

Abstract

Agriculture is today's most important driver of ecosystem degradation and critical impairments of Earth system functioning. To maintain life-supporting ecosystems for long-term human prosperity, the Sustainable Development Goals (SDGs) now commit all countries to a transformative agenda to shift agriculture toward environmental sustainability, joined with the doubling of productivity to eradicate hunger by 2030. However, there is little quantitative knowledge on how to attain this historic twin-challenge. In this thesis, I assess planetary opportunities in agricultural water management interventions to reconcile future food production with environmental limits to freshwater use. I explore solution-oriented ways to improve on-farm water management in rainfed and irrigation systems alike, while safeguarding environmental flows (EFRs) to protect riverine ecosystems. To study possibilities, challenges, and interactions of different water management pathways, I advanced a state-of-the-art global modeling framework that enables to quantitatively address such questions based on detailed, mechanistic, and spatially and temporally explicit representation of underlying biophysical processes and their feedbacks to management interventions. Four research papers / thesis chapters provide the evidence for the following main findings. First, a systematic upscaling of EFRs to global coverage indicates that 39% of current freshwater withdrawals for irrigation are unsustainable and occur at the cost of ecosystems. Second, the aggregate of these local water overdrafts suggest that the planetary boundary for human freshwater use might be notably lower (2800 vs. 4000 km^3/yr) than previously estimated. Third, implementing policies to safeguard EFRs worldwide would significantly affect agriculture, cutting irrigated food production by 14%, with a >20% total kcal loss across irrigation hotspots. Fourth, as the main result and synthesis of management interventions, improving irrigation systems in combination with optimizing the use of precipitation water on a broad basis, provides effective and accessible measures to compensate for adverse impacts from protecting EFRs and climate change. When implemented, such integrated farm water management interventions could sustainably intensify global food production (+40% kcal) to the degree sufficient to halve the global food gap for a growing world population by 2050. In conclusion, this thesis provides the first comprehensive and systematic assessment of hitherto largely unquantified global opportunities in sustainable intensification of agriculture regarding farm water management, yet within the safe operating space for human freshwater use. While requiring corroboration by finer-scale research, the innovative quantitative foundation provided in this thesis suggests that farm water management merits a rise in political attention, and it can inform a more comprehensive discussion of related SDG targets and their interaction.

Zusammenfassung

Die Landwirtschaft ist heutzutage der wichtigste Treiber der globalen Degradation von Ökosystemzuständen und beeinträchtigt kritische Erdsystem-Wechselwirkungen. Um einen langfristigen gesellschaftlichen Wohlstand zu sichern, der auf intakten Ökosystemen beruht, verpflichten die Sustainable Development Goals (SDGs) alle Länder zu einer progressiv-transformativen Agenda. Einerseits müssen landwirtschaftliche Praktiken auf einen ökologisch nachhaltigen Pfad gelenkt werden. Gleichzeitig muss aber deren Produktion verdoppelt werden, um die weltweite Unterernährung bis zum Jahr 2030 zu beenden. Derzeit existiert jedoch wenig belastbares Wissen darüber, wie diese widersprüchlichen Ziele zu bewältigen sind. In dieser Arbeit untersuche ich systemische Optimierungsmöglichkeiten im landwirtschaftlichen Wassermanagement, um die zukünftige Nahrungsmittelproduktion mit den ökologischen Grenzen für deren Wasserverbrauch in Einklang zu bringen. Ich quantifiziere praxisorientierte Verbesserungen der Regenwassernutzung und Optimierungen von Bewässerungssystemen, unter Einhaltung der "environmental flow requirements" (EFRs), die die Basis für den Erhalt von aquatischen Ökosystemen darstellen. Um die Bedeutung, Herausforderungen und Wechselwirkungen verschiedener Wassernutzungskonzepte in Bezug auf die weltweite Nahrungsmittelproduktion zu untersuchen, entwickle ich den derzeitigen Standard prozessbasierter bio-physikalischer Modellierung mit dieser Arbeit weiter. Ich etabliere detaillierte, mechanistische und raum-zeitlich explizite Darstellungen der zugrunde liegenden Prozesse. Besondere Bedeutung hat dabei deren Rückkopplung mit Managementinterventionen, um Fragen dieser Art quantitativ zu untermauern. Vier Forschungsartikel (jeweils ein Kapitel dieser Dissertation) belegen ausführlich die folgenden Kernresultate. Erstens, die systematische Skalierung von EFRs auf globale Ebene zeigt, dass 39% der derzeitigen Wasserentnahmen für die Bewässerung nicht nachhaltig sind und auf Kosten der Ökosysteme stattfinden. Zweitens, die Etablierung dieser lokalen Wasserentnahmegrenzen deutet darauf hin, dass die globale Grenze für den menschlichen Wasserverbrauch deutlich niedriger liegen könnte, als zuvor veranschlagt (2800 gegenüber 4000 km^3/a). Drittens, die konsequente Umsetzung von Maßnahmen zur Einhaltung der EFRs würde mit erheblichen Beeinträchtigungen der landwirtschaftlichen Produktion einhergehen. Auf globaler Ebene würde die bewässerte Produktion um 14% fallen. Die Synthese von Interventionen im Wassermanagement, die Verknüpfung von Optionen der besseren Nutzung von Niederschlagswasser und die Optimierung von Bewässerungssystemen, stellen wirksame und zugleich realisierbare Maßnahmen dar, um die negativen Auswirkungen der EFR-Einhaltung und des Klimawandels zu kompensieren. Die Realisierung solcher ganzheitlichen Interventionen könnte die weltweite Nahrungsmittelproduktion um rund 40% nachhaltig steigern. Dies würde ausreichen, um die Nahrungsmittellücke der wachsenden Weltbevölkerung bis 2050 zu halbieren. Zusammenfassend stellt diese Arbeit eine umfassende und systematische Einschätzung der bislang weitgehend unkonkretisierten globalen Möglichkeiten für die nachhaltige Intensivierung der Landwirtschaft in Bezug auf Wassermanagement innerhalb der planetaren Leitplanken des Wasserverbrauchs dar. Die in dieser Arbeit vorgebrachten innovativen und quantitativen Erkenntnisse legen nahe, dass der politische Fokus auf verbesserten Wasserpraktiken ausgebaut werden sollte. Darüber hinaus können sie eine detailliertere Diskussion der SDG-Ziele und deren Wechselwirkungen stimulieren und stützen.