

ZENTRUM FÜR ENTWICKLUNGSFORSCHUNG (ZEF)

---

**OPTIONS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL  
INTENSIFICATION IN MAIZE MIXED FARMING SYSTEMS:  
EXPLORATIVE EX-ANTE ASSESSMENT USING MULTI-AGENT SYSTEM  
SIMULATION**

**INAUGURAL DISSERTATION**

zur Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

**POWELL MPONELA**

01-08-1980

Aus Malawi

Bonn, 2021

## Abstract

Nutrient depletion is a major limiting factor to agricultural sustainability in cereal dominated smallholder farming systems in Africa where over 80% of arable land is unsuitable to support primary productivity. This constrains food and nutritional security of rural communities. For appropriate design of interventions, there is need for empirical evidence on drivers of change.

A common sampling frame is used to integrate social-ecological data from farm surveys of soil, biomass and crop yield, nutrient inputs and outputs, and their determinants. The nutrient distributions are predicted using randomForest machine learning algorithm in R with remotely sensed reflectance for topography (30 m STRM-DEM), vegetation and soil (10 m Sentinel2 imagery) as co-variates. We use behavioural economics to unravel farm-type specific drivers of human induced nutrient inputs and a mixed model for crop yield function for outputs. Further, existing nutrient stoichiometry and transfer functions based on NUTMON, FarmDESIGN models with parameters from the study region are used to capture dynamic stocks and flows. Lastly, we build a multi-agent system for simulating sustainable agricultural intensification (MASSAI) in NetLogo and piloted to explore, ex ante, the agentic behaviours of farmers when faced with ambiguity in fertilizer subsidy regimes and its implications on nutrient budgets, human decision making and land productivity.

Though soil management in smallholder farming systems aims at addressing the most critical nutrient(s), the results from this study show that the soils are deficient in all three major nutrients (NPK) and structurally unstable due to low soil organic carbon (SOC). Farmers strive to utilise the commonly available soil fertility management: nine in every ten households used inorganic fertilizers, a third integrated legumes and almost half applied manures of various forms. From the empirical and simulated results, it is indicative that the maize mixed smallholder farming system in Malawi has become inelastic to changes in input policies.

Much as improvement in contribution of women in decision-making widens the scope for legume cropping, it negatively affects manuring. Therefore, addressing challenges that women face in manuring could offer greater opportunities for integrated soil fertility management.

After 15 years of fertilizer subsidy program, farmers have internalized it in their expenditure plan: some exclusively relying on subsidy while others source increasing amounts from the market and are becoming self-reliant. Those that rely on limited fertilizer acquired through subsidy proactively reduce the nutrient gap by increasing manuring. These behaviors have implications on nutrient management and sustainability of the farming systems. Although subsidy alone might not significantly shift the nutrient and productivity trajectories for the next 20 simulated years, increased subsidy could relatively accelerate nitrogen and phosphorus losses.

## Zusammenfassung

### **Optionen für eine nachhaltige landwirtschaftliche Intensivierung in gemischten Maisanbausystemen : explorative ex-ante-Bewertung mit einer multi-agenten-Systemsimulation**

Nährstoffverarmung ist ein wesentlicher limitierender Faktor für die landwirtschaftliche Nachhaltigkeit in Getreide-dominierten kleinbäuerlichen Anbausystemen in Afrika, wo mehr als 80% des Ackerlandes für die Primärproduktion ungeeignet ist. Dies schränkt die Nahrungsmittel- und Ernährungssicherheit der ländlichen Gemeinden ein. Um dem gezielt durch Interventionen entgegenwirken zu können, sind empirische Studien über Einflussfaktoren, die zu Veränderung beitragen können, nötig.

Eine integrierte Stichprobenstrategie wird verwendet, um sozio-ökologische Daten aus Betriebserhebungen zu Boden, Biomasse und Ernteerträgen, Nährstoffein- und -austrägen und deren Bestimmungsfaktoren zu integrieren. Nährstoffverteilungen werden unter Verwendung des ‚randomForest- machine learning algorithm‘ in R, mit aus Fernerkundung stammenden Daten, für die Co-Variablen Topographie (30 m STRM-DEM), Vegetation und Boden (10 m Sentinel2-Bilder) simuliert. Verhaltensökonomische Ansätze geben Aufschluss über die betriebstypspezifischen Faktoren, die eine Rolle spielen, wenn es um gezielte Nährstoffeinträge durch den Menschen geht. Ein gemischtes Modell wird für die Ermittlung einer Ernteertragsfunktion verwendet, um die Erträge zu ermitteln. Darüber hinaus werden vorhandene Nährstoffstöchiometrie- und Transferfunktionen basierend auf den NUTMON und FarmDESIGN Modellen mit Parametern aus der Untersuchungsregion verwendet, um dynamische Nährstoffbestände und -Flüsse zu erfassen. Schließlich bauen wir in NetLogo ein Multi-Agenten-System zur Simulation einer nachhaltigen Intensivierung der Landwirtschaft (MASSAI) auf und untersuchen, ex ante, das Verhalten von Landwirten, die aufgrund eines Düngemittelsubventionssystems mit Unklarheiten konfrontiert werden und dessen Auswirkungen auf Entscheidungsprozesse, Nährstoffbudgets und Landproduktivität.

Wenngleich Bodenbewirtschaftung in kleinbäuerlichen Anbausystemen darauf abzielt, Defizite in den kritischsten Nährstoffen auszugleichen, zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass die Böden in allen drei Hauptnährstoffen (NPK) mangelhaft und aufgrund niedriger organischer Kohlenstoffgehalte im Boden strukturell instabil sind. Landwirte streben an, allgemein verfügbare Methoden für Bodenfruchtbarkeitsmanagement zu nutzen: neun von zehn Haushalten verwendeten anorganische Düngemittel, ein Drittel integrierte Leguminosen und fast die Hälfte brachten Mist verschiedenster Art aus. Die empirischen und simulierten Ergebnisse deuten darauf hin, dass das gemischte kleinbäuerliche Maisanbausystem in Malawi gegenüber Veränderungen in politischen Richtlinien, die den Einsatz von Betriebsmitteln betreffen, unelastisch geworden ist.

Die verbesserte Einbindung von Frauen in Entscheidungsprozesse macht zwar den Anbau von Leguminosen wahrscheinlicher, wirkt sich jedoch negativ auf den Einsatz von Mist aus. Daher könnte sich die Bewältigung von Herausforderungen, denen

Frauen beim Düngen ausgesetzt sind, positiv auf ein integriertes Bodenfruchtbarkeitsmanagement auswirken.

Nach 15 Jahren Düngersubventionen haben die Landwirte diese fest in ihre Budgetplanung integriert, wobei sich einige ausschließlich auf Subventionen verlassen, während andere mit eigenen Einkäufen mischen und nicht-Subventionsempfänger zunehmend Dünger über den Markt beziehen. Diejenigen die auf begrenzten, durch Subventionen erworbenen Dünger angewiesen sind, verringern proaktiv die Nährstofflücke durch Mistgaben. Diese Verhaltensweisen haben Auswirkungen auf das Nährstoffmanagement und die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Systeme. Obwohl Subventionen allein die Nährstoff- und Produktivitätsverläufe für die simulierten nächsten 20 Jahre möglicherweise nicht wesentlich verändern, könnten erhöhte Subventionen die Stickstoff- und Phosphorverluste beschleunigen.