



Doctoral Thesis

Influence of soil moisture and vegetation phenology on recent European heat waves

Author(s):

Lorenz, Ruth

Publication Date:

2012

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007602853> →

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 NO. 20831

**Influence of soil moisture and vegetation phenology
on recent European heat waves**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Ruth Lorenz

MSc ETH Environ. Sc, ETH Zurich

born January 9, 1984

citizen of

St.Gallen Tablat SG and Bassersdorf ZH

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, examiner

Dr. Edouard L. Davin, co-examiner

Dr. Nathalie de Noblet-Ducoudré, co-examiner

2012

Abstract

The land surface and the atmosphere form a coupled system and interact with one another in several ways. Land-atmosphere feedbacks have been shown to be important for European summer climate, in particular for extreme events. Observational studies suggest an increase in frequency as well as intensity of hot temperature and heavy precipitation extremes already for the recent past. With climate change, extreme events in Europe are projected to be strongly affected, notably due to a strengthening of land-atmosphere feedbacks. Hot extremes as well as heavy precipitation events are projected to become more frequent and intense in the coming decades. In addition, substantial changes in drought patterns are projected. Human societies and ecosystems are greatly affected by climate variability and especially by the frequency and intensity of extreme events. Hence, it is important to improve the understanding of the processes shaping these extremes and their sensitivity to climate change.

This thesis investigates land-climate feedbacks associated with heat waves and droughts in order to investigate how extreme events are influenced by processes at the land surface. Specifically, it quantifies the importance of soil moisture versus vegetation phenology feedbacks using numerical sensitivity experiments performed with a Regional Climate Model (RCM). Thereby, we use two model frameworks. On the one hand, the standard COSMO-CLM RCM coupled to its default land surface model (LSM) TERRA_ML, and on the other hand COSMO-CLM coupled to a more sophisticated LSM, the Community Land Model (CLM3.5). We refer to the latter modeling system as COSMO-CLM², whereas the native LSM TERRA_ML has been retained within COSMO-CLM² so that either CLM3.5 or TERRA_ML can be used with the same atmospheric model, allowing us to quantify the influence of the LSM specification on the simulated climate. COSMO-CLM² is particularly critical to investigate vegetation-climate feedbacks, as the respective experiments require a realistic representation of vegetation processes, which is

provided by the sophisticated CLM3.5 LSM. Since this new model framework (COSMO-CLM²) had not been used for studying land-atmosphere feedbacks and extreme events previous to this thesis, a model validation is an essential part of this thesis.

The first part of this thesis uses an older version of COSMO-CLM and assesses the influence of soil moisture memory on heat wave persistence based on sensitivity experiments with prescribed soil moisture. By using different thresholds for heat wave definition, we are able to disentangle the differences in heat wave duration caused by differences in the intrinsic persistence of daily maximum temperatures (clustering of hot days) and due to differences in the probability density functions of daily maximum temperatures. We find that simulations in which soil moisture is fixed to a constant value or prescribed seasonal cycle, even with prescribed constant dry conditions, present a lower intrinsic heat wave persistence than simulations with interactive soil moisture. This effect is related to the soil moisture memory in the simulations with interactive soil moisture and highlights the importance of soil moisture memory for heat wave persistence (Chapter 2).

The second part of my thesis uses COSMO-CLM² and compares COSMO-CLM/TERRA_ML with COSMO-CLM coupled to the more sophisticated CLM3.5 LSM. In particular, this study investigates the dependency of the model performance and of its representation of land-atmosphere feedbacks on the LSM specification. We find that the overall COSMO-CLM/COSMO-CLM² performance is improved when the model is coupled to CLM3.5. Especially the simulation of climate variability and temperature extremes is substantially ameliorated. In addition, we investigate the relationship between the standardized precipitation index and the subsequent number of hot days. This relationship can be used as an indicator for soil moisture-temperature feedbacks and can also be calculated from observations. Hence, this enables us to compare land-climate feedbacks in the model to observation-based estimates. This investigation reveals that overall land-climate feedbacks are more realistically simulated with the more sophisticated LSM. However, we find that the effect of the land surface on climate may be at the lower end when using the CLM3.5 land surface model (Chapter 3).

The third part of my thesis deals with vegetation phenology-climate feedbacks. For this study we used a new phenological dataset which provides data for the whole time period of the simulations (1989–2010). This allowed us to perform simulations with inter-annual variability in leaf area index (LAI) instead of the default seasonal cycle. In addition, by using the new dataset we are able to increase the temporal resolution of LAI from monthly to daily timesteps. We investigate the influence of phenological changes on temperature extremes by performing different phenology experiments. Overall, late and weak vegetation activity leads to an enhancement of heat waves. For example, during the heat waves and droughts that occurred in 2003 (Central

Europe) and 2007 (South-Eastern Europe) the decrease in vegetation activity during summer due to drought conditions and very high temperatures further increased the heat wave intensity. Hence, heat and drought conditions that influence the vegetation LAI can further amplify heat waves in addition to the enhancing effect due to soil moisture-temperature feedbacks alone (Chapter 4).

In summary, COSMO-CLM² has been shown to be an appropriate tool for studying land-climate feedbacks and for simulating climate variability and extremes in Europe. We identified that soil moisture-climate as well as vegetation phenology-climate feedbacks play an important role for European summer climate. The performed numerical experiments suggest that soil moisture has a pronounced effect on summer mean climate as well as extreme events, e.g., the persistence of heat waves, whereas vegetation phenology only seems to play a role for extreme events. However, in some cases and regions, vegetation phenology and drought conditions are found to amplify heat waves in almost equal amount. This thesis highlights the key role of soil moisture and vegetation phenology feedbacks during heat waves and associated droughts, which can be substantially prolonged and enhanced due to these feedbacks.

Zusammenfassung

Die Landoberfläche und die Atmosphäre bilden ein gekoppeltes System und interagieren auf verschiedene Weisen miteinander. Es ist gezeigt worden, dass Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre für das europäische Sommerklima, vor allem für Extremereignisse, wichtig sind. Studien basierend auf Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Häufigkeit und die Intensität von heißen Temperaturen und Starkniederschlägen bereits in der jüngsten Vergangenheit zugenommen haben. Es wird prognostiziert, dass der Klimawandel Extremereignisse, insbesondere durch eine Verstärkung der Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre, stark beeinflussen wird. Heisse Temperaturextreme und Starkniederschläge werden voraussichtlich in ihrer Häufigkeit und Intensität in den nächsten Dekaden weiter zunehmen. Ausserdem sind starke Änderungen in den Auftrittsmustern von Dürren vorausgesagt. Klimavariabilität und besonders die Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen haben starke Auswirkungen auf die menschliche Gesellschaft und Ökosysteme. Darum ist es wichtig die Prozesse, die diese Extreme beeinflussen, und deren Sensitivität auf den Klimawandel zu verstehen.

Diese Doktorarbeit untersucht Wechselwirkungen zwischen Land und Klima im Zusammenhang mit Hitzewellen und Dürren um das Verständnis, wie Extremereignisse von den Prozessen an der Landoberfläche beeinflusst werden, zu verbessern. Im speziellen quantifiziert diese Arbeit die Wichtigkeit von Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Atmosphäre im Vergleich zu Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Atmosphäre anhand von numerischen Sensitivitäts-Experimenten mit regionalen Klimamodellen (RCM). Dabei benutzen wir zwei Modellsysteme. Einerseits verwenden wir das gängige, mit seinem Standard-Landoberflächenmodell `TERRA_ML` gekoppelte `COSMO-CLM` RCM. Andererseits benützen wir `COSMO-CLM` gekoppelt an ein höher entwickeltes Landoberflächenmodell, das `Community Land Model (CLM3.5)`. Letzteres Modellsystem nennen wir `COSMO-CLM2`. Das Standard-Landoberflächenmodell `TERRA_ML` bleibt

in COSMO-CLM² enthalten, sodass mit demselben Atmosphärenmodul entweder CLM3.5 oder TERRA_ML benützt werden kann. Diese Tatsache erlaubt es uns, den Einfluss des Landoberflächenmodells auf das simulierte Klima zu quantifizieren. COSMO-CLM² ist insbesondere entscheidend, um Wechselwirkungen mit der Vegetation zu untersuchen, da diese Experimente eine realistische Repräsentation von Vegetationsprozessen im Modell erfordern, welche durch das hochentwickelte Landoberflächenmodell CLM3.5 gegeben sind. Weil dieses neue Modellsystem (COSMO-CLM²) noch nie für Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Land und Klima oder Extremereignissen benutzt worden ist, beinhaltet ein essentieller Teil dieser Arbeit die Validierung des Modells bezüglich dieser Aspekte.

Der erste Teil dieser Doktorarbeit benutzt eine ältere Version von COSMO-CLM und beurteilt den Einfluss der Variabilität der im Boden gespeicherten Bodenfeuchte auf die Persistenz von Hitzewellen basierend auf Sensitivitäts-Experimenten mit vorgeschriebener Bodenfeuchte. Durch die Verwendung verschiedener Grenzwerte für die Definition von Hitzewellen sind wir in der Lage, die Unterschiede in der Dauer von Hitzewellen, die durch die spezifische Persistenz täglicher Maximaltemperaturen (gehäuftes Auftreten von Hitzetagen) oder durch Unterschiede in der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der täglichen Maximaltemperaturen verursacht werden, zu unterscheiden. Wir stellen fest, dass Simulationen, in denen die Bodenfeuchte durch einen fixen Wert oder einen vorgeschriebenen saisonalen Zyklus festgesetzt ist, auch bei konstant trockenen Bedingungen eine tiefere spezifische Hitzewellenpersistenz aufweisen als Simulationen mit interaktiv berechneter Bodenfeuchte. Dieser Effekt ist auf die Variabilität der im Boden gespeicherten Feuchtigkeit zurückzuführen und hebt deren Einfluss auf die Persistenz von Hitzewellen hervor (Kapitel 2).

Der zweite Teil meiner Doktorarbeit benützt COSMO-CLM² und vergleicht COSMO-CLM/TERRA_ML mit dem an das höher entwickelte Landoberflächenmodell CLM3.5 gekoppelte COSMO-CLM. Diese Studie untersucht insbesondere die Abhängigkeit der Modelleigenschaften und der Repräsentation von Wechselwirkungen zwischen Land und Atmosphäre auf die Spezifikation des Landoberflächenmodells. Wir stellen fest, dass insgesamt die Funktion von COSMO-CLM/COSMO-CLM² verbessert wird, wenn das Modell an CLM3.5 gekoppelt ist. Insbesondere wird die Simulation von Klimavariabilität und Temperaturextremen wesentlich verbessert. Zusätzlich untersuchen wir den Zusammenhang zwischen dem "Standardized Precipitation Index" (SPI, Standardisierter-Niederschlagsindex) und der nachfolgenden Anzahl Hitzetage. Dieser Zusammenhang kann als Indikator für Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Temperatur gebraucht werden und kann auch aus Beobachtungsdaten berechnet werden. Das macht es uns möglich, Wechselwirkungen zwischen Land und Klima im Modell mit auf Beobachtungen basierenden Berechnungen zu vergleichen. Diese Untersuchung zeigt,

dass Wechselwirkungen zwischen Land und Klima mit dem höher entwickelten Landoberflächenmodell realistischer simuliert werden. Wir finden jedoch, dass der Effekt der Landoberfläche auf das Klima hingegen eher unterschätzt sein könnte, wenn CLM3.5 als Landoberflächenmodell benutzt wird (Kapitel 3).

Der dritte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit Wechselwirkungen zwischen Vegetationsphänologie und Klima. Für diese Studie benützen wir einen neuen Phänologie-Datensatz, welcher Daten für die gesamte Dauer der Simulationen enthält (1989–2010). Das erlaubt es uns, Simulationen mit jährlicher Variabilität im Blattflächenindex (LAI) anstatt des standardmässigen saisonalen Zyklusses zu berechnen. Zusätzlich sind wir mit dem neuen Datensatz in der Lage, die zeitliche Auflösung des LAI von monatlichen auf tägliche Werte zu erhöhen. Wir berechnen verschiedene Phänologieexperimente und untersuchen den Einfluss von Vegetationsphänologie auf Temperaturextreme. Pauschal gesagt führt eine späte und schwache Vegetationsaktivität zu einer Verstärkung von Hitzewellen. Beispielsweise führte während der Hitzewellen und Dürren in den Jahren 2003 (Zentraleuropa) und 2007 (Südosteuropa) der Rückgang der Vegetationsaktivität während des Sommers, verursacht durch Dürre und sehr hohe Temperaturen, zu einer weiteren Verstärkung der Hitzewellen. Demzufolge können Bedingungen wie Hitze und Dürre, die die Vegetationsaktivität beeinflussen, Hitzewellen zusätzlich zu den Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Temperatur weiter verstärken (Kapitel 4).

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass das Modellsystem COSMO-CLM² ein angemessenes Instrument ist, um Wechselwirkungen zwischen Land und Klima zu studieren und um Klimavariabilität und Extremereignisse in Europa zu simulieren. Wir stellen fest, dass Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Klima und zwischen Vegetationsphänologie und Klima eine wichtige Rolle für das europäische Sommerklima spielen. Die berechneten numerischen Experimente deuten an, dass die Bodenfeuchte einen deutlichen Effekt auf das mittlere Sommerklima und auf Extremereignisse hat, beispielsweise die Persistenz von Hitzewellen, während Wechselwirkungen mit der Vegetationsphänologie nur eine Rolle für Extremereignisse zu spielen scheinen. Dennoch können Wechselwirkungen mit der Vegetationsphänologie in manchen Fällen und in manchen Regionen Hitzewellen fast gleich stark verstärken wie die Bodenfeuchte. Diese Doktorarbeit hebt die Schlüsselrolle von Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Klima und zwischen Vegetationsphänologie und Klima während Hitzewellen und Dürren hervor, welche durch diese Wechselwirkungen wesentlich verlängert und verstärkt werden können.