



UNIVERSITY OF
HOHENHEIM

Faculty of Agricultural Sciences

Institute of Agricultural Sciences in the Tropics and Subtropics
(Hans Ruthenberg Institute)
Chair of Land Use Economics in the Tropics and Subtropics
(Josef G. Knoll Professorship) (490d)

Dissertation

**Smallholder adaptation through agroforestry:
Agent-based simulation of climate and price
variability in Ethiopia**

submitted by

Habtamu Demilew Yismaw

*in partial fulfillment of the requirements for the degree 'Doktor der
Agrarwissenschaften' (Dr. sc. agr.)*

2021

Summary

Climate variability has been posing formidable policy challenges in Ethiopia by deteriorating rural livelihoods. Climate variability-induced shocks have a profound impact on smallholder farmers' welfare both in the short run via reducing production and increasing output prices and in the long run by depleting productive farm assets and leading them to a poverty trap. However, the impact of shocks on smallholders' welfare depends on their choice of adaptation and coping measures to deal with them, which are in turn farmer-specific. This thesis applied an integrated econometric analysis and farm-level simulations to assess smallholder farmers' adaptation and coping measures under extreme climate and price variability in Ethiopia. The thesis provides a special focus on the role of investment in small-scale agroforestry to curb the adverse effects of shocks.

Drought, hailstorms, pests, and crop diseases are identified as the most frequent and intense climate variability-induced shocks in Ethiopia. Smallholders' dominant adaptation and coping measures for each shock are identified using logistic principal component analysis (LPCA). The application of dimensionality reduction of binary data using LPCA to select smallholder farmers' dominant adaptation and coping measures is unique to this study. Results show that planting stress-resistant crops and varieties, early planting, increasing seed rate, and soil and water conservation practices are the dominant ex-ante adaptation measures. Whereas selling livestock, selling assets, reducing consumption, borrowing and replanting are the dominant ex-post coping measures.

In later sections, household-specific drivers of smallholder farmers' choice of adaptation and coping measures are disentangled using multivariate probit regression (MVP) for each shock. Gender, knowledge and experience, participation in rural institutions, social networks, resource endowments, and their shock experience and expectation are the significant drivers of farmers' choices of ex-ante adaptation and ex-post coping measures. Results suggest that smallholder farmers' choice of measures to deal with climate variability-induced shocks is highly distinctive and depends on their socioeconomic settings, experience and knowledge, and their interactions with the environment. Correlation analysis both in LPCA and MVP results show that most of the measures farmers choose are complementary, which implies that no single measure is robust and works best for all farmers. Farmers invest more on ex-post measures than ex-ante measures. Those who invest on tree perennials as ex-ante drought measures are less likely to use severe measures such as selling livestock and other assets in the aftershock.

The econometric analysis in the first part of the thesis establishes a descriptive analysis of smallholder farmers' behavioral responses to climate variability-induced covariate shocks. This captures the behavior of farmers in the status quo. However, it does

not tell us much about how farmers would behave in different future circumstances, especially with extreme climate and price variability. This requires a prescriptive and descriptive approach with a detailed investigation of farmers' behavior down to the plot level. To achieve this objective, the second part of the thesis applies household-level micro-simulation to analyze ex-ante planning and ex-post responses to future climate and price variability, focusing on the role of smallholder farmers' investment in woodlot perennials to their livelihoods. The agent-based simulation package - Mathematical Programming-based Multi-Agent Systems (MPMAS) is used for this purpose to capture investment, production, and consumption decisions at the farm household level. A farm decision model representing smallholder farmers in the Upper Nile Basin in Ethiopia is developed accordingly. The farmers in the area are known for their integrated crop-livestock system, and a unique Acacia Dicurrens based *taungya* system in the country. This thesis shows a first-time use of an agent-based modeling approach representing the acacia-based *taungya* system in the Upper Nile Basin in Ethiopia, which is another contribution of this study.

The farm decision model is validated using empirical data and interactive sessions with experts. Another methodological novelty of this study is developing and using interactive web applications to validate the farm decision model with experts remotely due to the COVID-19 pandemic. Interactive model validation is not new in agent-based modeling using MPMAS. However, the web-based R Shiny app and an integrated web-based expert survey questionnaire app is an original contribution of this study. The study also uses Zoom virtual conferencing to record all interactive validation sessions with experts.

Two simulation experiments were designed to quantify the effects of shocks and price variability on agents' livelihoods. The High-Performance Computing platform in Baden Wurttemberg (bwHPC) is used to run simulation experiments for this study. The first simulation experiment aims at measuring the effects of shocks on agents' livelihoods and the effectiveness of ex-ante planning to curb the adverse effects of these shocks. The application of model features on agents' ex-ante preparation for the possible occurrence of shocks within the farm decision model is a new development in this study. Accordingly, the frequent and intense crop and tree diseases in the area - potato late blight and acacia seedling disease are introduced as shocks in the model. Simulation results show that both potato late blight and acacia seedling disease reduce annual per capita discretionary income significantly and forcing some poor resource agents to fail to fulfill minimum non-food expenditure. The trade-off in agents' land-use decisions between trees and crops by agents shows that they prefer to plant trees than crops as an ex-ante planning strategy for shocks.

The second simulation experiment aims at examining the effect of long-run expected price changes, mainly on land-use decisions of agents in the model. Four future price scenarios are designed, and the results are compared with the baseline to examine the effect on agents' discretionary income and land-use decisions. The purpose of this simulation experiment is to see if there is a deviance from croplands to woodlots and vice versa based on long-run changes in expected prices. Simulation results show that

agents are highly responsive to changes in expected prices in the long run, except for the expected price of bamboo. In cases where there is a decrease in the expected price of acacia charcoal or an increase in the expected price of crops or both, results show that agents will go back to potatoes and wheat-dominated production systems instead of the acacia-dominated production system .

This study suggests that supporting farmer adaptation to climate variability-induced shocks should focus on policy interventions related to crop and land management activities. Policy interventions should also focus on building the household asset base to boost farmers' coping ability and resilience to shocks. Moreover, results suggest that robust climate adaptation and mitigation interventions should take the heterogeneity of farmers into account. Furthermore, both econometrics and farm-level simulation analyses show the importance of planting trees as a crucial adaptation strategy. Findings suggest that investment in woodlot perennials is an essential adaptation strategy for smallholder farmers with scarce resource settings and should be promoted and scaled to a broader area in the region.

Zusammenfassung

Klimavariabilität hat Äthiopien vor gewaltige politische Herausforderungen gestellt, indem sich die Lebensgrundlagen auf dem Land wesentlich verschlechterten. Durch Klimavariabilität verursachte Schocks haben einen tiefgreifenden Einfluss auf das Wohlergehen von kleinbäuerlichen Betriebs-Haushalten, sowohl kurzfristig durch die Verringerung der Produktion und den Anstieg der Erzeugerpreise als auch langfristig durch die Erschöpfung der produktiven landwirtschaftlichen Vermögenswerte und das Abgleiten in eine Armutsfalle. Die Auswirkungen von Schocks auf die Wohlfahrt von kleinbäuerlichen Betriebs-Haushalten hängen jedoch von der Wahl der Anpassungsmaßnahmen ab, die wiederum haushaltsspezifisch sind. Diese Arbeit wendet integrierte ökonometrische Analysen und Simulationen auf Haushaltsebene an, um die Anpassungsmaßnahmen von Kleinbauern unter extremen Klima- und Preisschwankungen in Äthiopien zu bewerten. Die Arbeit legt einen besonderen Fokus auf die Rolle von Investitionen in kleinbäuerliche Agroforstwirtschaft, um die negativen Auswirkungen von Schocks zu dämpfen.

Dürre, Hagelstürme, Schädlinge und Pflanzenkrankheiten werden als die häufigsten und intensivsten Schocks identifiziert, die durch Klimavariabilität in Äthiopien verursacht werden. Die wichtigsten Anpassungsmaßnahmen der kleinbäuerlichen Betriebs-Haushalte für diese Schocks werden mit Hilfe der logistischen Hauptkomponentenanalyse (LPCA) identifiziert. Die Anwendung der Dimensionalitätsreduktion von binären Daten mittels LPCA zur Auswahl der dominanten Anpassungsmaßnahmen der Kleinbauern ist einzigartig in dieser Studie. Die Ergebnisse zeigen, dass der Anbau von stressresistenten Pflanzen und Sorten, die frühe Aussaat, die Erhöhung der Saatgutmenge und boden- und wasserkonservierende Praktiken die dominanten ex-ante Anpassungsmaßnahmen sind. Die dominierenden ex-post Maßnahmen sind der Verkauf von Vieh, der Verkauf von Vermögenswerten, die Reduzierung des Konsums, die Aufnahme von Krediten und die Neubepflanzung.

Im Folgenden werden die haushaltsspezifischen Einflussfaktoren auf die Wahl der Anpassungsmaßnahmen der Kleinbauern mithilfe einer multivariaten Probit-Regression (MVP) für jeden Schock aufgeschlüsselt. Geschlecht, Wissen und Erfahrung, Beteiligung an ländlichen Institutionen, soziale Netzwerke, Ressourcenausstattung sowie die Schockerfahrung und -erwartung sind die signifikanten Einflussfaktoren für die Wahl von ex-ante und ex-post Maßnahmen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Wahl der Maßnahmen zur Bewältigung von durch Klimavariabilität verursachten Schocks bei Kleinbauern sehr unterschiedlich ausfällt und von ihrem sozioökonomischen Umfeld, ihrer Erfahrung und ihrem Wissen sowie von ihren Interaktionen mit der Umwelt abhängt. Korrelationsanalysen sowohl in der LPCA als auch in den MVP-Ergebnissen zeigen, dass die meisten von den Landwirten gewählten Maßnahmen komplementär sind, was bedeutet, dass keine einzelne Maßnahme robust ist und gleichermaßen bei allen Landwirte wirkt. Die Landwirte investieren mehr in

ex-post-Maßnahmen als in ex-ante-Maßnahmen. Diejenigen, die in die Anpflanzung von Bäumen als ex-ante Maßnahmen investieren, nutzen weniger schwerwiegende Maßnahmen wie den Verkauf von Vieh und anderen Vermögenswerten.

Die ökonometrische Analyse im ersten Teil der Arbeit liefert deskriptive Statistiken der Verhaltensreaktionen von kleinbäuerlichen Betriebs-Haushalten in Bezug auf klimavariabilitätsinduzierte, kovariante Schocks. Dies erfasst das Verhalten der Haushalte im Status quo. Die Analyse sagt jedoch nicht viel darüber aus, wie sich die kleinbäuerlichen Betriebs-Haushalte unter anderen zukünftigen Umständen verhalten würden, insbesondere bei extremer Klima- und Preisvariabilität. Dies erfordert einen präskriptiven und deskriptiven Modellansatz mit einer detaillierten Untersuchung des Verhaltens der Landwirte bis hinunter auf die Parzellenebene. Um dieses Ziel zu erreichen, wendet der zweite Teil der Arbeit eine Mikrosimulation auf Haushaltsebene an, um die ex-ante Planung und die ex-post Reaktionen auf zukünftige Klima- und Preisschwankungen zu analysieren, wobei der Schwerpunkt auf der Rolle der Investitionen in Agroforstsysteme liegt. Das agentenbasierte Simulationspaket MPMAS wird zu diesem Zweck verwendet, um Investitions-, Produktions- und Verbrauchsentscheidungen auf der Ebene der landwirtschaftlichen Haushalte zu erfassen. Ein landwirtschaftliches Entscheidungsmodell, das Kleinbauern im oberen Nilbecken in Äthiopien repräsentiert, wird entsprechend entwickelt. Die Landwirtschaft in diesem Gebiet ist bekannt für ihr integriertes Ackerbau-Viehzucht-System und ein im Land einzigartiges, auf Acacia Dicurrens basierendes Taungya-System. Diese Arbeit zeigt den erstmaligen Einsatz eines agentenbasierten Modellierungsansatzes, der das Taungya-System im oberen Nilbecken in Äthiopien darstellt, was ein weiterer Beitrag dieser Studie ist.

Das landwirtschaftliche Entscheidungsmodell wird anhand empirischer Daten und interaktiver Modellierungs-Sessions mit Experten validiert. Eine weitere methodische Neuheit dieser Studie ist die Entwicklung und Verwendung interaktiver Webanwendungen zur Online-Validierung des landwirtschaftlichen Entscheidungsmodells mit Experten aufgrund der COVID-19-Pandemie. Die interaktive Modellvalidierung ist bei der agentenbasierten Modellierung mit MPMAS nicht neu. Die webbasierte R Shiny-App und eine integrierte webbasierte App zur Expertenbefragung ist jedoch ein originärer Beitrag dieser Studie. Die Studie verwendet auch virtuelle Zoom-Konferenzen, um alle interaktiven Validierungs-Sessions mit Experten aufzuzeichnen.

Zwei Simulationsexperimente wurden entworfen, um die Auswirkungen von Schocks und Preisschwankungen auf den Lebensunterhalt der Modellagenten zu quantifizieren. Die High-Performance Computing Plattform in Baden Württemberg (bwHPC) wird genutzt, um Simulationsexperimente für diese Studie durchzuführen. Das erste Simulationsexperiment zielt darauf ab, die Auswirkungen von Schocks auf den Lebensunterhalt der Modellagenten und die Effektivität der Ex-ante-Planung zur Eindämmung der negativen Auswirkungen dieser Schocks zu messen. Die Anwendung von Modellmerkmalen zur Ex-ante-Vorbereitung der Agenten auf das mögliche Auftreten von Schocks innerhalb des landwirtschaftlichen Entscheidungsmodells

ist eine neue Entwicklung in dieser Studie. Dementsprechend werden die häufig auftretenden Pflanzen- und Baumkrankheiten in der Region - die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel und die Akazienkrankheit - als Schocks in das Simulationsmodell eingeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl die Kraut- und Knollenfäule als auch die Akazienkrankheit das jährliche frei verfügbare Pro-Kopf-Einkommen signifikant reduzieren und bei einigen armen Agenten-Haushalte auch die Mindestnahrungsverfügbarkeit nicht mehr sichergestellt ist. Der Trade-off in den Landnutzungsentscheidungen der Agenten zwischen Bäumen und Feldfrüchten zeigt, dass sie als Ex-ante-Planungsstrategie für Schocks lieber Bäume als Feldfrüchte pflanzen.

Das zweite Simulationsexperiment zielt darauf ab, den Effekt von langfristig erwarteten Preisänderungen zu untersuchen, hauptsächlich auf Landnutzungsentscheidungen der Agenten im Modell. Es werden vier zukünftige Preisszenarien entworfen, um die Auswirkungen auf das tatsächlich frei verfügbare Einkommen der Agenten und die Landnutzungsentscheidungen zu untersuchen. Der Zweck dieses Simulationsexperiments ist es, zu sehen, ob es eine Umwandlung von Ackerland zu Baumflächen und umgekehrt gibt, basierend auf langfristigen Änderungen der erwarteten Preise. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Agenten langfristig stark auf Änderungen der erwarteten Preise reagieren, mit Ausnahme des erwarteten Preises für Bambus. In den Fällen, in denen der erwartete Preis für Akazienholzkohle sinkt oder der erwartete Preis für Feldfrüchte steigt oder beides, zeigen die Ergebnisse, dass die Agenten zu den von Kartoffeln und Weizen dominierten Produktionssystemen zurückkehren, anstatt zu dem von Akazien dominierten Produktionssystem.

Diese Studie legt nahe, dass sich die Unterstützung der Anpassung der Landwirte an durch Klimavariabilität verursachte Schocks auf politische Interventionen konzentrieren sollte, die sich auf Anbau- und Landmanagementaktivitäten beziehen. Politische Interventionen sollten sich auch auf den Aufbau der Vermögensbasis der Haushalte konzentrieren, um die Anpassungsfähigkeit und Widerstandsfähigkeit der Bauern gegenüber Schocks zu stärken. Darüber hinaus legen die Ergebnisse nahe, dass robuste Maßnahmen zur Klimaanpassung und -minderung die Heterogenität der Landwirte berücksichtigen sollten. Darüber hinaus zeigen sowohl ökonometrische als auch Simulationsanalysen auf Betriebsebene die Bedeutung des Anpflanzens von Bäumen als eine entscheidende Anpassungsstrategie. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Investitionen in Agroforstsystemen eine wesentliche Anpassungsstrategie für Kleinbauern mit knappen Ressourcen sind, entsprechend gefördert und auf ein größeres Gebiet in der Region ausgeweitet werden sollten.