

# Der Einfluß von Klimaänderungen auf Stoff- und Energieflüsse im Ökosystem

Barbara KÖSTNER

## 1 Zum Dynamikbegriff in der Ökosystemforschung

Im Rahmen dieses Seminars sollen ökologische Vorgänge unter dem Aspekt der Dynamik betrachtet werden. Ich möchte daher einleitend einige Bemerkungen zum Dynamikbegriff in der Ökosystemforschung machen und insbesondere auf das physikalische und chemische Klima als dynamische Faktoren ökosystemarer Kreisläufe eingehen. Bereits im 18. Jahrhundert gab es Ansätze, das Naturgeschehen nicht mehr nur statisch, einer göttlichen Ordnung entsprechend zu betrachten, sondern zeitliche Änderungen und Selbstaktivierungskräfte in der Natur als dynamische Vorgänge zu erkennen. "Dynamisch" wurde zum Schlüsselbegriff einer neuen "funktionellen" Ökologie. Berühmte Vorläufer dynamischer Konzepte in der Ökologie waren z.B. der Botaniker Clements und der Zoologe Elton (siehe MCINTOSCH 1985). Begriffe wie Invasion, Sukzession, Klimax, Populationsökologie wurden von ihnen bereits in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts geprägt. Mit "Dynamik" verbunden wurden die Begriffe "Funktion", "Prozeß" und "Veränderung". In der Ökosystemforschung schließlich übernahm der Limnologe LINDEMANN (1942) TANSLEY's Ökosystemkonzept (1935) und übertrug es auf seine trophisch-dynamische Betrachtung von Stoff- und Energieflüssen. 1966 benennt Van DYNE als Aufgabe der Systemökologie die Unter-

suchung der Entwicklung, Dynamik und Störung von Ökosystemen. Mit dem Aufkommen der Umweltforschung in den letzten Jahrzehnten erhalten vor allem die qualitative Beschreibung und Quantifizierung der Stoffein- und -austräge bzw. die abiotischen Faktoren von Ökosystemen große Bedeutung. Die anthropogene Veränderung von Eintrags- und Austragsgrößen (Schadstoffeinträge, Anstieg der Kohlendioxidkonzentration, Grundwasserentnahme) haben entscheidenden Einfluß auf die Regulationsvorgänge im Ökosystem. Das Verstehen von Regulationsvorgängen und Stoffkreisläufen wiederum schafft die notwendigen Rahmenbedingungen für den Schutz und Erhalt von Lebensgemeinschaften.

## 2 Stoffkreisläufe

Abb. 1 zeigt durch ein relativ einfaches Kompartimentschema, daß zur Beschreibung von Regulationsvorgängen im Ökosystem sowohl Energie- und Stoffflüsse als auch Vorräte von Bedeutung sind. Die Flüsse resultieren aus bestimmten Prozessen, den Funktionen im System, während die Vorräte an bestimmte Strukturen im System gebunden sind. Zusammenhänge zwischen Struktur (z.B. Boden, Wurzel-, Krautschicht, Baumkrone) und Funktion (z.B. Mineralisierung, Nährstoffaufnahme, -transport, Photosynthese, Transpiration) zu erklären und auf der Ebene des Systems vorherzusagen, gehört

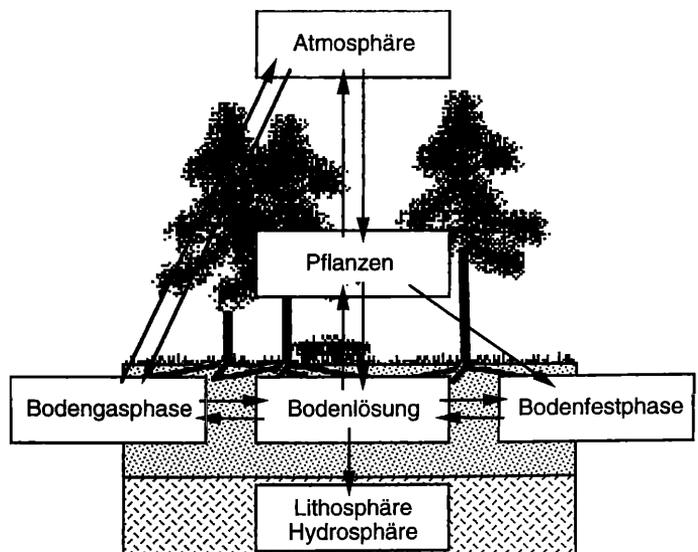


Abbildung 1

Kompartimente eines Ökosystems und mögliche Interaktionen (aus BITÖK 1993)

zu den Aufgaben der Ökosystemforschung (vgl. BITÖK 1993).

In Abb. 2 wird als Beispiel für konkrete Regel- oder Kausalkreise in Waldökosystemen des Fichtelgebirges die Auswirkung von Luftschadstoffen auf Stoffflüsse beschrieben (SCHULZE et al., 1989). Das Beispiel kann uns die Problematik der Komplexität sowie positiver und negativer Rückkopplungen in biologischen Systemen vor Augen führen, wie sie auch bei der Beurteilung des Einflusses von Klimaänderungen zu beachten sind. In diesem Schema sind atmosphärische, biosphärische, hydro-sphärische und lithosphärische Prozesse (z.B. Luftchemie, Transpiration, Wachstum, mikrobieller Abbau, Verwitterung) als Regelwerk mit verschiedenen großen Laufrädern dargestellt, die unterschiedliche Stoffumsatzraten und Verweilzeiten symbolisieren. Wie diese Vorgänge aufeinander abgestimmt sind, ob es dafür allgemeine Regeln auf der Systemebene gibt, die die Vorhersage komplexer Vorgänge ermöglichen könnten, ist in der Ökosystemforschung bisher weitgehend unbekannt.

### 3 Das Problem der Vorhersage und Erklärung von Ökosystemphänomenen - Modelle

Je kleiner die räumliche und je kürzer die zeitliche Skala bei der Untersuchung ökologischer Vorgänge gewählt wird, desto genauer im allgemeinen das Ergebnis. So gibt es z.B. eine Vielzahl von Untersuchungen zum Gaswechselverhalten einzelner Blätter oder kleiner Zweige in Küvetten über Stunden oder Tage, oder es kann sehr exakt der Nährstoffgehalt eines Blattes oder Bodenpartikels gemessen werden. Weit aufwendiger ist es, den Stoffhaushalt eines Waldes annähernd zu erfassen und über Jahrzehnte zu verfolgen. Auch die Ökosystemforschung kommt nicht ohne zeitlich begrenzte Studien an Einzelkompartimenten aus, ihre Bezugsebene, d.h. die Raum/Zeit-Skala von Ökosystemen, reicht dabei am weitesten innerhalb biologisch-ökologischer Zusammenhänge (siehe Abb. 3). Sehr langfristige Prozesse wie z.B. Evolution gehören dazu. Mit zunehmender Ausdehnung in Raum und Zeit, d.h. mit zunehmender Skalengröße, werden für die Beschreibung und Beurteilung der ablaufenden Prozesse Modelle unverzichtbar.

In Abb. 4 sind verschiedene Modelle zum Wasser- und Kohlenstoffhaushalt aufgeführt, wie sie z.B. in der Ökosystemforschung angewandt werden. Es können eindimensionale Transportmodelle im Maßstab Quadratzentimeter bis Hektar sein, zwei- und dreidimensionale, räumliche Modelle im Maßstab Hektar bis Quadratkilometer. Mit diesen Modellen, die die zeitliche Skala miteinbeziehen, können auch zukünftige Szenarien gerechnet werden. Mit der Skala des Landschaftsausschnittes (z.B. Wassereinzugsgebiet) endet im allgemeinen der Bereich ökologischer Forschung. Durch die Umweltproblematik in globalen Dimensionen werden jedoch zunehmend auch größere Maßstäbe relevant. Die in der

Ökosystemforschung angewandten Modelle basieren i.d.R. auf eindimensionalen (vertikalen) Modellen, die den Energie- bzw. Stofftransfer zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre beschreiben (soil-vegetation-atmosphere-transfer models, SVAT). Diese können in Verbindung mit einem Geographischen Informationssystem (GIS) auf flächenhafte Vegetationsstrukturen übertragen werden. Durch Verknüpfung mit Informationen zur Topographie des Geländes können zusätzlich räumliche Informationen und Prozesse, z.B. das Abflußverhalten in einem Wassereinzugsgebiet (siehe Abb. 5), beschrieben werden.

Verknüpfungen von Struktur- und Funktionsinformation mit Landschaftsmodellen kann für begrenzte Gebiete, deren Funktionen durch direkte Messungen kontrolliert werden können, noch recht gut gelingen, mit zunehmender räumlicher und zeitlicher Dimension sind Vorhersagen jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Die z. Zt. zur Vorhersage globaler Klimaänderungen angewandten globalen Zirkulationsmodelle (GCM) berücksichtigen die Komponenten der atmosphärischen, ozeanischen und kryosphärischen Prozesse - soweit sie bekannt sind -, sie berücksichtigen jedoch kaum Rückkopplungen mit der Biosphäre, die als Senke oder Quelle klimarelevanter Stoffe von großer Bedeutung sein kann. Die Eignung von Vorhersagemodellen wird meist dadurch überprüft, daß die bekannte, vergangene Klimasituation mit den Modellen erklärt und nachgebildet werden kann. Globale Zirkulationsmodelle haben z.B. für vergangene Klimaschwankungen der letzten Million Jahre starke Temperaturänderungen in den Tropen vorausgesagt, während paläoklimatologische Untersuchungen zeigen, daß die tropischen Temperaturen in dieser Zeit offenbar relativ stabil geblieben sind (Mac CRACKEN et al. 1991).

### 4 Vorläufige Ergebnisse und zukünftige Aufgaben zum Einfluß von Klimaänderungen auf Ökosystemfunktionen

Allgemein anerkannte Ergebnisse von Globalen Zirkulationsmodellen unter Annahme der Verdopplung der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre können folgendermaßen zusammengefaßt werden (aus Mac CRACKEN et al. 1991):

#### Global

##### sehr wahrscheinlich:

Erhöhung der mittleren Temperatur um 1 - 5° C bei Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (ENQUETE-KOMMISSION 1991: 1,5 - 4,5° C);

Zunahme der Temperaturerhöhung mit Zunahme der Emissionen;

Zunahme der Verdunstung und der Niederschlagsereignisse;

Stratosphärische Abkühlung;

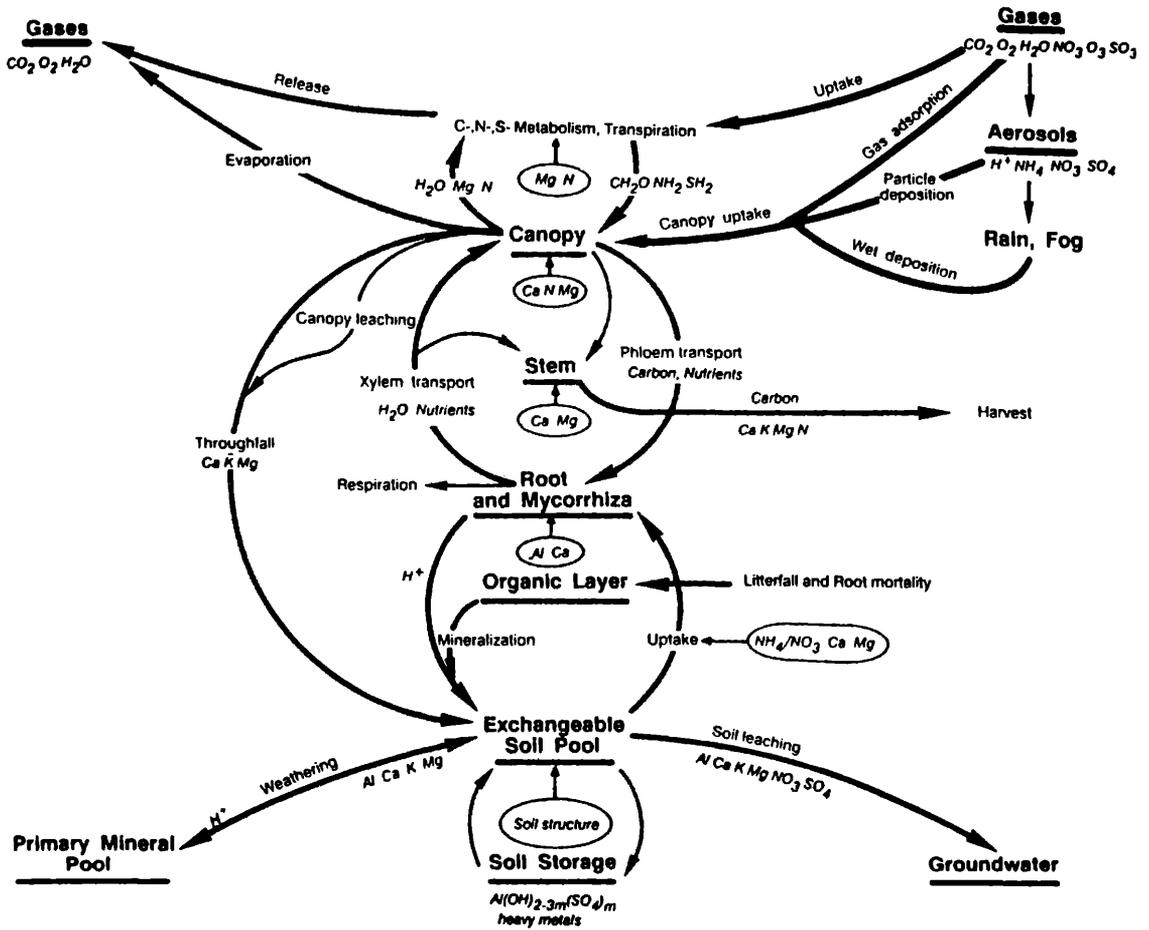


Abbildung 2

Schematisches Modell von Stoffflüssen (Pfeile), Hauptkompartimenten (unterstrichen) und regulierenden Parametern (Ovale) in einem Waldökosystem unter Einfluß von Luftschadstoffen (aus SCHULZE et al. 1989)

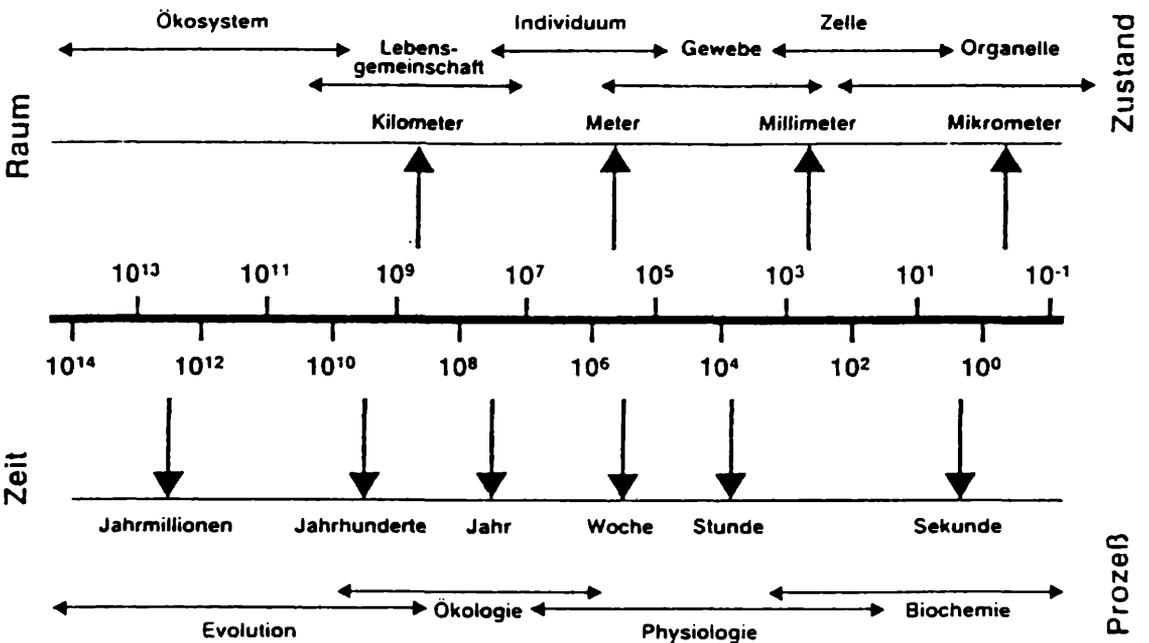
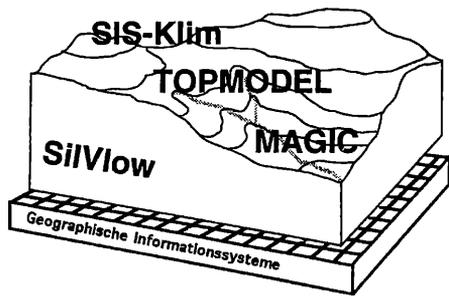


Abbildung 3

Räumliche und zeitliche Skalen biologischer Forschungsgebiete (aus OSMOND et al. 1980)

## Makroskala

Wassereinzugsgebiet (km<sup>2</sup>)



### SIS-Klim

- Räumliche Heterogenität von Einstrahlung, Wind und Temperatur

### TOPMODEL

- Wasserbilanz in der Fläche

### MAGIC

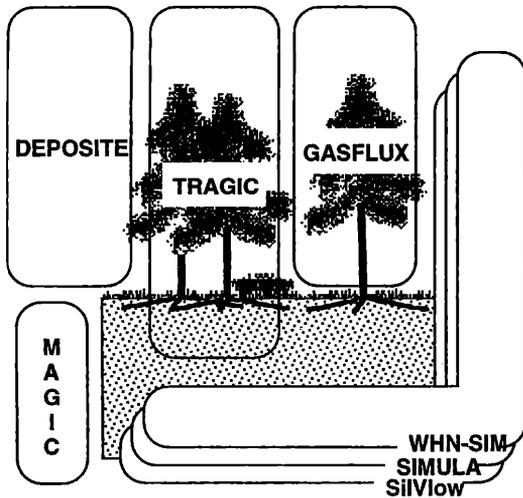
- Stofftransport Boden/Oberflächen-gewässer, Abflußchemie

### SiVlow

- Fließwege in 2D -Transekten

## Mesoskala

Bestand (ha)



### DEPOSITE

- trockene Deposition

### TRAGIC

- Bestandeswachstum

### GASFLUX

- Gasaustausch von Pflanzenbeständen

### MAGIC

- Bodenchemie

### WHN-SIM

- Stickstoffhaushalt

### SIMULA

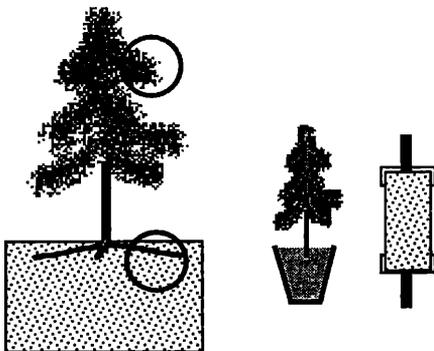
- 1D- Wasserflüsse

### SiVlow

- 2D- Wasserflüsse

## Mikroskala

Plot Einzelpflanze Labor



### TRAGIC

- Wachstum von Einzelbäumen

### GASFLUX

- Gasaustausch von Einzelpflanzen

### SIMULA

- Parameteridentifikation, Wassertransport

### NOLIPEST

- Parameteridentifikation von Laborproben

Räumliche Maßstäbe der Modelle

Abbildung 4

Modelle zur Berechnung und Simulation des Stofftransportes in unterschiedlichen Maßstäben von Blattorganen bzw. Bodenaggregaten bis zum Wassereinzugsgebiet (aus BITÖK 1993)

# GIS Waldstein: Größe des in jedem Punkt berechneten lokalen Ein- zugsgebietes

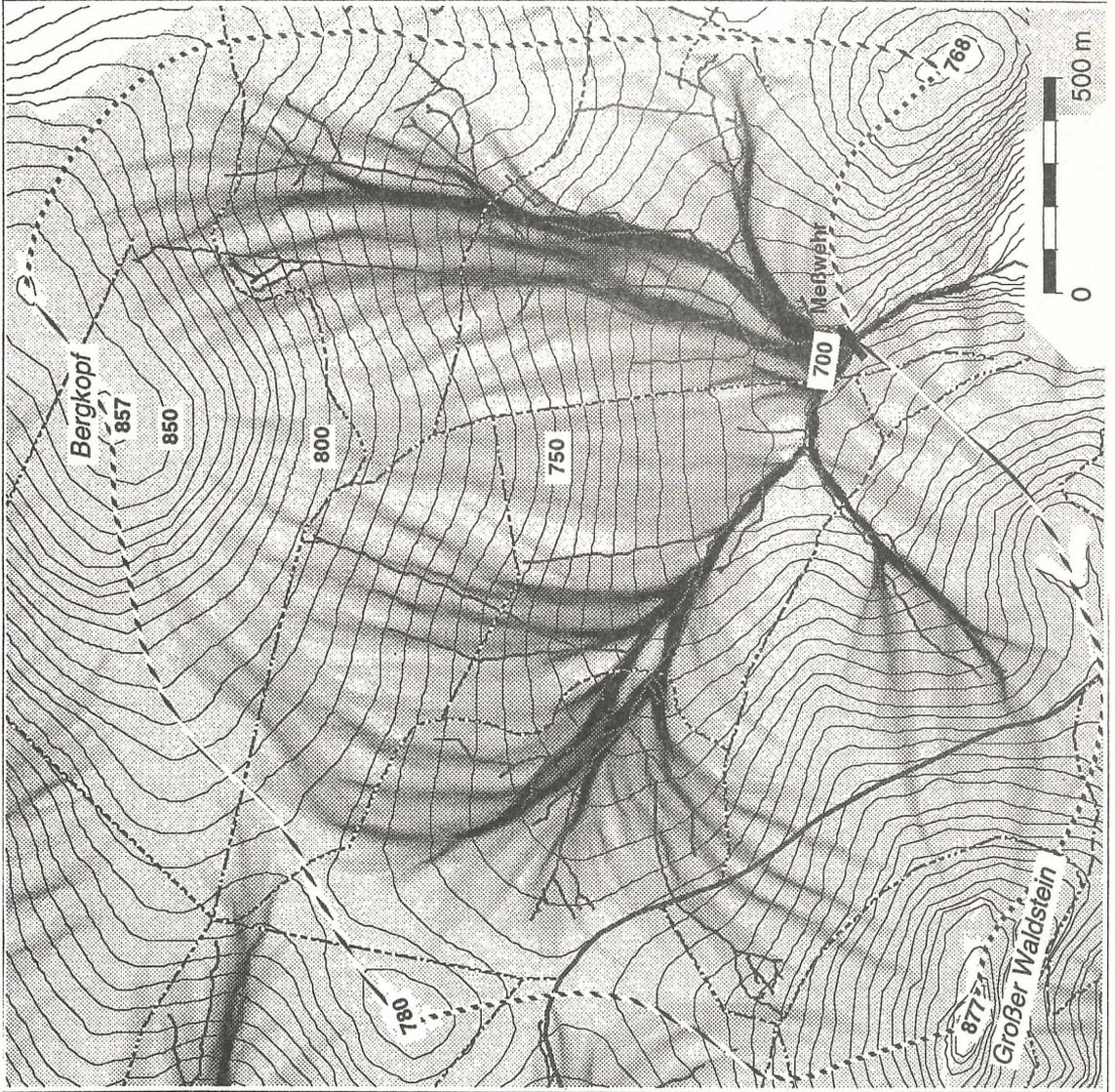


Abbildung 5

Flächenhafte und topographische Modellierung der Abflüsse im Wassereinzugsgebiet Waldstein/Fichtelgebirge (OSTENDORF, BITÖK-Pflanzenökologie)

Zunahme der mittleren Temperaturen wird in den nördlichen Breiten am stärksten und in den Tropen am geringsten sein.

**wahrscheinlich:**

Die Erwärmung der Landfläche wird der der Ozeane vorangehen.

**möglich:**

Zunahme der Niederschlagsintensität.

**Nördliche Breiten**

**sehr wahrscheinlich:**

Erwärmung hauptsächlich im Winter, Spätherbst und Frühjahr;

Erhöhung der Niederschläge über das gesamte Jahr und gleichzeitig Erhöhung der Bodenwassergehalte und Abflüsse.

**wahrscheinlich:**

Rückgang der Gletscher und der Polarvereisung.

**möglich:**

Die Erwärmung wird sich langsamer vollziehen durch Veränderungen der Meeresströmungen.

**Mittlere Breiten**

**sehr wahrscheinlich:**

Erhöhte Temperaturen und Verdunstung in den Sommermonaten.

**wahrscheinlich:**

Erhöhung der Niederschläge in den Winter- und Frühlingsmonaten.

**möglich:**

Abnahme der Bodenwassergehalte im Sommer.

**Südliche Breiten**

**sehr wahrscheinlich:**

Temperaturanstieg niedriger als im globalen Durchschnitt.

**wahrscheinlich:**

Geringe Veränderungen bzw. regional abnehmende Niederschläge in den trockenen Subtropen;

Zunehmende Niederschläge in den Tropen mit unterschiedlicher regionaler Verteilung;

Temperaturanstieg über das ganze Jahr verteilt.

**möglich:**

Zunahme der Häufigkeit und/oder Intensität tropischer Wirbelstürme.

**Fassen wir mögliche Folgen für Ökosysteme der mittleren Breiten zusammen:**

Erhöhung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration;

Temperaturanstieg (vor allem im Sommer);

Veränderung der Niederschlagsverteilung und -höhe (Anstieg im Winter und Frühjahr);

Extremereignisse (Sommertrocknis, Sturmschäden, Schädlingsbefall).

Was kann dies für Stoff- und Energieflüsse im Ökosystem bedeuten? Es gibt zwar bereits eine Vielzahl

von Einzelstudien zu möglichen Klimaeffekten, Ergebnisse auf Ökosystemebene liegen bisher jedoch kaum vor. Die Experimente (Gewächshausversuche, Begasungsringe im Freiland, großflächige Bodenerwärmung) sind sehr aufwendig und müssen über Jahre verfolgt werden. Sie können nur Ausschnitte darstellen und sind von begrenzter Aussagekraft und Übertragbarkeit. Unter der Annahme erhöhter Kohlendioxid-Konzentration, veränderter Temperaturen, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit können folgende Auswirkungen auf Stoffflüsse in terrestrischen Ökosystemen angenommen werden (siehe Abb. 6):

Erhöhte Kohlendioxid-Konzentrationen werden einen verstärkenden Effekt auf die Photosyntheseraten ausüben, dies hat eine relative Erhöhung des Kohlenstoff-Gehaltes im pflanzlichen Gewebe zur Folge, damit verschlechtern sich die Abbaueigenschaften der Streu. Eine infolgedessen verminderte Nährstoffverfügbarkeit könnte teilweise durch anthropogene Stickstoff-Einträge und eine erhöhte mikrobielle Aktivität bei ansteigenden Bodentemperaturen kompensiert werden. Verstärkte Auswaschungsraten werden die Qualität des Grundwassers verschlechtern. Die Reaktion des Wurzelwachstums für verschiedene Arten ist relativ unbekannt. Erhöhte Kohlenstoff-Gehalte und höhere Anteile an Cellulose im Pflanzengewebe können das Herbivorenverhalten beeinflussen. Verstärktes Wachstum kann nur eintreten, wenn neben dem Kohlendioxid-Angebot Nährstoffe und Wasser nicht limitieren. Die reduzierte stomatäre Leitfähigkeit (aufgrund erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration im Blattinnern) vermindert die Transpirationsrate (erhöhte Wassernutzungseffizienz).

Erhöhte Temperaturen und knappe Bodenwasservorräte, besonders im Sommer, können jedoch die Transpiration stark einschränken. Der Einfluß veränderter Vegetationsstruktur (Änderung der aerodynamischen Leitfähigkeit) auf die Evapotranspirationsraten und Einschränkung der Transpiration bei Trockenheit können die Energiebilanz des Systems verschieben, dies kann wiederum auf das Gesamtsystem rückwirken.

**Auswirkungen im Überblick (u.a. BOLIN et al. 1989):**

**Kohlenstoff-Haushalt:**

Verstärktes Wachstum (vor allem bei C<sub>3</sub>-Pflanzen), wenn andere Faktoren nicht limitierend sind;

Erhöhte Wassernutzungseffizienz, d.h. relativ geringerer Wasserverbrauch bei der Biomasseproduktion;

Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Blättern und Nadeln, relativ erhöhte Kohlenstoff-Gehalte;

Veränderung der Wurzel/Sproß-Allokation; Kohlendioxid- und Methan-Freisetzung (Treibhausgase) aus dem Boden durch Temperaturanstieg.



chanismen der Biosphäre regional führen, kann nur durch die Weiterentwicklung von Modellen abgeschätzt werden.

- Große Probleme bereitet das räumliche und zeitliche Aufskalieren (Maßstabssprünge) von untersuchten Prozessen durch Modelle.
- Langzeit-Experimente mit größeren Lebensgemeinschaften werden erst begonnen und sind sehr aufwendig. Sie sind notwendig, um Modelle zu überprüfen.
- Forschungen zum "Globalen Wandel" stehen erst am Anfang. Erforderlich und z.T. bereits tätig ist eine weitreichende, internationale Kooperation, die Forschungsaufgaben definiert und koordiniert (z.B. Internationales Geosphären-Biosphären-Programm, IGBP).
- Da es fraglich ist, ob bzw. inwieweit Voraussetzungen komplexer Wirkungszusammenhänge verlässlich getroffen werden bzw. negative Folgen verhindert werden können, ist in erster Linie als Vorsorge zum Schutz der natürlichen Stoffkreisläufe eine veränderte Energiepolitik mit Emissionsminderung notwendig (ENQUETE-KOMMISSION 1991).

## Literatur

BITÖK (Hrsg.) (1993):

Stickstoff-, Schwefel- und Wasserhaushalt naturnaher Ökosysteme: Forschungskonzept des BITÖK 1993/94. - Bayreuther Forum Ökologie (bfö) 1.

BOLIN, B., DÖÖS, B.R., JÄGER J. & WARRICK, R.A. (Hrsg.) (1989):

The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems. SCOPE 29; John Wiley & Sons; Chichester.

ENQUETE-KOMMISSION "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des DEUTSCHEN BUNDESTAGES (Hrsg.) (1991):

Schutz der Erde. Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik. Bd.1 und 2; Economica Verlag; Bonn.

LINDEMANN, E.C. (1942):

The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology 23: 399-418.

MacCRACKEN, M., CUBASCH, U., GATES, W.L., HARVEY, L.D., HUNT, B., KATZ, R., LORENZ, E., MANABE, S., MACAVANEY, B., MacFARLANE, N., MEEHL, G., MELESHKO, V., ROBOCK, A., STENCHIKOV, G., STOUFFER, R., WANG, W.-C., WASHINGTON, W., WATTS, R. & ZEBIAK, S. (1991):

A critical appraisal of model simulations. - In: SCHLESINGER, M.E. (Hrsg.): Greenhouse-gas induced climatic change: A critical appraisal of simulations and observations. Elsevier; Amsterdam.

MACINTOSH, R.P. (1985):

The background of ecology. Concept and theory. Cambridge University Press; Cambridge.

OSMOND, C.B., BJÖRKMANN, O. & ANDERSON, D.J. (1980):

Physiological processes in plant ecology. Springer; Berlin, Heidelberg, New York.

SCHULZE, E.-D., OREN, R. & LANGE, O.L. (1989):

Processes leading to forest decline: A synthesis. - In: SCHULZE, E.-D., LANGE, O.L. & OREN, R. (Hrsg.): Forest decline and air pollution. A study of spruce (*Picea abies*) on acid soils. - Ecological Studies 77: 459-468; Springer; Berlin, Heidelberg, New York.

STEFFEN, W.L., WALKER, B.H., INGRAM, J.S. & KOCH, G.W. (Hrsg.) (1992):

Global change and terrestrial ecosystems. The operational plan. The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP); Report No. 21.

TANSLEY, A.G. (1935):

The use and abuse of vegetational concepts and terms. - Ecology 16: 284-307.

VAN DYNE, G.M. (1966):

Ecosystems, systems ecology, and systems ecologists. ORNL-3957; Oak Ridge, Tenn.

## Anschrift der Verfasserin:

Dr. Barbara Köstner  
 Bayreuther Institut für Terrestrische  
 Ökosystemforschung (BITÖK)  
 Lehrstuhl Pflanzenökologie  
 Universität Bayreuth  
 D-95440 Bayreuth

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

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1995

Band/Volume: [3\\_1995](#)

Autor(en)/Author(s): Köstner Barbara

Artikel/Article: [Der Einfluß von Klimaänderungen auf Stoff- und Energieflüsse im Ökosystem 93-100](#)