



Doctoral Thesis

On the interaction between atmosphere and vegetation under increasing radiative forcing a model analysis

Author(s):

Füssler, Jürg Stephan

Publication Date:

1998

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-002040376> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 12802

**On the Interaction between Atmosphere and Vegetation
under Increasing Radiative Forcing:
A Model Analysis**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH (ETHZ)

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

Jürg Stephan Füssler

Dipl. Phys. ETH
born 2 April 1968
citizen of Basel

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. A. Wokaun, examiner
Prof. Dr. F. Klötzli, co-examiner
Dr. F. Gassmann, co-examiner

1998

Summary

Jürg Stephan Füssler, 1998: *On the Interaction between Atmosphere and Vegetation under Increasing Radiative Forcing: A Model Analysis*. Ph.D. thesis No. 12802, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), 161 pp.

Atmosphere-vegetation interaction. Terrestrial vegetation exerts a significant influence on the atmosphere. For instance, it determines by its reflectivity (albedo) the input in shortwave energy from the sun, it controls the fluxes of water vapour and of carbon dioxide, and influences by its surface roughness the flow in the planetary boundary layer. In contrast, the structure and functionality of the terrestrial vegetation are shaped to a large degree by the prevailing climatic conditions. Terrestrial vegetation must therefore be seen as an integral and *dynamic* component of the climate system, which is linked to the atmosphere in a *two-way* interaction.

However, in current global climate models that are used to project the evolution of the global climate under an increasing greenhouse gas induced radiative forcing, the structure of terrestrial vegetation, which determines the properties and the functionality of the land's surface with respect to the atmosphere, is assumed to remain constant and not responsive to the changing climatic conditions. First attempts to implement dynamic representations of vegetation structure in global climate models are only recently being made. The main problems that oppose a dynamic two-way modelling of the atmosphere-vegetation system include the limitations in available data, in process knowledge (*e.g.* allocation, community effects, scaling up), in computing power, and in its complex properties as a dynamic system.

The aim of this study is to investigate the potential role of feedbacks in the atmosphere-vegetation system in the framework of a computationally very efficient conceptual model. The conceptual nature of the model allows, in the sense of a preliminary study, to circumvent some of the problems which are posed in the two-way coupling of detailed atmospheric global circulation models (GCMs) with dynamic models of vegetation .

The conceptual model. The conceptual model is based on strongly simplified but largely realistic representation of the atmosphere and the terrestrial vegetation on a regional level. It includes essentials of water related two-way feedbacks, such as the influence of vegetation on evapotranspiration and therefore on the surface energy balance, and the impact of temperature and drought on biomass growth and mortality. In constructing the model, the zero-dimensionality and the annual timestep of the conceptual model prevented in many cases the adoption of existing parameterizations of the processes in the atmosphere-vegetation system. Instead, parameterizations were modified or new parameterizations had to be developed in order to find an adequate representation of these processes on a conceptual level.

The choice of the model level does not aim at a detailed, quantitative description of the systems of atmosphere and vegetation. However, both systems are simulated in their mutual dynamic interaction, exploring the role of different processes and feedbacks under climate change on a conceptual level.

Response to increasing radiative forcing. In the simulation experiments the atmosphere-vegetation system of a mid-latitude region is subject to an increasing external radiative forcing. The response of the conceptual model with constant vegetation to this increasing forcing lies well within the range of global results from GCMs as discussed in the IPCC reports, and in comparison even tends to underestimate it.

The analogous simulations with the dynamic biomass scheme indicate at first a transient growth of biomass related to the temperature increase up to a critical threshold in radiative forcing. Beyond that threshold, the drought stress begins to dominate the response and the biomass decreases. This qualitative response pattern is in line with several model studies. Also, this trend has already been observed in comprehensive tree ring observations in higher northern latitudes.

The increase in biomass leads to a slight mitigation, respectively its decrease to a slight reinforcement of the temperature increase, because of the change in evapotranspiration.

Model extended by dynamic roots, cloud feedback and adaptation. This picture changes if one takes into consideration an additional feedback loop. This feedback is based on the hypothesis that drought stress implies not only a reduction in above ground biomass, but also a reduction in rooting systems and therefore a reduction of the amount of water accessible to the plants for transpiration. In the simulations, the implementation of dynamic scheme for below ground biomass promotes not only the biomass-evapotranspiration-temperature feedback mentioned in the previous section, but induces qualitatively a new property: the occurrence of a second stable state in the atmosphere-vegetation system (bistability). This second state appears in a certain range of the external forcing and is characterized by high temperature, drought, a strongly reduced above and below ground biomass, and lower evapotranspiration. In the bistable regime, moderate perturbations can trigger the atmosphere-vegetation system to undergo an abrupt change to the other state.

The investigations with a scheme that couples cloudiness to regional evapotranspiration indicate that cloud feedback tends to stabilize both states.

It lies beyond the scope of the conceptual model to quantify the conditions which lead to bistability in the atmosphere-vegetation system at mid-latitudes. However, our investigations show that within a consistent, realistic parameterization, the interaction between vegetation structure (incl. roots), evapotranspiration and atmosphere may lead to bistability. The consideration of the dynamic nature of (above and below ground) vegetation structure in simulation studies of future climate development might lead to projections of more abrupt changes in climate conditions than predicted by present models.

In order to investigate the role of the adaptability of terrestrial ecosystems to changing climatic conditions, a simple scheme of adaptation has been implemented into the conceptual model. The simulations indicate that the rate and the extent of the adaptation are crucial factors in the assessment of possible future changes in the climate-vegetation system. They point to the possible existence of critical thresholds in the rate of adaptation. In general, a high adaptability of terrestrial ecosystems promotes the maintenance of an abundant vegetation cover during increasing radiative forcing, and enables the regeneration of the atmosphere-vegetation system after perturbations.

The conceptual nature of the model presented in this work restricts its applicability to the qualitative investigation of feedbacks in the atmosphere-vegetation system. The results identify several processes and feedbacks, such as the dynamics of above ground vegetation structure, the dynamics of rooting systems, and the processes of adaptation, which, if coupled in a two-way mode in models of climate projections, might modify the resulting trajectories considerably, in particular on a regional scale. As a next step in model hierarchy, the results from the conceptual model have to be reproduced in a more detailed 2-D or 3-D climate model coupled with a dynamic vegetation model.

Kurzfassung

Jürg Stephan Füssler, 1998: *Über die Wechselwirkung von Atmosphäre und Vegetation unter einem zunehmenden Strahlungsforcing: Eine Modellanalyse*. Diss. ETH Nr. 12802, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), 161 pp.

Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Vegetation. Einerseits übt die terrestrische Vegetation einen beträchtlichen Einfluss auf das atmosphärische Geschehen aus. So bestimmt die Vegetation über ihre Reflektivität (Albedo) den Input an kurzweiliger Strahlung von der Sonne, steuert sie den Austausch von Wasserdampf und Kohlendioxid mit der Atmosphäre und verändert durch ihre Oberflächenrauheit die Strömungsdynamik in der planetaren Grenzschicht. Umgekehrt wird die Vegetation in Struktur und Funktion in hohem Masse durch die herrschenden klimatischen Verhältnisse bestimmt. Die terrestrische Vegetation muss deshalb als integrale und *dynamische* Komponente des Klimasystems verstanden werden, welche mit der Atmosphäre in *gegenseitiger* Wechselwirkung steht ("zwei-Weg" Kopplung).

In heutigen globalen Klimamodellen, wie sie zur Abschätzung einer Klimaänderung in Folge des zunehmenden Treibhauseffekts verwendet werden, wird die Vegetation jedoch in ihrer Struktur als konstant angenommen. Erst seit jüngster Zeit werden Versuche unternommen, Submodelle einer dynamischen Vegetationsstruktur in globale Klimamodelle zu implementieren. Die Hauptprobleme, welche die dynamische zwei-Weg Modellierung erschweren, liegen vor allem in der Beschränktheit der verfügbaren Daten, der Kenntnisse der involvierten Prozesse (z.B. Allokation, Community-Effekte, Upscaling) und der Computerleistung, sowie in den komplexen Eigenschaften des dynamischen Systems Atmosphäre-Vegetation.

Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der möglichen Rolle von verschiedenen Feedbacks im System Atmosphäre-Vegetation bei einer Klimaänderung im Rahmen eines numerisch äusserst effizienten konzeptionellen Modelles. Der konzeptionelle Ansatz erlaubt es, im Sinne einer Vorstudie einige der Probleme, welche sich bei der zwei-Weg Kopplung von detaillierten atmosphärischen globalen Zirkulationsmodellen mit dynamischen Modellen der globalen Vegetation ergeben, zu umgehen.

Das konzeptionelle Modell. Das konzeptionelle Modell basiert auf einer stark vereinfachten, aber im grossen und ganzen realistischen Repräsentation der Atmosphäre und der terrestrischen Vegetation auf einer regionalen Ebene. Es enthält die wesentlichsten Elemente der Rückkopplung zwischen der Atmosphäre und der Vegetation bezüglich des Wasserhaushaltes, wie den Einfluss der Vegetation auf die Evapotranspiration und damit auf die Oberflächenenergiebilanz, so wie auch die Auswirkung von Temperatur und Trockenheit auf den Zuwachs oder das Absterben der Biomasse. Für die Konstruktion des Modelles mussten wegen der Nulldimensionalität des konzeptionellen Modelles und des Zeitschrittes von einem Jahr bestehende Parameterisierungen der Prozesse modifiziert, oder gar neue Parameterisierungen entwickelt werden.

Das Ziel eines Modelles solch konzeptionellen Zuschnitts kann es nicht sein, eine detaillierte und quantitative Beschreibung der Systeme Atmosphäre und Vegetation zu liefern. Stattdessen erlaubt das Modell die Simulation der beiden Systeme in ihrer gegenseitigen dynamischen Wechselwirkung.

Reaktion auf ein zunehmendes Strahlungsforcing. In den Simulationsexperimenten wird das System Atmosphäre-Vegetation einer Region der mittleren Breiten einem zunehmendem Strahlungsforcing, einem ansteigendem Treibhauseffekt entsprechend, ausgesetzt. Mit kon-

stant gehaltener Vegetation liegt der resultierende Temperaturanstieg (Klimasensitivität) im Rahmen von globalen Resultaten von atmosphärischen Zirkulationsmodellen und fällt im Vergleich sogar eher gering aus.

In den analogen Simulationsläufen, welche mit dynamischer Vegetation durchgeführt wurden, fördert die ansteigende Temperatur ein vorübergehendes Wachstum der Biomasse. Übersteigt das Forcing einen Schwellwert, wird der Trockenstress dominant und die Biomasse wird wiederum reduziert. Dieses qualitative Verhalten der Vegetation im konzeptionellen Modell steht in Übereinstimmung mit mehreren Modellstudien. Dieser Trend zeigt sich auch schon in umfangreichen Jahrringmessungen in höheren nördlichen Breiten.

Der Anstieg an Biomasse führt über die Evapotranspiration zu einer leichten Abschwächung, respektive ihr Rückgang zu einer leichten Verstärkung des Temperaturanstiegs.

Erweiterung des Modelles durch dynamische Wurzeln, Wolkenfeedback und Adaptation. Dieses Bild ändert sich, wenn nun eine zusätzliche Rückkoppelungsschleife in Betracht gezogen wird. Dieses Feedback basiert auf der Hypothese, dass der Trockenstress nicht bloss zu einer Reduktion der Biomasse über dem Boden führt, sondern auch die Wurzelsysteme beeinträchtigt und damit das der Pflanze für die Transpiration verfügbare Wasser vermindert. Dieser Mechanismus verstärkt in den Simulationen nicht nur das Biomassen-Evapotranspirations-Temperatur-Feedback des vorherigen Abschnittes, sondern induziert auch eine qualitativ neue Eigenschaft: Die Existenz eines zweiten stabilen Zustandes im System Atmosphäre-Vegetation (Bistabilität). Dieser zweite Zustand tritt in einem gewissen Bereich des externen Forcings auf. Er zeichnet sich durch eine hohe Temperatur, Trockenheit, eine stark reduzierte Biomasse sowohl über als auch unter dem Boden, und durch geringere Evapotranspiration aus. Befindet sich das System in diesem bistabilen Bereich, genügt eine Störung, um einen abrupten Übergang des Systems in den andern Zustand auszulösen.

Eine weitere Erweiterung des Modelles, bei welcher die Bewölkung von der regionalen Evapotranspiration abhängt, deutet darauf hin, dass ein solches Wolkenfeedback zur Stabilisierung der beiden Zustände des Systems beitragen könnte.

Es liegt ausserhalb des Rahmens des konzeptionellen Modelles, die Bedingungen zu quantifizieren, unter welchen im System Atmosphäre-Vegetation der mittleren Breiten Bistabilität auftreten kann. Unsere Untersuchungen zeigen jedoch, dass innerhalb einer konsistenten und realistischen Parameterisierung die Feedbacks zwischen Vegetationsstruktur (inkl. Wurzeln), Evapotranspiration und der Atmosphäre zu Bistabilität führen könnten. Die Berücksichtigung der Dynamik der Vegetationsstruktur (über und unter dem Boden) in Simulationsstudien der zukünftigen Klimaentwicklung könnte zu Projektionen von viel abrupterem Charakter führen.

Um die Rolle der Adaptation terrestrischer Ökosysteme an sich verändernde klimatische Bedingungen zu untersuchen, wurde in einem weiteren Schritt ein einfaches Adaptationsmodell ins konzeptionelle Modell eingebaut. Die Simulationsresultate zeigen, dass die Tiefe und Geschwindigkeit der Adaptation kritische Faktoren sind für die zukünftige Entwicklung des Systems Atmosphäre-Vegetation. Sie verweisen auf die mögliche Existenz von Schwellwerten in der Adaptationsrate. Im allgemeinen erlaubt eine hohe Adaptationsfähigkeit terrestrischer Ökosysteme die Aufrechterhaltung einer reichen Vegetationsbedeckung unter zunehmendem Strahlungsforcing und ermöglicht die Regeneration des Systems Atmosphäre-Vegetation nach einer Störung.

Der konzeptionelle Charakter des in dieser Arbeit vorgestellten Modelles beschränkt dessen Anwendbarkeit auf die qualitative Untersuchung von Feedbacks im System Atmosphäre-Vegetation. Die Modellresultate lassen mehrere Prozesse und Feedbacks erkennen, wie die

Dynamik von Biomasse, Wurzelsystemen und Adaptationsprozesse, welche, in Klimamodelle integriert, die resultierenden Klimaprojektionen beträchtlich modifizieren könnten, besonders auf regionaler Ebene. In einem nächsten Schritt in einer Hierarchie der Modelle sollten die Resultate des konzeptionellen Modelles in einem detaillierteren zwei- oder dreidimensionalen Klimamodell, gekoppelt mit einem dynamischen Vegetationsmodell reproduziert werden können.