



Doctoral Thesis

Persistence of soil moisture Controls, associated predictability and implications for land surface climate

Author(s):

Orth, Rene

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009945358> →

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. 21186

Persistence of soil moisture
—
**Controls, associated predictability and
implications for land surface climate**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

RENÉ ORTH

MSc in Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich
born on 29 July 1986
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, examiner
Dr. Randal D. Koster, co-examiner
Prof. Dr. Christof Appenzeller, co-examiner

2013

Abstract

Soil moisture is known for its outstanding persistence characteristics. Through its integrative behavior it can accumulate anomalies of the atmospheric forcing. The resulting soil moisture persistence (or memory) may last from weeks to months, which is especially remarkable in comparison with that of variables such as precipitation and temperature. This underlines the potential value of soil moisture for weather and climate forecasting as a rare quantity that is potentially predictable on (sub-)seasonal time scales. Soil moisture is moreover important in this context as it may affect, depending on the conditions, many other variables of the climate system. These include e.g. runoff, evapotranspiration and temperature, which are impacted by soil moisture through the land water and energy balances. Despite the importance of soil moisture, a comprehensive study of soil moisture and its persistence characteristics is necessarily limited by the sparsity of available observations. Models cannot fully compensate for this because their representations of soil moisture dynamics differ and cannot be validated against measurements.

The aim of this thesis is to assess soil moisture memory characteristics in Europe, its drivers, and its implications for the predictability of land surface variables (soil moisture itself, streamflow, evapotranspiration, and temperature). To overcome the issues induced by the scarcity of soil moisture observations, an alternative approach is developed and used to estimate soil moisture based on widely available streamflow observations. This approach is then used to study temporal and spatial characteristics of soil moisture persistence in Switzerland and Europe.

In a first step, I study the general magnitude of soil moisture persistence and its temporal and spatial variations from available observations in Central Europe and derive two main controls:

- the ratio between initial soil moisture variability and the variability of the subsequent forcing (precipitation minus runoff minus evapotranspiration), which captures the impact of the climate regime and of soil and vegetation characteristics, and
- the correlation between initial soil moisture and subsequent forcing, which reflects the impact of land-atmosphere interactions and propagating forcing persistence.

The forcing is dominated by precipitation, such that its dynamics and its link with soil moisture can explain most of the variations in soil moisture persistence.

To overcome the problem of limited soil moisture observations and hardly comparable model results the second part of this thesis introduces an approach to derive information on soil moisture dynamics from streamflow observations using a conceptual simple water balance model that is forced with observed precipitation and radiation. For this purpose, it is assumed that runoff normalized with precipitation and evapotranspiration normalized with net radiation are simple functions of soil moisture. These dependencies are fitted by comparing modeled and observed streamflow. The results show that even if the model is optimized with respect to streamflow, it produces soil moisture dynamics that are well in line with observations.

In the third part of the thesis, the developed model is applied to >100 catchments with near-natural streamflow dynamics in Switzerland and Europe. This allows the derivation of a spatial picture of soil moisture persistence across the continent. As the simple water balance model also computes streamflow and evapotranspiration data, these are used to point out that soil moisture persistence may be translated to these quantities, depending on the variability of the atmospheric forcing and the coupling strength between soil moisture and both streamflow and evapotranspiration. Furthermore, introducing the mean recovery time from anomalous conditions as a new measure of persistence, I show that strong anomalies last longer, i.e. persistence increases in the case of extreme events.

The fourth part of this thesis focuses on the potential predictability of soil moisture and streamflow. For this purpose, the simple water balance model is forced with atmospheric forcing forecasts from the European centre of medium-range weather forecasting (ECMWF) to derive forecasts of soil moisture and streamflow. The results reveal that streamflow is well predictable, on average, about one week ahead and soil moisture even twice as long, pointing out the practical relevance of hydrological persistence for e.g. agricultural and water resources applications. A comparison of the importance of the initial (soil moisture and snow) conditions versus that of the forcing forecasts shows that streamflow forecasts benefit mostly from accurate forcing forecasts (of which the precipitation forecast is most important), whereas soil moisture forecast skill relies more on the initial (soil moisture) conditions.

Soil moisture predictability is also important in the context of weather and climate forecasting. To illustrate this, I determine in the last part of the thesis an assumed linear relationship between soil moisture and temperature in each investigated catchment and use it to translate soil moisture forecasts into temperature forecasts which are then compared with the respective ECMWF forecasts. For lead times of >2 weeks this simple approach performs equally well in some regions, especially in cases of strong initial soil moisture anomalies, as this allows a strong control of temperature extremes through soil moisture feedbacks.

Overall, this thesis demonstrates the relevance of soil moisture persistence for the land climate system and for hydrological forecasting. I furthermore illustrate that it even has implications for weather and climate forecasting in general. The persistence varies depending on the characteristics of land (soil, vegetation) and climate, and on their potential interaction. The fact that soil moisture is linked with runoff allows the derivation of soil moisture dynamics from

streamflow measurements; this approach constitutes an important avenue to model soil moisture based on observations and to foster future hydrological research and model development.

Zusammenfassung

Die Bodenfeuchte ist eine bisher unterschätzte Grösse für Wetter- und Klimavorhersagen. Durch den Wasser- und Energiekreislauf ist sie mit vielen anderen Variablen des Land-Klima-Systems wie beispielsweise Abfluss, Evapotranspiration und Temperatur gekoppelt. Desweiteren spiegelt die Bodenfeuchte durch die Wasserspeicherkapazität des Bodens vergangene Wetterereignisse und -anomalien lange wider. Diese Persistenz (oft auch engl. ‚memory‘, Gedächtnis) kann Wochen oder Monate andauern und ist damit deutlich grösser als bei anderen Grössen wie Niederschlag und Temperatur. Dadurch ist Bodenfeuchte eine der wenigen Grössen, die potenziell auf einer (sub-)saisonalen Zeitskala vorhersagbar sind. Leider liegen nur wenige Beobachtungen zu Bodenfeuchte und ihren Persistenzeigenschaften vor, was zu unterschiedlichen Modellierungsansätzen geführt hat, die jedoch kaum zu validieren sind.

Es ist daher das Ziel dieser Dissertation einen alternativen Ansatz zur Bodenfeuchtemodellierung basierend auf besser verfügbaren Abflussmessungen zu entwickeln. Dieses Modell soll schweiz- und europaweit angewendet werden, um die zeitlichen und räumlichen Eigenschaften der Bodenfeuchtepersistenz zu untersuchen. Desweiteren werden die Vorhersagbarkeit von Bodenfeuchte und die Auswirkungen der Bodenfeuchtepersistenz auf andere Variablen des Land-Klima-Systems wie Abfluss, Evapotranspiration und Temperatur quantifiziert.

Im ersten Teil dieser Dissertation wird die generelle Stärke der Bodenfeuchtepersistenz, sowie ihre räumliche und zeitliche Variation mit verfügbaren Beobachtungen aus Zentraleuropa analysiert. Dabei ermitteln wir die folgenden zwei wesentlichen Einflussgrössen:

- das Verhältnis der Variabilität der anfänglichen Bodenfeuchte zur Variabilität des darauffolgenden atmosphärischen Antriebs (d.h. verbleibender Niederschlag nach Abzug von Abfluss und Evapotranspiration), welches den Einfluss des Klimaregimes, der Bodeneigenschaften und der Vegetation widerspiegelt sowie
- die Korrelation der anfänglichen Bodenfeuchte mit dem darauffolgenden atmosphärischen Antrieb, welche den Einfluss von Land-Atmosphäre Wechselwirkungen und der Persistenz des atmosphärischen Antriebs beschreibt.

Der atmosphärische Antrieb wird vom Niederschlag dominiert, sodass dessen Dynamik und Kopplung mit der Bodenfeuchte einen Grossteil der Variationen der Bodenfeuchtepersistenz erklären können.

Im zweiten Teil wird darauf aufbauend ein konzeptionelles Wasserbilanzmodell zur Berechnung von Bodenfeuchte, Abfluss und Evapotranspiration eingeführt. Dieses Modell wird mit

Beobachtungen von Niederschlag und Nettostrahlung angetrieben und mit Hilfe von Abflussmessungen kalibriert, jeweils für ein Einzugsgebiet. Es wird vereinfachend angenommen, dass Abfluss (normalisiert mit Niederschlag) und Evapotranspiration (normalisiert mit Nettostrahlung) einfache Funktionen der Bodenfeuchte sind. Dieses beobachtungsbasierte Modell kann beobachtete Bodenfeuchteveränderungen reproduzieren, somit bietet es eine Alternative zu (nicht mit Bodenfeuchte validierten) klassischen Landmodellen und (kaum vorhandenen) direkten Bodenfeuchtebeobachtungen.

Im dritten Teil wird das Wasserbilanzmodell in mehr als 100 Einzugsgebieten in der Schweiz und in Europa angewendet, in denen die natürliche Dynamik des Abflusses möglichst wenig anthropogen beeinflusst ist. Damit wird die räumliche Verteilung der kontinentalen Bodenfeuchtepersistenz bestimmt. Dabei wird gezeigt, dass die Bodenfeuchtepersistenz sich übertragen kann auf Abfluss und Evapotranspiration, abhängig von der Stärke der Kopplung mit Bodenfeuchte und der Variabilität des atmosphärischen Antriebs. Zusätzlich wird die mittlere Erholungszeit von anomalen Bedingungen als neue Grösse zur Messung der Bodenfeuchtepersistenz eingeführt, um letztere als Zeitspanne ausdrücken zu können. Weiterhin kann mit diesem Ansatz gezeigt werden, dass die Persistenz bei Extremereignissen wie Trockenheit oder starken Niederschlägen grösser ist.

Im vierten Teil dieser Dissertation wird die Vorhersagbarkeit von Bodenfeuchte und Abfluss untersucht. Dafür wird das oben genannte Wasserbilanzmodell angewendet und für den Vorhersagezeitraum mit Vorhersagen von Niederschlags- und Nettostrahlungsprognosen aus Wetterberichten des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) angetrieben. Abfluss kann damit im Mittel ungefähr eine Woche im Voraus verlässlich vorhergesagt werden und Bodenfeuchte sogar zwei Wochen. Desweiteren wird die Relevanz der Anfangsbedingungen (Bodenfeuchte und Schneehöhe) verglichen mit der des Wetterberichts in Bezug auf die Vorhersagegenauigkeit von Bodenfeuchte und Abfluss. Die Vorhersage des Abflusses hängt hauptsächlich vom Wetterbericht ab, wobei der Niederschlag den grössten Einfluss hat. Die Vorhersage der Bodenfeuchte hingegen beruht stärker auf den Anfangsbedingungen, insbesondere auf der anfänglichen Bodenfeuchte.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird die Bedeutung der Bodenfeuchte für die Wettervorhersage generell und für die Temperaturvorhersage im Speziellen verdeutlicht. Mit Hilfe von linearen Funktionen zwischen Bodenfeuchte aus dem Wasserbilanzmodell und beobachteten Temperaturen werden die erwähnten Bodenfeuchtevorhersagen in Temperaturvorhersagen überführt. Diese werden mit den dazugehörigen EZMW Vorhersagen verglichen. Für Vorhersagezeiträume über 2 Wochen ist dieser einfache Ansatz dank der Bodenfeuchtepersistenz in manchen Einzugsgebieten ähnlich gut. Besonders im Falle von starken anfänglichen Bodenfeuchteanomalien, denn unter solchen Bedingungen ist die Temperatur stärker mit der Bodenfeuchte gekoppelt.

Diese Dissertation demonstriert die Relevanz von Bodenfeuchtepersistenz für das Land-Klima-System und für hydrologische sowie Wetter- und Klima- Vorhersagen. Die Persistenz vari-

iert in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Landoberfläche (Boden, Vegetation) und des Klimas, sowie von deren Wechselwirkungen. Es wird gezeigt, dass die Kopplung der Bodenfeuchte mit Abfluss die zuverlässige Bestimmung von Bodenfeuchteveränderungen aus Abflussmessungen ermöglicht. Dieser Ansatz bietet eine wichtige Möglichkeit die Bodenfeuchte beobachtungsbasiert zu modellieren und dadurch die hydrologische Forschung und Modellentwicklung zu unterstützen.