

DISS. ETH No. 25161

**IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON FORESTS AND WATER  
RESOURCES IN SWITZERLAND: A COUPLED  
MODEL-BASED STUDY**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**MATTHIAS JOHANN ROBERT SPEICH**

MSc UZH in Geography

born on 07.01.1987

citizen of Glarus Süd (GL)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. James W. Kirchner  
Dr. Heike Lischke  
Dr. Massimiliano Zappa  
Prof. Dr. Giorgio Vacchiano

2018

# Summary

The aim of this thesis was to develop a coupled simulation model to estimate the impact of climate change on two important ecosystem processes: hydrology and forest dynamics. Both forests and water resources in Switzerland are expected to be impacted by climate change. These effects might have direct socio-economic implications, e.g. through impacts on water availability, flooding, timber production or protective forests. Furthermore, the ecological consequences may be profound, with possible repercussions on biodiversity and habitat distribution. Therefore, there have been many efforts to anticipate how ecosystems will respond to a changing climate. As these processes may be highly complex, dynamic computer models are a valuable tool to simulate ecosystem processes. In many cases, models specialize in a certain subset of ecosystem processes, e.g. hydrological processes or forest dynamics. It is well known that these different domains influence each other. Therefore, as process knowledge advances and more computational resources become available, it is worthwhile to build models that integrate several aspects of ecosystem functioning. The new model developed in this project actually consists of the combination of two pre-existing models: a hydrological model and a forest landscape model. In a coupled simulation, these models run simultaneously and exchange information through shared variables. Both original models have been applied in several climate change impact studies in Switzerland.

One of the interfaces between the hydrological and ecological process formulations in the coupled model is an annual drought index that quantifies the severity of water shortage in a given year. This drought index is passed to the forest model, where it impacts growth and mortality in the simulated forest. There exist many formulations of drought indices, that have been applied to a wide range of purposes. Droughts are complex phenomena, and quantifying them with a single number necessarily leads to a loss of information. Different indices were created to reflect different aspects of drought, and their ecological and physiological significance is not always clear. To decide what type of drought index shall be implemented in the coupled model, a literature review was conducted, analyzing the assumptions and rationale behind different types of indices, and the types of ecological and physiological processes that they represent. A key finding from this review was that not only the index itself had an influence on its ecological meaning, but also the underlying models used to calculate it. Based on these results, it was decided that the drought index should be dependent on climate as well as on properties of the vegetation itself. Furthermore, due to the high ecological importance of this phenomenon, it should reflect the effect of high evaporative demand on plant-internal hydraulics.

To assess which factors are most important for this index, a sensitivity analysis was performed in a next step. A newly developed local water balance model was run with meteorological forcing from ten contrasting stations across Switzerland. For each station, the model was run 800 times, while parameters representing soil and vegetation properties were varied. The statistical relationships between parameter values and model outputs (the aforementioned drought index,

as well as long-term total evaporation) were examined to assess the importance of different soil and vegetation properties. This analysis highlighted the crucial role of rooting zone storage capacity for hydrological and ecological processes, even at sites that are not water limited.

Due to the high importance of rooting zone storage capacity, it was decided that its representation in the coupled model should be improved. Furthermore, rooting depth is known to respond to changes in climate, so that to better anticipate the effect of climate change on ecosystems, rooting depth should be a dynamic variable. In a next step, a model predicting rooting depth as a function of soil and climate was tested. This model assumes that plants dimension their rooting systems to optimize their carbon budget. As rooting depth measurements are rare and not always representative of a larger area, model predictions were tested against estimates of rooting zone storage capacity derived from calibration of a local water balance model. The model was calibrated against latent heat flux and soil moisture measurements at 15 sites across Europe. At most temperate and cold sites, modeled and calibrated estimates of importance of rooting zone storage capacity were in good agreement, and the rooting depth model behaved in an ecologically sound way. On the other hand, application to Mediterranean conditions and on very coarse soils was unsatisfying. As these conditions are relatively rare in Switzerland, this optimality-based module was implemented in the coupled model.

The last chapter describes the coupled model and presents a proof of concept in a valley of the Swiss Central Alps. Under most conditions, the model behaved in a plausible way, which is encouraging for its future application to climate impact studies. This case study also helped identify some shortcomings of the model, such as a too low spatial variability of simulated leaf area index, or an exaggeration of the ecohydrological effects of land abandonment at high elevations.

# Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines gekoppelten Simulationsmodells, um die Auswirkungen des Klimawandels auf zwei wichtige Umweltprozesse abzuschätzen: Hydrologie und Walddynamik. Es wird erwartet, dass sowohl Wälder und Wasserressourcen der Schweiz vom Klimawandel betroffen werden. Dies kann sozioökonomische Folgen haben, etwa durch Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit, Hochwasser, Holzproduktion oder Schutzwald. Auch wichtige ökologische Aspekte können betroffen sein, wie etwa Biodiversität und Lebensräume. Um geeignete Anpassungsmassnahmen treffen zu können, ist es wichtig, die Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme abzuschätzen. Da es sich dabei um komplexe Prozessgefüge handelt, sind dynamische Computermodelle hierfür besonders geeignet. Viele solcher Modelle sind auf ein Teilgebiet wie Hydrologie oder Walddynamik spezialisiert. Diese Prozesse beeinflussen sich jedoch gegenseitig. Es ist deshalb notwendig, Modelle zu entwickeln, die verschiedene Teilspekte von Ökosystemen miteinander kombinieren. In diesem Fall geht es um die Kombination von zwei existierenden Modellen, einem hydrologischen Modell und einem Wald-Landschafts-Modell. In einer gekoppelten Simulation laufen diese Modelle gleichzeitig und tauschen Informationen über gemeinsame Variablen.

Eine der zentralen Schnittstellen in diesem gekoppelten Modell ist ein Trockenheitsindex, der die Intensität des Wassermangels in einem bestimmten Jahr beziffert. Dieser Index beeinflusst im Modell die Wachstums- und Mortalitätsraten des simulierten Waldes. Es wurden bereits viele Trockenheitsindizes entwickelt, mit verschiedenen Hintergründen und Anwendungszwecken. Ein komplexes Phänomen wie Trockenheit mit einer einzigen Zahl auszudrücken, führt notwendigerweise zu einem Informationsverlust. Deshalb ist es wichtig zu wissen, welche physiologischen und ökologischen Prozesse ein bestimmter Index widerspiegelt. Da die Bedeutung verschiedener Indizes nicht immer klar ist, wurde in einer Recherchearbeit die physiologische und ökologische Bedeutung verschiedener Trockenheitsindizes erörtert. Dabei wurde klar, dass nicht nur die Formulierung der Indizes an sich ihre Bedeutung bestimmen, sondern auch die Modelle, die für ihre Berechnung verwendet werden. Der Trockenheitsindex für das gekoppelte Modell wurde aufgrund dieser Recherche gewählt. Dieser Index soll auf Klima sowie Vegetationsmerkmale reagieren, und auch den Effekt von trockener Luft auf pflanzeninterne hydraulische Prozesse abbilden.

Um zu ermitteln, welche Faktoren für diesen Trockenheitsindex besonders wichtig sind, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Ein lokales Wasserhaushaltsmodell wurde mit meteorologischen Daten von zehn verschiedenen Wetterstationen in der Schweiz betrieben. An jeder Station wurden 800 Modellläufe durchgeführt, mit verschiedenen Werten für Boden- und Vegetationsparameter. Die statistischen Beziehungen zwischen Parameterwerten und Modelloutputs (der oben genannte Trockenheitsindex sowie modellierte Verdunstung) wurden untersucht, um den Einfluss verschiedener Boden- und Vegetationsparameter auf das Modell zu bestimmen. Diese Studie hob die zentrale Bedeutung der Wasserspeicherkapazität der Wurzelzone für hy-

drologische und ökologische Prozesse hervor.

Diese Resultate zeigten, dass es notwendig war, im gekoppelten Modell die Abbildung der Wurzeltiefe zu verbessern. Da sich die Wurzeltiefe unter anderem an das Klima anpasst, sollte sie als dynamische Variable definiert werden. Zu diesem Zweck wurde ein einfaches Modell getestet, das Wurzeltiefe in Abhängigkeit von Boden und Klima berechnet. Dieses Modell beruht auf der Annahme, dass die Pflanzen ihren Wurzelraum so dimensionieren, dass sie ihren Kohlenstoffhaushalt optimieren können. Da Messungen von Wurzeltiefe selten und oft wenig repräsentativ sind, wurde das Modell mit Wurzeltiefen verglichen, die durch Kalibrierung eines Wasserhaushaltsmodells geschätzt wurden. Das Wasserhaushaltsmodell wurde an 15 Standorten in Europa mit Messungen von latentem Wärmefluss und Bodenfeuchte kalibriert. An den meisten gemässigten und kühlen Standorten stimmten kalibrierte und modellierte Wurzeltiefen gut überein. An mediterranen Standorten und auf sehr sandigen Böden hingegen war die Anwendung des Modells nicht zufriedenstellend. Da diese Bedingungen in der Schweiz selten vorkommen, wurde dieser Ansatz in das gekoppelte Modell eingebaut.

Im letzten Kapitel wird das gekoppelte Modell beschrieben und in einem Testgebiet in einem Walliser Seitental, dem Val d'Anniviers, angewendet. Unter den meisten Bedingungen liefert das Modell plausible Ergebnisse, was ermutigend ist für zukünftige Anwendungen. In dieser Studie wurden auch einige Schwächen des Modells identifiziert, wie etwa eine zu geringe Variabilität des Blattflächenindex, oder wenig plausible Simulationen bei Waldausbreitung in höheren Lagen.