die Verlagerung der Einschläge in die borealen Waldgebiete, hauptsächlich Kanadas und Sibiriens.

### Zusammenfassung

Biosphäre und globaler Wandel haben innerhalb des letzten Jahrzehnts einen wichtigen Stellenwert im Rahmen von internationalen, multidisziplinären Forschungsanstrengungen eingenommen. So gibt es zahlreiche nationale, europäische und internationale Forschungszusammenschlüsse, die Programme koordinieren, in denen z.B. die Wechselwirkung von Biosphäre, Atmosphäre und Klima untersucht wird. Zu den wichtigsten globalen Problemen gehören – neben dem hier näher diskutierten zusätzlichen anthropogenen Treibhauseffekt – die Reduktion des stratosphärischen Ozons und damit einhergehend die verstärkte UV-Einstrahlung, sowie die Zerstörung der letzten großen Naturreservate durch Landnutzungsänderungen; sei es, um zusätzliche Flächen für die Nahrungsmittelversorgung zu gewinnen oder um die letzten ökonomischen Ressourcen auszuschöpfen. Die Biosphäre bildet im Rahmen des Kohlenstoffkreislaufs auch eine wichtige Senke für atmosphärisches CO<sub>2</sub>. Das in unserem Arbeitskreis entwickelte Frankfurter Biosphärenmodell kann die Elementarprozesse von Photosynthese und Respiration klima- und ortsabhängig simulieren. Bei einer Auflösung der Landoberfläche von 0.5° x 0.5° sind etwa 60000 Gitterflächenelemente (»Pixel«) zu berücksichtigen; die zeitliche Auflösung des FBM liegt bei einem Tag bzw. einer Stunde im Falle der Flußberechnungen.

In einem zukünftigen Treibhausklima werden die Produktion an pflanzlichem Material wie auch die Respiration stark verändert. Betrachtet man die Wälder der mittleren und höheren Breiten, so erhält man in unserem ökophysiologisch orientierten Modell einen Produktionseinbruch durch die erhöhte Respiration und die gleichzeitig verminderte Wasser-

verfügbarkeit im Boden, wenn nicht der – noch umstrittene und nicht vollständig untersuchte – CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt miteingeschlossen wird.

»Global Change« bedeutet aber nicht nur eine Veränderung des Weltklimas, sondern eben auch den direkten Einfluß einer jährlich um knapp 90 Millionen anwachsenden Bevölkerung auf die Weltökonomie wie auch auf die Biosphäre. Die Rodungen in den tropischen Wäldern haben schon seit längerer Zeit Anlaß zu großer Sorge gegeben; nicht nur, weil dadurch die Artenvielfalt ganz wesentlich eingeschränkt wird, sondern weil es über die CO<sub>2</sub>-Freisetzung auch einen direkten Einfluß auf das Klima gibt.

Wir stimmen voll mit der Rio-Deklaration überein, nach der möglichst schnell ein Übergang von der jetzigen, expansiven Entwicklung in ein Entwicklungsmodell gefunden wird, bei dem das Prinzip der Nachhaltigkeit (sustainability) erfüllt ist.

**Danksagung:** Die vorgestellten Ergebnisse des Frankfurter Biosphärenmodells wurden mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie sowie der Kommission der Europäischen Union erzielt.

## Literatur

- BIRDSEY, R. A. (1992). Carbon Storage and Accumulation in United States Forest Ecosystems. General Technical Report WO59.
- Enquête-Kommission »Schutz der Erdatmosphäre« des Deutschen Bundestages (Hrsg.) (1992). Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Erster Bericht der Enquête-Kommission »Schutz der Erdatmosphäre« des 12. Deutschen Bundestages. Economica, Bonn.
- FUNG, I. Y.; TUCKER, C. J.; PRENTICE, K. C. (1987). Application of Advanced Very High Resolution Radiometer Vegetation Index to Study Atmosphere-Biosphere Exchange of CO<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.* 92(D3): 2999–3015.
- HEIMANN, M.; KEELING, C. D. (1989). A Three Dimensional Model of Atmospheric CO<sub>2</sub> Transport Based on Observed Winds: 2. Model Description and Simulated Tracer Experiments. In: Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas, Geophysical Monograph 55 (D. H. Peterson, Hrsg.), Washington DC: 237–275.
- JANECEK, A.; BENDEROTH, G.; LÜDEKE, M. K. B.; KINDERMANN, J.; KOHLMAIER, G. H. (1989). Model of the Seasonal and Perennial Carbon Dynamics in Deciduous-Type Forests Controlled by Climatic Variables. *Ecological Modelling* 49: 101–124.
- KIRSCHBAUM, M. U. F. (1993). A Modelling Study of the Effects of Changes in Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration, Temperature and Atmospheric Nitrogen Input on Soil Organic Carbon Storage. *Tellus* 45B: 321–334.
- KRAMER, H. (1982). Nutzungsplanung in der Forsteinrichtung. J. D. Sauerländer, Frankfurt/M.
- LANLY, J.-P. (1982). Tropical Forest Resources. FAO Forestry Paper 30. FAO, Rom.
- LEEMANS, R.; CRAMER, W. P. (1991). The IIASA Database for Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, and Cloudiness on a Global Terrestrial Grid. RR-91-18. IIASA, Laxenburg(Austria).
- LONG, S. P.; DRAKE, B. G. (1992). Photosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation and Rising Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations. In: Crop Photosynthesis: Spatial and Temporal Determinants, (N. R. Baker, H. Thomas, Hrsg.), Elsevier: 69–103.
- MATTHEWS, E. (1983). Global Vegetation and Land Use: New High-Resolution Data Bases for Climate Studies. *J. Clim. Appl. Meteor.* 22(3): 474–487.
- MONSI, M.; SAEKI, T. (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. Journ. Bot.* 14: 22–52.
- MYERS, N. (1991). Tropical Forests, Present Status and Future Outlook. *Climate Change* 19: 3–32.
- REICHLE, D. E. (Hrsg.) (1981). Dynamic Properties of Forest Ecosystems. International Biological Program, Vol.23. Cambridge University Press, Cambridge u. a.
- REVELLE, R.; SUESS, E. (1957). Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO<sub>2</sub> during the Past Decades. *Tellus* 9(1): 18–27.
- RICHTER, O. (1985). Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme. Mathematische Methoden und Modelle. VCH, Weinheim u. a.
- ROGERS, H. H.; RUNION, G. B.; KRUPA, S. V. (1994). Plant Response to Atmospheric CO<sub>2</sub> Enrichment with Emphasis on Roots and the Rhizosphere. *Environmental Pollution* 83: 155–189.
- Ryan, M. G. (1991). Effects of Climate on Plant Respiration. *Ecological Applications* 1(2): 157–167.
- Schober, R. (1975). Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. J. D. Sauerländer, Frankfurt am Main.
- SEDJO, R. A. (1992). Temperate Forest Ecosystems in the Global Carbon Cycle. *Ambio* 21(4): 274–277.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38: 55–94.
- UN Economic Commission for Europe; FAO (Hrsg.)



- (1992). The Forest Resources of the Temperate Zones – Main Findings of the UN-ECE/FAO 1990 Forest Resource Assessment. ECE/TIM/60. United Nations, New York.
- UN Economic Commission for Europe; FAO (Hrsg.) (1992). The Forest Resources of the Temperate Zones – The UN/ECE/FAO 1990 Forest Resource Assessment. Volume 1: General Forest Resource Information. ECE/TIM/62. United Nations, New York.
- WILSON, M. F.; HENDERSON-SELLERS, A. (1985). A Global Archive of Land Cover and Soils Data for Use in General Circulation Climate Models. *Journal of Climatology* 5: 119–143.

### Adressen

Prof. Dr. Gundolf H. Kohlmaier  
Institut für Physikalische und Theoretische Chemie  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
Marie-Curie-Straße 11  
60439 Frankfurt

Dipl.-Chem. Peter H. Ramge  
Institut für Physikalische und Theoretische Chemie  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
Marie-Curie-Straße 11  
60439 Frankfurt

Cand. Chem. Stefan Habermehl  
Institut für Physikalische und Theoretische Chemie  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität  
Marie-Curie-Straße 11  
60439 Frankfurt

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1995

Band/Volume: [24\\_1995](#)

Autor(en)/Author(s): Habermehl Stefan, Ramge Peter H., Kohlmaier  
Gundolf H.

Artikel/Article: [Biosphäre und globaler Wandel 231-247](#)