



## Doctoral Thesis

# The potential impacts of enhanced soil moisture and soil fertility on smallholder crop yields in Southern Africa

**Author(s):**

Andersson, Jafet Clas Martin

**Publication Date:**

2011

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006472209> →

**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. 19600

**The Potential Impacts of Enhanced Soil Moisture and Soil Fertility  
on Smallholder Crop Yields in Southern Africa**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

by

JAFET CLAS MARTIN ANDERSSON

M.Sc. in Water and Environmental Studies, Linköping University, Sweden

born 5<sup>th</sup> December 1979

citizen of Sweden

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bernhard Wehrli, examiner

Prof. Dr. Alexander J.B. Zehnder, co-examiner

Dr. Hong Yang, co-examiner

Zurich, Switzerland, 2011

## Summary

One strategy to feed the human population in a sustainable manner is to increase the agricultural productivity through improved management of locally available resources. To address the challenges of high rainfall variability and low soil fertility in Sub-Saharan Africa, low-cost soil moisture and soil fertility enhancing technologies, such as water harvesting (WH) and ecological sanitation (Ecosan), are particularly favoured. In this dissertation, crop growth constraints in smallholder rain-fed agriculture are analysed on river basin and regional scales in Southern Africa. The dissertation proceeds with a quantification of the potential impacts of WH, Ecosan, and other irrigation and fertilization technologies on maize yield (the local staple food crop), evaporation, transpiration, and river flow regimes. Building on this, it identifies locations and conditions where such technologies could be suitable, and analyses their potential to improve agricultural productivity and food security.

A scenario analysis is used together with the SWAT agro-hydrological computer model (Soil and Water Assessment Tool). The Sequential Uncertainty Fitting algorithm is applied to calibrate the model against river discharge and maize yield, and to quantify prediction uncertainty. The dissertation consists of four studies detailing baseline conditions, model performance, data processing methods, and potential impacts of WH and Ecosan technologies in the Thukela River basin (29,000 km<sup>2</sup>) and throughout Southern Africa (1.8 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>).

The first study quantifies the model performance and estimates the water availability for *in situ* WH, supplemental water demand (SWD) in smallholder agriculture, and the reliability of *in situ* WH in the Thukela River basin. On average, 0–17 mm of runoff water is available for *in situ* WH each year (95% prediction uncertainty range (95PPU)). This may meet some but not all of the SWD (median: 0–113 mm a<sup>-1</sup>, 95PPU). The reliability of *in situ* WH (the percentage of years in which the water availability ≥ SWD) is highly location specific and overall rather low. Of the 1850 km<sup>2</sup> of smallholder lands, 20–28% display a reliability ≥ 25%, 13–16% a reliability ≥ 50%, and 4–5% a reliability ≥ 75% (95PPU). Hence, the risk of failure of *in situ* WH is relatively high in many areas. These results build on a satisfactorily performing model. The Root Mean Squared Error for smallholder maize yield was 0.02 t ha<sup>-1</sup> during both the calibration and evaluation periods. The range in the coefficient of determination ( $R^2$ ) for discharge during the calibration (evaluation) period was 0.42–0.83 (0.28–0.72).

The second study explores the potential impacts of application of *in situ* WH and fertilization with stored human urine (Ecosan) in the Thukela River basin. Based on the model results, the impacts on smallholder maize yields are likely to be small with *in situ* WH (median change: 0%) but significant with Ecosan (median increase: 30%). The primary causes for these effects were high nitrogen stress on crop growth, and low or untimed soil moisture enhancement with *in situ* WH. However, the impacts varied significantly in time and space, occasionally resulting in yield increases of up to 40% with *in situ* WH. Full fertilization increased yields by a factor of five, whereas full irrigation reduced spatial yield variability by a third. Fertilization significantly improved the productivity of the evaporative fluxes by increasing transpiration (Ecosan median: +2.8%, 4.7 mm season<sup>-1</sup>) and reducing soil and canopy evaporation (Ecosan median: -1.7%, -4.5 mm season<sup>-1</sup>). *In situ* WH did not generally affect the river flow regimes. Occasionally, significant regime changes occurred due to enhanced lateral and shallow aquifer return flows, such as higher risk of flooding and increased low flows.

The third study focuses on improving model performance through a more efficient use of sparse climatic data. Two approaches to obtain climatic time series for SWAT were compared: the conventional centroid method and time-dynamic Voronoi tessellation. Climatic time series were estimated with each method for each sub-basin in Southern Africa. The Voronoi method utilized all available precipitation and temperature data, but the centroid method used only 14.5% and 82.5%, respectively. With the centroid method, sub-basin time series were on average 42% and 63% incomplete, respectively. With the Voronoi method, all sub-basin time series were complete. SWAT was fed with each climate dataset. Each model setup was independently calibrated and validated against 213 discharge stations and smallholder maize yields from eight provinces in South Africa. A similar performance was obtained for maize yield with both methods, but discharge simulations improved significantly with the Voronoi method. The  $R^2$  between observed and simulated daily discharge increased from 0.23 to 0.39 in the calibration period and from 0.41 to 0.48 in the validation period on average. The Voronoi method improved the simulation of the river flow regime (i.e. the magnitude, frequency, timing, and flashiness of flow). The largest improvements were obtained in data scarce situations, and at relatively high spatial and temporal resolutions. In essence, the Voronoi method provides a more robust climatic dataset for assessing impacts of agricultural management alterations with the SWAT model in Southern Africa.

The fourth study quantifies the potential impacts of *in situ* WH, external WH, and Ecosan in Southern Africa. Ecosan significantly improved the maize yields and crop water productivity across Southern Africa, while *in situ* WH and external WH were only beneficial in specific seasons and locations. On average, Ecosan increased maize yields by 12.4% and transpiration by 2.2% ( $p$ -values:  $<2.2 \times 10^{-16}$ ). WH did not significantly affect the yield, transpiration or river flow regimes on the Southern Africa scale ( $p$ -values:  $>0.7$ ). However, external WH more than doubled the yields in specific situations, with a supplemental irrigation amount of less than 40 mm season<sup>-1</sup>. The areas where *in situ* WH and external WH were most beneficial are located in the Limpopo River basin, the central Free State, and along the southeast coast in KwaZulu-Natal and Eastern Cape. WH was particularly beneficial for the lowest yields. External WH generally had a larger impact than *in situ* WH. Significant water and nutrient demands remained even with Ecosan and WH management. By fully addressing these demands, the yields increased by a factor of four. Fertility enhancements raised yield levels but also the yield variability, while soil moisture enhancements particularly improved the temporal yield stability.

In conclusion, enhanced management of locally available water and nutrient resources with WH and Ecosan technologies can increase smallholder agricultural productivity and food production: moisture enhancements in specific conditions (typically for the lowest yields), and fertility enhancements throughout Southern Africa. To use the available water more productively, it is paramount to increase soil fertility. To reduce spatial and temporal yield variabilities, it is necessary to address crop water demands. Simultaneous approaches are the most promising.

# Zusammenfassung

Eine Strategie, die Menschheit auf nachhaltige Weise zu ernähren, besteht darin, die landwirtschaftliche Produktivität durch verbessertes Management lokal verfügbarer Ressourcen zu verbessern. Um den Herausforderungen hoher Niederschlagsvariabilität und geringer Bodenfruchtbarkeit im subsaharischen Afrika zu begegnen, werden insbesondere Bodenfeuchte und Bodenfruchtbarkeit erhöhende kostengünstige Technologien wie „water harvesting“ (WH; dt. Wasserernte) und Komposttoiletten (engl. ecological sanitation oder Ecosan) befürwortet. In dieser Dissertation werden Einschränkungen des Pflanzenwachstums in kleinbäuerlicher, regenbewässerter Landwirtschaft auf der Ebene von Flusseinzugsgebieten und Regionen im südlichen Afrika analysiert. Die Dissertation dokumentiert die potentiellen Einflüsse von WH, Ecosan und anderen Bewässerungs- und Düngetechnologien auf Maiserträge (das lokale Grundnahrungsmittel), Evapotranspiration, Transpiration und Abflussregime in Flüssen. Hierauf aufbauend identifiziert sie Orte und Bedingungen, unter denen solche Technologien adäquat sein könnten, und analysiert ihr Potential, die landwirtschaftliche Produktivität und Ernährungssicherheit zu verbessern.

Eine Szenarienanalyse wird zusammen mit dem agrar-hydrologischen Computermodell SWAT (Soil and Water Assessment Tool) angewandt. Der Sequential Uncertainty Fitting-Algorithmus wird zur Kalibrierung des Modells hinsichtlich Abflussregime und Maisertrag sowie zur Quantifizierung der Unsicherheit eingesetzt. Die Dissertation besteht aus vier Studien, die sich mit der Untersuchung der Grundgegebenheiten, der Modelleffizienz, Methoden der Datenprozessierung, sowie dem potentiellen Einfluss von WH- und Ecosan-Technologien im Thukela-Einzugsgebiet (29000 km<sup>2</sup>) und im gesamten südlichen Afrika (1.8 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>) beschäftigen.

Die erste Studie quantifiziert die Modelleffizienz und schätzt die Verfügbarkeit von Wasser für *in-situ* WH, den zusätzlichen Wasserbedarf (engl. Abk. SWD) in kleinbäuerlicher Landwirtschaft und die Zuverlässigkeit von *in-stu* WH im Thukela-Einzugsgebiet ab. Im Durchschnitt sind jährlich 0–17 mm Oberflächenabfluss (95% Vorhersageunsicherheit (95PPU)) verfügbar. Dies könnte einen Teil aber nicht den gesamten SWD (Median: 0–113 mm a<sup>-1</sup>, 95PPU) abdecken. Die Zuverlässigkeit des *in-situ* WH (Prozent der Jahre, in denen Wasserverfügbarkeit ≥ SWD) ist höchst ortsabhängig und im Allgemeinen eher gering. Von den 1850 km<sup>2</sup> kleinbäuerlich bewirtschafteter Fläche weisen 20–28% eine Zuverlässigkeit ≥ 25% auf, 13–16% liegen im mittleren Bereich von ≥ 50% und nur 4–5% erreichen ≥ 75% Zuverlässigkeit. Das

Risiko, dass *in-situ* WH scheitert, ist daher in vielen Gegenden relativ hoch. Diese Ergebnisse basieren auf einem zufriedenstellend arbeitenden Modell. Die Wurzel des statistischen Gesamtfehlers der Maiserträge war  $0.02 \text{ t ha}^{-1}$  sowohl in der Kalibrier- als auch in der Evaluationsperiode. Das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) für den Abfluss lag während der Kalibrierperiode im Bereich 0.42–0.83, in der Evaluationsperiode bei 0.28–0.72.

Die zweite Studie untersucht den potentiellen Einfluss der Anwendung von *in-situ* WH und Düngung mit gesammeltem menschlichem Urin (Ecosan) im Thukela-Einzugsgebiet. Basierend auf den Modellergebnissen ist der Einfluss von *in-situ* WH eher gering (Median der Veränderung: 0%), aber signifikant mit Ecosan (Median der Erhöhung: 30%). Die Ursachen für diesen Effekt sind ein hoher Stickstoffmangel, der das Pflanzenwachstum limitiert, und eine geringe oder zeitlich unpassende Erhöhung der Bodenfeuchte durch *in-situ* WH. Die Auswirkungen variierten jedoch sowohl zeitlich als auch räumlich signifikant und führten zu Ertragssteigerungen von bis zu 40% mit *in-situ* WH. Ausreichende Düngung erhöhte die Erträge um das Fünffache, während ausreichende Bewässerung die räumliche Variabilität der Erträge um ein Drittel senkte. Die Düngung verbesserte signifikant die Produktivität der Evaporationsströme durch eine Erhöhung der Transpiration (Ecosan-Median: +2.8%,  $4.7 \text{ mm Saison}^{-1}$ ) und Senkung der Boden- und Pflanzendach-Evaporation (Ecosan-Median: -1.7%,  $-4.5 \text{ mm Saison}^{-1}$ ). *In-situ* WH hatte im Allgemeinen keinen Einfluss auf das Abflussregime im Fluss. Gelegentlich traten signifikante Veränderungen im Regime auf, wie ein erhöhtes Flutrisiko oder vermehrtes auftreten von Niederwasser, bedingt durch gesteigerte laterale Wasser- und Grundwasserrückflüsse.

Die dritte Studie konzentriert sich auf die Verbesserung der Modelleffizienz durch effizientere Nutzung spärlicher Klimadaten. Zwei Ansätze zur Erstellung von Klimadaten-Zeitreihen für SWAT werden verglichen: die konventionelle Schwerpunktmethod und die zeitlich dynamische Voronoi-Mosaik-Methode. Klimadatenzeitreihen wurden mit beiden Methoden für jedes Teileinzugsgebiet im südlichen Afrika berechnet. Die Voronoi-Methode nutzte sämtliche verfügbaren Niederschlags- und Temperaturdaten, während die Schwerpunkte-Methode nur 14.5% bzw. 82.5% nutzte. Mit der Schwerpunkt-Methode waren die Zeitreihen der Teileinzugsgebiete im Durchschnitt zu 42% bzw. 63% lückenhaft. Mit der Voronoi-Methode waren sämtliche Zeitreihen komplett. Das SWAT Modell wurde mit beiden Klimadatenansätzen ausgeführt. Beide Modellansätze wurden unabhängig voneinander mit 213 Abfluss-Stationen sowie kleinbäuerlichen Ernteerträgen aus acht Provinzen in Südafrika kalibriert und validiert. Für Maiserträge wiesen beide Ansätze eine ähnliche

Effizienz auf, aber die Simulation des Abflusses wurde durch die Voronoi-Methode signifikant verbessert. Das  $R^2$  von beobachtetem und simuliertem täglichem Abfluss erhöhte sich im Durchschnitt von 0.23 auf 0.39 in der Kalibrierperiode und von 0.41 auf 0.48 in der Validationsperiode. Die Voronoi-Methode verbesserte die Simulation des Abflussregimes (Höhe, Frequenz, Takt, Abflussmaxima). Die grössten Verbesserungen wurden in datenknappen Situationen sowie bei relativ hohen räumlichen und zeitlichen Auflösungen erlangt. Im Wesentlichen bietet die Voronoi-Methode ein robusteres Klimadatenset zur Untersuchung des Einflusses von Veränderungen der landwirtschaftlichen Praxis im südlichen Afrika mit dem SWAT-Modell.

Die vierte Studie quantifiziert die potentiellen Einflüsse von *in-situ* WH, externem WH und Ecosan im südlichen Afrika. Ecosan verbesserte signifikant die Maiserträge und Pflanzenwasserproduktivität im gesamten südlichen Afrika, während *in-situ* WH und externes WH nur in bestimmten Jahreszeiten und Gebieten förderlich waren. Im Durchschnitt erhöhte Ecosan die Maiserträge um 12.4% und die Transpiration um 2.2% ( $p$ -Werte  $< 2.2 \times 10^{-16}$ ). WH hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Erträge, Transpiration oder Abflussregime im südlichen Afrika ( $p$ -Werte  $> 0.7$ ). Externes WH verdoppelte jedoch die Erträge in bestimmten Situationen mit einem zusätzlichen Bewässerungsvolumen von 40 mm Saison<sup>-1</sup>. Die Regionen, in denen *in-situ* WH und externes WH am förderlichsten waren, liegen im Limpopo-Einzugsgebiet, im Zentrum von Free State, und entlang der südöstlichen Küste von KwaZulu-Natal und Eastern Cape. WH war besonders förderlich bei sehr niedrigen Erträgen. Externes WH hatte generell einen höheren Einfluss als *in-situ* WH. Signifikanter Mangel an Wasser und Nährstoffen verblieb sogar mit Ecosan und WH. Die volle Deckung dieser Mängel erhöhte die Erträge um das Vierfache. Die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit erhöhte das Ertragsniveau, aber ebenso die Ertragsvariabilität, während die Erhöhung der Bodenfeuchte insbesondere die zeitliche Stabilität der Erträge verbesserte.

Zusammengefasst kann verbessertes Management lokal verfügbarer Wasser- und Nährstoffressourcen durch WH- und Ecosan-Technologien die kleinbäuerliche landwirtschaftliche Produktivität und Nahrungsmittelproduktion erhöhen: Verbesserungen der Bodenfeuchte unter bestimmten Bedingungen (üblicherweise niedrigste Erträge) und Verbesserungen der Bodenfruchtbarkeit im gesamten südlichen Afrika. Um räumliche und zeitliche Ertragsschwankungen zu reduzieren, muss auf den pflanzlichen Wasserbedarf eingegangen werden. Am aussichtsvollsten sind kombinierte Ansätze.