



## Doctoral Thesis

# **Modeling crop yield and water use in the context of global change with a focus on maize in sub-Saharan Africa**

**Author(s):**

Folberth, Christian

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010113683> →

**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. 21364

**MODELING CROP YIELD AND WATER USE IN THE CONTEXT OF  
GLOBAL CHANGE WITH A FOCUS ON MAIZE IN SUB-SAHARAN  
AFRICA**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**CHRISTIAN FOLBERTH**

M.Sc. Environmental Planning and Engineering Ecology, TU Munich

born 10 January 1980  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner  
Prof. Dr. Hong Yang, co-examiner  
Dr. Karim C. Abbaspour, co-examiner  
Dr. Michael Obersteiner, co-examiner

2013

## Summary

The world's food system is facing increasing problems to feed all of mankind due to demographic, economic, and climatic changes. A wide range of studies has addressed these issues in the past. However, there are only few detailed assessments using large-scale modeling taking also the uncertainty in climate change impacts on global crop yields and potentials for increasing yields into account. For sub-Saharan Africa (SSA), the most low-yielding region on a global scale at present, such studies are still entirely lacking. The present study aimed at answering some of the most pressing questions in this nexus by applying a crop growth model GEPIC to investigate the likely impacts of climate change on staple food crop yields in SSA under different climate projections on a large scale. Different management strategies for improving crop yields in SSA were investigated under the current and projected future climate after the model was calibrated to account for recent crop growth limitations in the region. The overall study was conducted within the four main steps specified below:

First, the GEPIC model was applied to project climate change impacts on the production and water use of major cereal crops on the global scale for the 2030s (short term) and the 2090s (long term). The simulations showed larger impact uncertainties on larger (e.g. global and continental) than on smaller geographical scales (e.g. national and below). Short-term gains in crop production from climate change were predicted for many African countries, but gains would then mostly vanish and turn into losses in the long run. Irrigation dependence in crop production was projected to increase in general, while several water poor regions will rely less heavily on irrigation. The heterogeneity of spatial patterns and the non-linearity of temporal changes of the impacts call for site-specific adaptive measures with perspectives of reducing short- and long-term risks of future food and water security.

In the next step, we regionalized the GEPIC model for simulating maize cultivation in SSA. This region has currently the lowest yields and is expected to face adverse impacts of climate change in the long run as projected above. Planting dates were estimated using reported planting seasons, plant growth parameters were adopted from literature to reflect a low-yielding cultivar, and agricultural practice was mimicked by simulating continuous cultivation of maize with removal of plant residues. The analysis of different estimates of planting dates showed that at least a weekly time step should be used. The parameterization of a low-yielding cultivar by decreasing the maximum and minimum harvest index (HI) in the model resulted in HI estimates within the range of values reported in the literature for the region. Most importantly, the removal of plant residues in combination with little fertilizer inputs led to soil nutrient and organic carbon depletion in our simulations, as found in reality in most parts of SSA during the past decades. Taking account of these management practices, the model predicted that crop growth is more constrained by nutrient deficits than water or temperature in most parts of SSA.

In order to assess the maize yield potential under high-input conditions in SSA, we used the calibrated regionalized GEPIC model to simulate yield responses to different management scenarios, varying (a) nutrient supply, (b) extent of irrigated areas, and (c) crop yield potential (low vs. high yielding cultivars). Extending the irrigated area or planting an improved cultivar produced little effect on maize yield at the current level of nitrogen (N) and phosphorus (P) application rates. Increasing nutrient supply to the level commonly applied in high-input regions would allow for a tripling of maize yields from the current 1.4 to 4.5 Mg

ha<sup>-1</sup> and could increase yields even to 7 Mg ha<sup>-1</sup> in combination with an improved cultivar. Irrigation was found to be especially effective for increasing yields in areas where they are very low at present, concomitant to improvements in nutrient supply and cultivars. Maximum yields could reach 8-10 Mg ha<sup>-1</sup> in East and Southern Africa, and 7-9 Mg ha<sup>-1</sup> in West Africa according to the model. The lowest yield potentials were found for the Western parts of Central Africa, where they often reached only 4-6 Mg ha<sup>-1</sup>, due to low solar radiation and low nutrient availability on highly weathered soils. High inputs are required in order to reach the maximum yield levels. But even with a supply of only 50 kg N ha<sup>-1</sup> and 18 kg P ha<sup>-1</sup>, which is less than one third of the current level in high-input countries, maize yields could likely be doubled for most areas in SSA.

In the last step, potential climate change impacts on maize yields in SSA were investigated for different fallow or crop rotation options. The results suggest that rotation with a fast growing nitrogen (N) fixing tree can lead to a substantial increase in yields over time, due to gradual increase in available soil N pools, water infiltration, and soil water holding capacity. On the other hand, intensive cultivation with a bare fallow or a herbaceous crop like cowpea in the rotation resulted on average in lower yields and high soil erosion, which increases the crop's vulnerability to adverse climate conditions that are predicted to become more frequent in the future. For this reason, yields were predicted to decrease in all tested management scenarios towards the end of the century, when temperatures are expected to increase by up to +5°C. Further adaptation measures are needed to avert this negative trend.

In conclusion, climate change can be expected to have adverse impacts on crop yields in SSA in the long run. But given that yields of maize and other staple food crops are at the very bottom of globally reported yields, which is mainly due to nutrient deficiencies, there is a large potential for increasing agricultural productivity in tropical regions of SSA, by means of fertilizer applications and introduction of higher yielding cultivars. In (semi-)arid regions there is additional potential to increase yields by extending irrigation. Considering potential climate change impacts, intensification employing green manures may be more favorable than intensification using mineral fertilizers only. Further research will have to address still open issues like evaluations of cultivars with different stress tolerances, the performance of other crops, or the economic feasibility of the agronomic measures evaluated in this study.

## Zusammenfassung

Auf Grund von demographischen, ökonomischen und klimatischen Veränderungen ist das Ernährungssystem der Welt mit zunehmenden Schwierigkeiten konfrontiert, ausreichend Nahrungsmittel für alle Menschen bereit zu stellen. Zahlreiche Studien haben diese Probleme bereits aufgegriffen. Es liegen jedoch nur wenige Untersuchungen vor, die einerseits von großskaligen landwirtschaftlichen Modellen Gebrauch machen und gleichzeitig Unsicherheiten in den Abschätzungen vom Einfluss des Klimawandels auf globale Ernteerträge sowie Potentiale zur Erhöhung von Ernteerträgen einschließen. Für das sub-Saharische Afrika (SSA), die Region der Welt mit den momentan niedrigsten landwirtschaftlichen Erträgen, fehlen solche Studien bislang gänzlich.

Die vorliegende Studie zielte darauf ab, einige der dringlichsten Fragen in diesem Zusammenhang zu beantworten. Für die Ermittlung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von Grundnahrungsmitteln in SSA unter verschiedenen Klimaprojektionen, wurde das Pflanzenwachstumsmodell GEPIC genutzt. Zusätzlich wurden verschiedene landwirtschaftliche Pflanzenmanagementszenarien zur Erhöhung von Ernteerträgen in SSA unter aktuellem und projiziertem künftigem Klima getestet. Dazu wurde das Modell zur Repräsentation aktueller Wachstumslimitierungen in der Region kalibriert. Die gesamte Studie wurde in den folgenden vier Hauptschritten durchgeführt:

Zuerst wurde das GEPIC-Modell angewandt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Produktion und den Wasserverbrauch wichtiger Cerealien auf globaler Ebene für die 2030er Jahre (nahe Zukunft) und 2090er Jahre (ferne Zukunft) abzuschätzen. Die Simulationen zeigten, dass die Unsicherheit der projizierten Auswirkungen auf großer geographischer Ebene (z.B. global oder kontinental) größer ist als auf kleinerer Ebene (z.B. national und darunter). Kurzfristige Ertragssteigerungen durch Klimawandel wurden für zahlreiche afrikanische Länder vorhergesagt. Im zeitlichen Verlauf sanken die Zugewinne in der Nahrungsmittelproduktion jedoch und das Modell zeigte langfristig Verluste an. Die Abhängigkeit von Bewässerung nahm generell zu, wobei jedoch zahlreiche wasserarme Regionen weniger stark von Bewässerung abhängen würden. Die Heterogenität räumlicher Muster und die Nichtlinearität zeitlicher Veränderungen von Klimawandelauswirkungen erfordern lokal spezifische Anpassungsmaßnahmen mit dem Ziel, kurz- und langfristige Risiken in der Nahrungssicherheit und Sicherheit der Wasserversorgung zu reduzieren.

Im nächsten Schritt haben wir GEPIC für die Simulation von Maisanbau in SSA regionalisiert. Diese Region hat momentan die niedrigsten Erträge weltweit und, wie bereits erwähnt, kann erwartet werden, dass langfristig der Klimawandel die Anbausituation weiter verschlechtern wird. Zur Anpassung des Modells wurden Pflanzdaten innerhalb von bekannten zeitlichen Saatfenstern abgeschätzt, Wachstumsparameter wurde aus der Literatur übernommen um einen Kultivar mit niedrigem Ertrag zu repräsentieren und die gängige landwirtschaftliche Praxis wurde durch kontinuierlichen Feldbau sowie Abfuhr der Pflanzenreste vom Feld imitiert. Die Analyse verschiedener ermittelter Pflanzdaten zeigte, dass zu ihrer zuverlässigen Abschätzung zeitlich mindestens ein wöchentlicher Schritt angewandt werden muss. Die Anpassung des Kultivars mittels Eingabe eines niedrigen minimalen und maximalen Harvest Index (= Anteil der Erntemasse an der gesamten Pflanze; HI) resultierte in einer guten Übereinstimmung zwischen berichteten HI aus der Region und simulierten Werten. Der wichtigste Schritt war jedoch die Entfernung der Pflanzenreste nach

der Ernte kombiniert mit niedrigen Düngergaben, was während den Simulationen zu einer Abnahme der Nährstoff- und organischen Kohlenstoffpools im Boden führte. Dies ist auch in der Realität in den meisten Teilen von SSA in den letzten Jahrzehnten geschehen. Auf Grund der Berücksichtigung dieser landwirtschaftlichen Praxis ist das Pflanzenwachstum in den meisten Gegenden von SSA im Modell eher durch Nährstoffmangel als durch Wassermangel oder widrige Temperaturen limitiert.

Um das Potential der Maiserträge in SSA unter hohem Einsatz landwirtschaftlicher Produktionsfaktoren zu ermitteln, wurde das kalibrierte und regionalisierte GEPIC angewandt und die Ertragssteigerung unter verschiedenen Managementszenarien untersucht. Dabei wurden (a) die Nährstoffversorgung, (b) das Ausmaß der bewässerten Anbauflächen und (c) Kultivare mit niedrigem oder hohem Ertrag variiert. Eine Ausweitung der Bewässerungsflächen oder das Pflanzen einer Sorte mit hohem Ertrag hatten nur einen geringen Effekt, wenn die Stickstoff- (N) und Phosphor- (P) Düngerraten auf dem momentanen Niveau blieben. Eine Erhöhung der Düngerraten auf das heute in Regionen mit umfangreicher Verwendung landwirtschaftlicher Produktionsmittel übliche Niveau würde hingegen eine Verdreifachung der Erträge von 1.4 auf 4.5 Mg ha<sup>-1</sup> erlauben und eine Steigerung auf sogar 7 Mg ha<sup>-1</sup> in Kombination mit einem verbesserten Kultivar. Bewässerung ist besonders effektiv zur Ertragssteigerung in Regionen mit momentan sehr niedrigen Erträgen, wenn gleichzeitig auch die Nährstoffversorgung verbessert und eine ertragsreiche Maissorte verwendet wird. Die Maximalerträge könnten gemäß dem Modell in Ost-Afrika und im südlichen Afrika bei 8-10 Mg ha<sup>-1</sup> und bei 7-9 Mg ha<sup>-1</sup> in West-Afrika liegen. Auf Grund niedriger Sonneneinstrahlung und geringer Nährstoffverfügbarkeit in den stark verwitterten Böden wurden die niedrigsten Ertragspotentiale für das westliche Zentral-Afrika, wo sie oft bei nur 4-6 Mg ha<sup>-1</sup> lagen, festgestellt. Umfangreiche Produktionsmittel sind für das Erreichen dieser Erträge notwendig. Allerdings kann eine Nährstoffzufuhr von 50 kg N ha<sup>-1</sup> und 18 kg P ha<sup>-1</sup>, weniger als ein Drittel der momentanen Düngerraten in Ländern mit industrialisierter Landwirtschaft, bereits eine Verdopplung der Maiserträge in den meisten Gegenden von SSA bewirken.

Im letzten Schritt wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf Maiserträge in SSA für verschiedene Szenarien von Brachenmanagement und Pflanzenrotation untersucht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Rotation mit einem schnell wachsenden, N-fixierenden Baum mittels allmählicher N-Anreicherung im Boden, verbesserter Wasserinfiltration und Verbesserung der Bodenwasserhaltekapazität im Lauf der Zeit zu signifikanten Ertragssteigerungen führen kann. Intensive Landwirtschaft mit einer leeren Brache oder Rotation mit einer krautigen Pflanze wie Augenbohne andererseits resultierten im Durchschnitt in niedrigeren Erträgen sowie höherer Bodenerosion, wodurch die Anfälligkeit des Mais gegenüber widrigem Klima, welches in der Zukunft häufiger auftreten soll, zunahm. Da die Temperatur im Durchschnitt um +5°C stieg, nahmen die Maiserträge in allen Szenarien gegen Ende des Jahrhunderts ab. Zusätzliche Anpassungsmaßnahmen sind notwendig, um diesem negativen Trend zu begegnen.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass der Klimawandel langfristig negative Auswirkungen auf Ernteerträge in SSA haben wird. Da jedoch die Erträge für Mais und andere Grundnahrungsmittel, hauptsächlich auf Grund mangelnder Nährstoffzufuhr, momentan die niedrigsten weltweit sind, gibt es ein großes Potential zur Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktivität. Eine verbesserte Nährstoffzufuhr und die Einführung

ertragsreicher Sorten in tropischen Gegenden von SSA zeigen im Modell eine große Wirkung auf . In semi-ariden Gebieten besteht zusätzlich Potential durch die Ausweitung von Bewässerungsflächen. Hinsichtlich potentieller Klimawandelauswirkungen ist eine Intensivierung mittels „grüner Dünger“ wahrscheinlich vorteilhafter als eine Intensivierung basierend auf Mineraldünger. Weitere Untersuchungen werden noch immer offene Fragen wie die Evaluation von Sorten mit verschiedenen Stresstoleranzen, das Verhalten anderer Feldfrüchte und die ökonomische Machbarkeit verschiedener landwirtschaftlicher Managementoptionen, die in dieser Studie untersucht wurden, beantworten müssen.