

# Climate research applications of remote-sensing based soil moisture: spatial representativeness, predictability and drought response

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Nicolai-Shaw, Nadine

**Publication date:**

2016

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010744300>

**Rights / license:**

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

DISS. ETH NO. 23745

**Climate research applications of remote-sensing based soil  
moisture: spatial representativeness, predictability and  
drought response**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
Nadine Roxanne Nicolai-Shaw  
MSc Hydrology, VU University Amsterdam

born on 23.06.1982

citizen of  
Netherlands and United States

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, examiner  
Prof. Dr. Wolfgang Wagner, co-examiner  
Dr. Martin Hirschi, co-examiner  
Dr. Lukas Gudmundsson, co-examiner

2016

# Abstract

Though soil moisture might take up only a small amount of water in the hydrological cycle, it is crucial for various important processes, not the least of which is sustaining plant life and thus food production. A surplus or lack of water on land and in the soils can lead to floods and droughts, and affect vegetation. Also, through its influence on the partitioning of latent and sensible heat at the land surface, low soil moisture conditions have been linked to the occurrence and persistence of extreme temperatures in many regions of the world. In addition, precipitation and air temperature forecasts show improvement when initialized with realistic soil moisture conditions, and streamflow and flood prediction can be improved by employing even coarse scale resolution soil moisture estimates in discharge models. It is therefore no wonder that in 2010 soil moisture was recognized as an Essential Climate Variable (ECV) by the Global Climate Observing System (GCOS) program. In this same year, the European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) soil moisture project was initiated, a project dedicated to producing “*the most complete and most consistent global soil moisture data record based on active and passive microwave sensors*”. The aim of this thesis is not a direct validation of the CCI soil moisture product with e.g. ‘ground truth’ data. Instead I set out to show its value for climate studies, by confronting the data set with various climate application, answering three main questions.

In Chapter 2 of this thesis I set out to determine the footprint of a soil moisture measurement by assessing the spatial representativeness of the temporal dynamics of absolute soil moisture and its temporal anomalies over North America for in situ, remote-sensing (CCI-SM), and land surface model based (ERA-Land) soil moisture estimates. The applied method allows for quantifying and comparing the spatial footprint of the individual soil moisture estimates. Results show that at the in situ locations the CCI-SM and ERA-Land products perform similarly for absolute soil moisture, while for the temporal anomalies the CCI-SM product shows more similarity in spatial representativeness with the in situ data. For the fully gridded products, the largest differences in spatial representativeness are found for the absolute values. Differences in spatial representativeness between products can be related to some of their intrinsic characteristics. An example is the low similarities in spatial representativeness between CCI-SM and ERA-Land in topographically complex terrains and areas with dense vegetation. These are

areas in which remote sensing of soil moisture is the most challenging while in ERA-Land smoothed model topography and surface properties affect soil moisture and its spatial representativeness.

In Chapter 3 the the long lead time predictability (i.e. one to five months) of soil moisture dynamics is assessed at the global scale. The analysis is performed on two independent global soil moisture products, satellite remote-sensing observations from CCI-SM, and land surface model estimates from ERA-Land. By applying a two step approach, using first persistence only as predictor and then including three teleconnection indices indicative of the main northern (NAO), tropical (SOI) and southern (AAO) atmospheric modes of variability, the added value of large-scale atmospheric drivers in addition to soil moisture persistence only could be assessed. Results show significant skill in predicting soil moisture variability for many regions of the world, with lead times up to five months. As lead times increase, large-scale atmospheric drivers play an increasingly important role, and areas influenced by teleconnection indices show higher predictability. This long lead time predictability of soil moisture may help to improve early warning systems for important natural hazards, such as heatwaves, droughts, wildfires and floods and their related impacts.

In Chapter 4 the impact of soil moisture deficits on the climate system are investigated by studying the relationship between extreme dry soil moisture conditions and climate variables such as temperature, precipitation, evapotranspiration and vegetation activity, quantified using drought event composite analysis. The results are then summarized, differentiating between five distinct climate classes and land cover types. A relationship is found between extreme dry soil moisture conditions and all investigated climate variables. A delayed response found in vegetation activity is likely linked to roots accessing deeper soil layers, which are not (yet) water limited. In temperate wet climates droughts are preceded by a precipitation deficit, while in other regions droughts often take place during anomalously hot years. There are strong regional and seasonal differences, with the strongest relationship in temperate wet climates. This identification of drought sensitive areas can have implications for mitigation and adaptation strategies

CCI-SM played a central role in the three studies presented in this thesis, and the results highlight the potential for satellite remote-sensing based soil moisture in climate related studies. The release of the next data set (v3.2) is imminent, promising even further improvements as well as an extension of the temporal coverage until December 2015.

# Zusammenfassung

Obwohl die Bodenfeuchte nur einen kleinen Teil des gesamten Wassers im Wasserkreislaufs ausmacht, ist sie von grosser Bedeutung für eine Vielzahl von Prozessen, nicht zuletzt insbesondere solche, die von Bedeutung für die Pflanzenaktivität und die Lebensmittelproduktion sind. Ein Überschuss oder Mangel an Wasser auf Land und in den Böden kann zu Überschwemmungen und Dürren führen und hat Auswirkungen auf die Vegetation. Durch den Einfluss der Bodenfeuchte auf die Partitionierung der latenten und fühlbaren Wärmeflüsse an der Landoberfläche wird auch das Auftreten und die Persistenz extremer Temperaturen unter Bedingungen niedriger Bodenfeuchte in vielen Regionen der Welt beeinflusst. Darüber hinaus werden Vorhersagen des Niederschlags und der Temperatur verbessert, wenn sie mit realistischen Bodenfeuchtebedingungen initialisiert werden. Abfluss- und Hochwasservorhersagen durch hydrologische Modelle können ferner selbst durch die Einbeziehung grob-aufgelöster Bodenfeuchteschätzer verbessert werden. Daher ist es nur folgerichtig, dass die Bodenfeuchte im Jahr 2010 als “Essential Climate Variable” (ECV) innerhalb des “Global Climate Observing System”-Programms (GCOS) anerkannt wurde. Im selben Jahr wurde durch die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) das Climate Change Initiative (CCI) Bodenfeuchteprojekt ins Leben gerufen, mit dem Ziel “den vollständigsten und einheitlichsten Datensatz globaler Bodenfeuchtedaten basierend auf aktiven und passiven Mikrowellensensoren” zu generieren. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist nicht eine direkte Validierung des CCI Bodenfeuchtedatensatzes (CCI-SM) mit bspw. Bodenmessungen. Stattdessen setze ich mir als Ziel, den Wert der CCI Bodenfeuchtedaten für Klimastudien aufzuzeigen. In der ersten Studie wird die räumliche Repräsentativität unterschiedlicher Bodenfeuchteschätzer (in-situ und fernerkundungsbasierte Beobachtung sowie modellbasierte Schätzer) untersucht. Die zweite Studie beurteilt die Vorhersagbarkeit der Bodenfeuchtedynamik im globalen Massstab, während in der dritten Studie der Einfluss extrem trockener Bodenfeuchtebedingungen auf Temperatur, Niederschlag, Verdunstung und Vegetationsaktivität quantifiziert wird.

In Kapitel 2 der vorliegenden Dissertation wird die räumliche Repräsentativität der zeitlichen Dynamik der absoluten Bodenfeuchte und der zeitlichen Anomalien über Nordamerika für in-situ und fernerkundungsbasierte (CCI-SM) Bodenfeuchtedaten und für Bodenfeuchteschätzungen basierend auf ei-

nem Landoberflächenmodell (ERA-Land) untersucht. Der verwendete methodische Ansatz ermöglicht es, den räumlichen Footprint der einzelnen Bodenfeuchteschätzungen zu quantifizieren und zu vergleichen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass an den in-situ Messstandorten die CCI-SM und ERA-Produkte in Bezug auf die absoluten Bodenfeuchtwerte eine ähnliche Güte zeigen, während für die zeitlichen Anomalien das CCI-SM Produkt mehr Ähnlichkeit mit der räumlichen Repräsentativität der Stationsmessdaten zeigt. Für die gegiterten Datenprodukte findet man die grössten Unterschiede in der räumlichen Repräsentativität für die Absolutwerte der Bodenfeuchte. Die Unterschiede in der räumlichen Repräsentativität der Bodenfeuchte zwischen den Datenprodukten können auf einige ihrer spezifischen Eigenschaften zurückgeführt werden. Ein Beispiel dafür ist die geringe Gemeinsamkeit in der räumlichen Repräsentativität zwischen CCI-SM und ERA-Land in Regionen mit komplexer Topographie und in Regionen mit dichter Vegetation, d.h. in Regionen in denen die Fernerkundung der Bodenfeuchte eine grosse Herausforderung darstellt, während in ERA-Land die geglätteten Modelleigenschaften in Bezug auf Topographie und Oberflächeneigenschaften, Bodenfeuchteschätzungen und die entsprechende räumliche Repräsentativität beeinflussen.

In der zweiten Studie (Kapitel 3) wird die lange Vorlaufzeit der Vorhersagbarkeit der Bodenfeuchtedynamik im globalen Massstab untersucht, mit Schwerpunkt auf Vorlaufzeiten oberhalb der synoptischen Zeitskala (d.h. zwischen 1 bis 5 Monaten). Die Unterscheidung zwischen dem Einfluss der Persistenz der Bodenfeuchte und grossräumiger, atmosphärischer Prozesse erfolgt durch einen zweistufigen Ansatz, indem zunächst nur die Persistenz für die Vorhersage benutzt wird und nachfolgend drei Telekonnektionsindizes, welche die wichtigsten Modi der atmosphärischen Variabilität repräsentieren (NAO, SOI, AAO), in die Vorhersage mit einbezogen werden. Die Studie beruht auf zwei unabhängigen, globalen Bodenfeuchtedatensätzen, zum Einen auf Basis von Satellitenbeobachtungen (CCI-SM) und zum Anderen auf Basis von Modellberechnungen der Landoberfläche (ERA-Land). Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeit auf, die Bodenfeuchtevariabilität für viele Regionen der Welt mit Vorlaufzeiten von bis zu fünf Monaten aussagekräftig vorherzusagen. Bei Verlängerung der Vorlaufzeiten spielen grossräumige, atmosphärische Prozesse eine zunehmend wichtige Rolle und Regionen, die von Telekonnektionsindizes beeinflusst werden, zeigen eine höhere Vorhersagbarkeit. Die lange Vorlaufzeit in Bezug auf die Vorhersagbarkeit der Bodenfeuchte könnte helfen, Frühwarnsysteme für bedeutende Naturgefahren wie Hitzewellen, Dürren, Waldbrände und Überschwemmungen zu verbessern.

Die letzte Studie (Kapitel 4) untersucht den Einfluss von extrem trockenen Bodenfeuchtebedingungen auf die Temperatur, den Niederschlag, die Verdunstung und die Vegetationsaktivität. CCI-SM wird verwendet um Trockenperioden zu bestimmen, worauf der Einfluss solcher Trockenperioden auf das entsprechende Dürreereignis mithilfe von „drought event composites“ quantifiziert wird. Letztlich wird dieser Einfluss zusammengefasst indem zwi-

schen fünf verschiedenen Klimaklassen und verschiedenen Bodenbedeckungstypen unterschieden wird. Perioden extrem niedriger Bodenfeuchte beeinflussen alle untersuchten Variablen, wobei der Einfluss in gemässigten, feuchten Regionen am stärksten ist. In diesen Regionen geht Dürren ein Niederschlagsdefizit voraus, während es in anderen Regionen oft in ausserordentlich heissen Jahren zu Dürren kommt. Weiterhin ist die verzögerte Reaktion der Vegetationsaktivität höchstwahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass Wurzeln tiefere Bodenschichten erreichen, in welchen das vorhandene Bodenwasser (noch) nicht limitiert ist.

Das CCI-SM Datenprodukt spielt eine zentrale Rolle in den drei im folgenden vorgestellten Studien und die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial dieses Datensatzes für die Verwendung im Rahmen klimabezogener Studien. Die Veröffentlichung der nächsten Version des Datensatzes (v3.0) steht unmittelbar bevor und beinhaltet weitere Verbesserungen sowie eine Erweiterung der zeitlichen Abdeckung bis Dezember 2015.