



Doctoral Thesis

Soil moisture in Switzerland analyses from the Swiss soil moisture experiment

Author(s):

Mittelbach, Heidi

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007142621> →

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. 20114

**Soil Moisture in Switzerland:
Analyses from the Swiss Soil Moisture Experiment**

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Heidi Mittelbach

Dipl. Hydrol., University of Dresden
born 22 September 1980
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, examiner
Prof. Dr. Harry Vereecken, co-examiner
Prof. Dr. Adriaan J. Teuling, co-examiner
Dr. Irene Lehner, co-examiner

Zurich 2011

Abstract

Soil moisture is an essential climate variable as it affects the surface fluxes with consequent impacts on temperature, boundary layer stability, and precipitation. In recent years, the investigation of its influence for land surface-atmosphere interactions and its potential role in the climate system gained increasing attention. Soil moisture observations are crucial for these investigations. However, soil moisture is still not routinely measured and there is a lack of observation in many parts of the world.

The aim of this thesis is to fill a part of the gap in soil moisture observations for Europe through the setup of the large-scale and long-term SwissSMEX soil moisture network and through the analyses of this data set with respect to soil moisture dynamics in Switzerland. The emphasis is placed on the detailed evaluation of low-cost soil moisture sensors and on the investigation of the spatio-temporal variability of soil moisture dynamics within the established network. In addition, a first analysis of soil moisture patterns across grassland and forest sites is realized using the SwissSMEX data set.

A first part (Chapter 2 and Chapter 3) of this thesis focuses on the evaluation and comparison of low-cost soil moisture sensors. In a first study (Chapter 2), the performance of the applied low-cost soil moisture sensor 10HS (Decagon Devices, United States) is evaluated using laboratory and field measurements from two SwissSMEX sites. Measurements of absolute volumetric water content (VWC) at several installation depths, the integrated column soil moisture, as well as the loss of soil moisture for precipitation free days are compared with gravimetric samples and time domain reflectometry (TDR) measurements. The measurements of the 10HS sensors agree well for low VWC using both laboratory and field measurements. A considerable limitation of the 10HS sensor is found in the decreasing sensitivity of the sensor reading for VWC variations above $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. A dependency of the sensor on soil characteristics limits the applicability of a laboratory calibration function. However, with site-specific calibration functions derived from parallel 10HS and TDR measurements, the measurement error of the 10HS sensor can be decreased and the day-to-day variability of soil moisture is captured. Consequently, the 10HS sensor is found to be appropriate for many applications in climate research. The second study (Chapter 3) compares four parallel installed soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. This study does not intend to provide calibration functions for the sensors, but focuses on the sensors performance when using calibration functions provided by the manufacturer. Two years of measurements from parallel installed soil moisture sensors down to 110 cm are compared. The low-cost instruments 10HS (Decagon Devices, United States), CS616 (Campbell Scientific, United States), and SISOMOP (SMG University of Karlsruhe, Germany) are evaluated against the TDR-based TRIME-IT/-EZ

(IMKO GmbH, Germany) sensors. Under the given field conditions, the root mean square error (RMSE) of absolute VWC are up to $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ for the low-cost sensor compared to TDR measurements. The RMSE of the anomalies are lower with lowest values in summer, when lowest VWC occurs. For the CS616 sensor type, a strong temperature dependency is found, which is not minimized using the correction function provided by the manufacturer. The measurement errors are also reflected in poor estimations of the evapotranspiration, which is compared with measurements from a weighing lysimeter. We conclude that under the given conditions none of the evaluated low-cost sensors have a level of performance consistent with that indicated by the respective manufacturer. Thus, an evaluation of applied sensor types is essential to quantify measurement errors and to derive site-specific calibrations functions, which is also vital to improve soil moisture measurements.

In the second part of the thesis (Chapter 4 and 5) first analyses of soil moisture dynamics within the new SwissSMEX network are provided. A new perspective for the analyses of the spatio-temporal variability of soil moisture is tested (Chapter 4) using 15-month time series from 14 grassland sites of the SwissSMEX network. This study highlights the advantage of long-term soil moisture measurements, as they enable to distinguish between the temporal mean and the temporal anomalies of soil moisture and to assess their respective contributions to the overall spatial variability of soil moisture. For the given conditions, the time invariant temporal mean is found to be the most relevant contributor to the spatial variability of absolute soil moisture, while the time varying anomalies contribute less. Furthermore, we find that the temporal mean and the anomalies do not necessarily present similar spatio-temporal characteristics. Largest differences with high negative correlations for the soil moisture mean and anomalies are found for the particularly dry 2011 spring. The application of the rank stability concept for the whole period shows that the rank stability of absolute soil moisture is mostly influenced by the time invariant temporal mean and does not reflect the rank stability of time varying anomalies. This study demonstrates that conclusions derived from spatio-temporal analyses of absolute soil moisture do generally not apply for the temporal anomalies of soil moisture, and thus do not reflect a behavior related to soil moisture dynamics. A second study (Chapter 5) compares soil moisture between grassland sites and nearby forest sites. Three of four paired SwissSMEX sites are considered in this study. The main focus is on the recession of soil moisture, which is related to evapotranspiration for dry-down periods. Grassland shows consistently a twice as fast decay of soil moisture compared to the forest sites, implying a twice as high evapotranspiration rate for the former. Thus, even under normal meteorological conditions, the vegetation cover is found to have a major impact on land surface-climate interactions.

In summary, this thesis considerably contributed to the development of the SwissSMEX network and the concluded analyses provided helpful insights on 1) the performance of soil moisture sensors, 2) spatio-temporal dynamics of soil moisture, and 3) distinction in soil moisture behavior between grassland and forest sites. We expect that the established SwissSMEX network and data set will be highly valuable for further analyses on the role of soil moisture for land surface-climate interactions in Central Europe.

Zusammenfassung

Bodenfeuchte ist eine bedeutende Klimavariablen, die die bodennahen Flüsse der Energie und Wasserbilanz beeinflusst und damit verbunden Auswirkungen auf Temperatur, Grenzschichtstabilität und Niederschlag hat. In den vergangenen Jahren haben Untersuchungen auf Einflüsse auf Wechselwirkungen zwischen Landoberflächen und Atmosphären und deren potentielle Rolle für das Klimasystem immer mehr Aufmerksamkeit erlangt. Auch wenn Beobachtungen von Bodenfeuchte für solche Untersuchungen essentiell sind, wird diese Variable noch immer nicht routinemässig gemessen. Darüber hinaus existieren in vielen Teilen der Welt überhaupt keine Beobachtungen.

Das Ziel dieser Arbeit ist, Bodenfeuchtemessungen durch den Aufbau des grossflächig und langfristig angelegten SwissSMEX Bodenfeuchtenetzwerkes bereitzustellen und den erhaltenen Datensatz in Hinblick auf die Bodenfeuchtedynamik in der Schweiz zu analysieren. Der Schwerpunkt liegt in der Evaluation von kostengünstigen Bodenfeuchtesensoren sowie in der Untersuchung der räumlich-zeitlichen Variabilität der Bodenfeuchtdynamik. Weiterhin wird das Verhalten der Bodenfeuchte für Wiese- und Waldflächen betrachtet.

Der erste Teil fokussiert auf die Evaluation und den Vergleich von kostengünstigen Bodenfeuchtesensoren (Kapitel 2 und 3). In der ersten Studie (Kapitel 2) werden die Eigenschaften des zur Anwendung kommenden 10HS Sensors (Decagon Devices, Vereinigte Staaten) unter Labor- und Feldbedingungen evaluiert. Dabei werden Messungen des absoluten Wassergehaltes in verschiedenen Tiefen, die Bodenfeuchte über eine definierte Bodensäule sowie die Bodenfeuchteänderung mit gravimetrischen Messungen und mit auf Time-Domain-Reflectometry (TDR) basierenden Messungen verglichen. Niedrige Wassergehalte werden vom Sensor gut erfasst. Eine wesentliche Limitierung des Sensors liegt jedoch in der Abnahme der Messgenauigkeit für Wassergehaltsänderungen über $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Ausserdem schränkt eine Abhängigkeit von Bodeneigenschaften die Anwendung einer unter Laborbedingungen abgeleiteten Kalibrierungsfunktion ein. Werden standortspezifisch Kalibrierungsfunktionen verwendet, die für diese Studie mit Hilfe von parallel messenden TDR Sensoren erstellt werden, verringert sich der Messfehler des Sensors markant und die tägliche Variabilität der Bodenfeuchte wird gut erfasst. Schlussfolgernd ist der 10HS Sensor für Anwendungen in den Klimawissenschaften einsetzbar. In einer zweiten Studie (Kapitel 3) werden vier Bodenfeuchtesensoren für einen Standort in der Schweiz miteinander verglichen. Diese Studie beabsichtigt nicht Kalibrierungsfunktionen bereit zu stellen, vielmehr ist der Fokus im Vergleich der Messungen unter Anwendung der Herstellerfunktionen zu sehen. Es werden Messungen von den parallel installierten Sensoren über einen Zweijahreszeitraum verglichen. Die kostengünstigen Sensoren 10HS (Decagon Devices, Vereinigte Staaten), CS616 (Campbell Scientific, Vereinigte Staaten) und SISOMOP (SMG Universität Karlsruhe, Deutschland)

werden gegenüber dem TDR-basierten TRIME-IT/-EZ (IMKO GmbH, Deutschland) Sensor bewertet. Unter den Standortbedingungen ist die mittlere quadratische Abweichung (RMSE) des absoluten Wassergehaltes bis zu $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Der RMSE der Bodenfeuchteanomalien ist im Sommer geringer, wenn die niedrigsten Wassergehalte auftreten. Der CS616 Sensor weist eine zweifelhafte Temperaturabhängigkeit auf, welche sich durch Anwendung einer vom Hersteller gelieferten Korrektur nicht beheben lässt. Die aufgezeigten Messunsicherheiten spiegeln sich ebenfalls in einer mangelnden Bestimmung der Verdunstung wider, die mit Bodenfeuchtemessungen über den Bodenwasserhaushalt abgeschätzt werden kann. Für die gegebenen Standortbedingungen wird zusammengefasst, dass keiner der untersuchten kostengünstigen Sensoren die vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit aufweist. Die Evaluierung von Sensoren ist somit für die Quantifizierung von Messfehlern und zur Ermittlung einer standortspezifischen Kalibrierungsfunktion unerlässlich.

Der zweite Teil dieser Arbeit (Kapitel 4 und 5) beinhaltet erste Analysen des SwissSMEX Datensatzes. Ein neuer Ansatz für die Untersuchung der räumlich-zeitlichen Variabilität der Bodenfeuchte wird unter der Verwendung einer 15-monatigen Zeitreihe von 14 SwissSMEX Bodenfeuchtemessstandorten getestet (Kapitel 4). Diese Studie verdeutlicht den Vorteil von Langzeitmessreihen, welche eine Unterscheidung der absoluten Bodenfeuchte in eine zeitlich mittlere Bodenfeuchte und deren zeitliche Anomalie zulässt. Somit lässt sich deren jeweiliger Anteil zur gesamten Bodenfeuchtevariabilität beurteilen. Unter den gegebenen Bedingungen ist der Anteil der zeitlich invarianten Bodenfeuchte am bedeutendsten, während der Anteil der zeitlich variierenden Anomalie geringer ist. Weiterhin wird festgestellt, dass die räumlich-zeitlichen Eigenschaften der zeitlich invarianten und zeitlich variierenden Terme nicht zwingend ähnlich sind. Die grössten Unterschiede mit hohen negativen Korrelationen werden für den besonders trockenen Frühling 2011 beobachtet. Zudem verdeutlicht die Anwendung des "rank stability"-Konzeptes über den gesamten Zeitraum, dass die "rank stability" der absoluten Bodenfeuchte vorwiegend durch den zeitinvarianten Term beeinflusst wird und nicht die zeitlich variierende Bodenfeuchtedynamik widerspiegelt. Diese Studie zeigt auf, dass sich Schlussfolgerungen aus der Analyse der räumlich-zeitlichen Variabilität der Bodenfeuchte nicht generell auf die Variabilität ihrer Anomalie übertragen lassen. Eine zweite Studie (Kapitel 5) vergleicht die Bodenfeuchte zwischen Wiesen- und Waldstandorten dreier von insgesamt vier paarweisen SwissSMEX Standorten. Schwerpunkt dieser Studie liegt auf der Rückgangskurve der Bodenfeuchte, die für niederschlagsfreie Perioden mit der Verdunstung in Zusammenhang gebracht werden kann. Im Vergleich zu den Waldstandorten zeigen die Wiesenstandorte jeweils einen doppelt so schnellen Rückgang der Bodenfeuchte auf, was zu einer zweimal höheren Verdunstungsrate über Wiese führt. Dies verdeutlicht, dass selbst unter normalen meteorologischen Bedingungen die Vegetationsbedeckung für Landoberflächen-Klima-Wechselwirkungen einen wesentlicheren Einfluss hat als topographische Standorteigenschaften.

Diese Arbeit trägt erheblich zum Aufbau des SwissSMEX Bodenfeuchte Netzwerkes bei und liefert hilfreiche Erkenntnisse 1) zu Messeigenschaften von Bodenfeuchtesensoren, 2) zu der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Bodenfeuchte in der Schweiz und 3) zum Verhalten der Bodenfeuchte für Wiesen- und Waldstandorte bei. Wir erwarten, dass das aufgebaute SwissSMEX Netzwerk und dessen Datensatz für weitere Analysen von Landoberflächen-Klima-Wechselwirkungen in Europa von hohem Nutzen ist.

Sommario

L'umidità del terreno è una delle principali variabili climatiche. L'umidità del terreno influenza direttamente i flussi superficiali, può determinare variazioni di temperatura, della stabilità dello strato limite planetario (o Planetary Boundary Layer, PBL) e delle precipitazioni. Negli ultimi anni l'umidità del terreno è stata riconosciuta come un fattore determinante dei sistemi climatici e dello scambio energetico tra terreno e atmosfera. Nonostante ciò, e nonostante quindi il fatto che sia stata riconosciuta l'importanza di effettuare misurazioni continue di umidità del terreno, le reti di misurazione permanente sono perlopiù inesistenti, o comunque parsimoniose ed inadeguate a fornire osservazioni sperimentali con la necessaria risoluzione spazio-temporale.

Con questo Dottorato di ricerca si è voluto migliorare la tecnica per la misurazione di umidità del terreno tramite la calibrazione e la messa in stazione di una nuova rete di misurazione permanente in Svizzera (SwissSMEX). In secondo luogo, tramite alcune delle misurazioni effettuate è stato poi possibile analizzare la variabilità spazio-temporale dell'umidità del terreno in Svizzera, facendo particolare attenzione alle differenze dovute alla copertura vegetativa dei siti (e.g., boschi o prati).

La prima parte di questa tesi (Capitolo 2 e Capitolo 3) presenta la valutazione dei sensori commerciali utilizzati per le misurazioni dell'umidità del terreno: Decagon 10HS (Decagon Devices, Stati Uniti). La valutazione dell'affidabilità dei 10HS è effettuata sia tramite misure di laboratorio che con misure di campo SwissSMEX. In particolare, le analisi delle misure effettuate a diverse profondità hanno portato al confronto tra contenuto di acqua volumetrico assoluto (VWC), totale contenuto d'acqua integrato sull'intera sezione verticale, decadimento di umidità del terreno in seguito ad un periodo privo di precipitazioni e l'umidità del terreno misurata in campo con sensori di tipo TDR (Time Domain Reflectometry), i quali garantiscono un'altissima precisione. Le misure effettuate con i sensori 10HS hanno mostrato piena affidabilità per misure di basso VWC, sia in laboratorio che in campo. Lo studio ha però anche mostrato che i sensori 10HS hanno una ridotta sensibilità per valori di VWC superiore a $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e che le loro prestazioni dipendono dal tipo di terreno. L'ultimo aspetto limita l'applicabilità delle curve di calibrazione dedotte in laboratorio, che comunque si è visto non sia necessaria se una calibrazione locale viene eseguita, ad esempio con misurazioni 10HS e TDR condotte in parallelo. In questa maniera, i sensori 10HS si sono rivelati capaci di misurare la variabilità giornaliera dell'umidità del terreno e sono quindi ritenuti affidabili per la maggioranza degli studi concernenti i cambiamenti climatici. Il secondo studio della prima parte della tesi (Capitolo 3) intende testare le curve di calibrazione normalmente fornite dalle case costruttrici dei sensori. In particolare, sono stati testati quattro tipologie di sensori, il 10HS, il CS616 (Campbell Scientific, Stati Uniti), il SISOMOP (SMG università di Karlsruhe,

Germania) e il TRIME-IT/-EZ (IMKO GmbH, Germania, il sensore di riferimento in quanto basato su tecnologia TDR) sulla base di due anni di osservazioni condotte in un unico sito Svizzero fino ad una profondità pari a 110 cm. Le misurazioni di umidità e i relativi tassi di evapotraspirazione sono poi stati confrontati con le misure di un lisimetro a bilancia installato nello stesso sito dell'esperimento. I risultati mostrarono un errore quadratico medio (RMSE) dei sensori commerciali pari a $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. L'RMSE delle anomalie erano inferiori, specialmente in estate in concomitanza dei bassi valori di VWC. Il sensore CS616 è risultato essere influenzato dalla temperatura. In conclusione, lo studio ha mostrato che tutti i sensori commerciali testati non presentano l'affidabilità invece indicate dalle case produttrici. Ciò indica anche il fatto che questo genere di studi è fondamentale per una corretta stima degli errori commessi e quindi dei veri valori di umidità del terreno.

La seconda parte di questa tesi di Dottorato (Capitolo 4 e Capitolo 5) focalizza sulla dinamica dell'umidità del terreno all'interno della rete di misurazione SwissSMEX. Lo sviluppo di una nuova metodologia, basata su 15 mesi di osservazioni in 14 siti coltivati a prato, ha portato a concludere che la variabilità spazio-temporale dell'umidità del terreno è principalmente attribuibile alla media temporale e solo secondariamente alle anomalie temporali. Inoltre, è stato dimostrato che la variabilità della media e delle anomalie temporali si comportano diversamente rispetto alle osservazioni condotte nella stazione più rappresentativa della rete di misurazione utilizzata. In particolare, è stato il caso della primavera del 2011. L'applicazione del concetto di Ranks Stability ha portato infine alla conclusione che gli studi basati solamente sulla misura di umidità del terreno assoluta non possono riprodurre la dinamicità della variabile di interesse, invece spiegata dalla media e dalle anomalie temporali. Il Capitolo 5 presenta invece i metodi e i risultati di uno studio riguardante le differenze di umidità del terreno osservate in zone coltivate a prato e boschive. I risultati hanno mostrato che il decadimento del VWC nelle zone a prato è doppio rispetto a quello delle zone boschive e che quindi la copertura vegetativa è un fattore chiave per la regolazione degli scambi energetici tra suolo e atmosfera.

In conclusione, questa tesi di Dottorato ha dato un contributo fondamentale allo sviluppo della rete di osservazioni SwissSMEX. Queste misurazioni sono poi state utilizzate per analizzare e valutare: 1) l'attendibilità dei sensori di umidità del terreno utilizzati, 2) la variabilità spazio-temporale dell'umidità del terreno e 3) le differenze tra l'umidità del terreno nei siti boschivi e quelli coltivati a prato. Le misurazioni della rete SwissSMEX si sono dimostrate molto importanti e verranno certamente impiegate per espandere le analisi devote ad approfondire l'importanza dell'umidità del terreno per lo studio della relazione superficie terrestre – clima in Europa centrale.