Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF)

Options to improve irrigation efficiency and productivity under rotational delivery schedule, a bottom-up approach applied at canal irrigation scheme in Pakistan

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Imran Sajid

aus

Kunduz, Afghanistan

Bonn 2022

SUMMARY

In Punjab, Pakistan, the Warabandi principle guides the distribution of surface water over a network of canals providing farmers with limited water in proportion to land size in a fixed 7-days rotation. Cotton is the most important crop for textile industries in Punjab, but it is highly water-demanding. Current problems with the cotton irrigation performance include rigid rotation and limited supply of water by century-old infrastructure under the Warabandi principle causing substantial water losses and triggering huge abstractions of groundwater by farmers, resulting in low irrigation efficiency and productivity while endangering the aquifer in terms of quantity and quality.

This thesis suggests the introduction of more flexible and site-specific irrigation scheduling in a bottom-up approach starting from the farm level as an entry point for complementing the perspective of a top-down approach in managing the Warabandi large-scale water allocation. The domain of this thesis discusses four specific objectives. The first objective consists in assessing the performance of canal irrigation scheme and water availability, while the second aim was to evaluate cotton irrigation scheduling in the context of Warabandi under various cultivation methods. The competence of several irrigation scheduling scenarios for cotton was investigated under the third objective, and the fourth particular objective addressed a barriers assessment in a potential implementation of proposed water management interventions.

This thesis considered a data and model-driven approach. Between June 2019 to October 2020, water delivery in the canal network was monitored and six cotton fields were randomly selected in the Mungi Distributary canal command area in Punjab. Each field's cotton cropping season activities were monitored and measured. The AquaCrop model was parameterized and validated separately for each field, and then applied to quantify four irrigation scheduling scenarios for two fields. The scenarios were considered mainly to explore the yield response to water stress and the non-beneficial use of water balance parameters in crop's root zone under controlled deficit irrigation options in context of the Warabandi. Therefore, scenario 1 reflects the current irrigation practice in the canal and groundwater use, while for scenarios 2, 3, and 4, solely Warabandi canal water allowance was considered and irrigation followed a fixed rotation of 7-days, 14-days, and flexible intervals, respectively.

Moreover, for a barrier assessment in the adaptation of the proposed interventions and to explore on how to embed technical solutions into the socio-economic and institutional context, three groups of stakeholders were individually interviewed using a structured questionnaire during September-December 2020: (a) 72 farmers, (b) 15 officials, and (c) 14 academicians.

The analysis under the first objective revealed a conveyance efficiency of ~75% for the network of canals, while field application efficiency was estimated as ~64% that led to overall Mungi canal irrigation scheme efficiency of 48%. The deficits of canal water supply versus demand for six cotton fields ranged from 45% to 73%, whereas the Mungi Distributary canal water showed a 68.6% and 19.8% shortfall in the April–September (Kharif) and October–March (Rabi) seasons of 2018/2019, respectively. Considering the outcome of the second objective, a farmer using drip technique attained the highest gross water productivity (GWP) 1.13 kg raw cotton yield/m^3gross water applied. In

contrast, the raised-bed furrow cultivator obtained the lowest GWP of 0.23kg/m^3, respectively. While the GWP varied between 0.25 and 0.39 kg/m^3 for flood basin, another field of raised-bed furrow, and two ridge-furrow cultivation methods. Moreover, the findings of the third objective unveiled that scenarios 2, 3, and 4 resulted in a substantial reduction of percolation water below the crop's root zone and lowered actual evaporation enabling similar yields and higher gross water productivity compared to the current practices in both fields using raised-bed furrow cultivation methods. The fourth objective's evaluation reflected that the most important barriers in the adaptation of the water management interventions (on-farm water storage, soil moisture sensor and drip) that were highly rated by the participants of the groups were low awareness, lack of training and financial resources. While the main problems in Warabandi water distribution provisions were expressed by the farmers as limited canal water allocation, academicians were concerned mostly with inflexibility and officials conveyed discussion among neighbors.

Under the framing conditions of Warabandi, the thesis considered the entry point for more flexible and demand-orientated irrigation at the farm level by (i) utilizing the AquaCrop for simulating pre- and within-season irrigation schedules, and (ii) advancing irrigation schedules by sensor-based soil moisture monitoring. These complementing interventions provide a strong package to improve on-farm water management, which can unfold its potential by (iii) combining the storage option of Warabandi allowance during the potential surplus time in a pond to create an enabling environment for demand-based irrigation. In addition, using the drip method could considerably reduce the undersupply situation in Warabandi-guided irrigation schemes.

This thesis builds a basis of a bottom-up approach for managing the Warabandi water allocation in a more flexible way on farm level. However, further research is necessary to advance the understanding and feasibility of deficit irrigation scheduling options under a rotational water distribution system for cotton at the farm level while aligning and boosting the farmers' capabilities in implementing these options. This thesis provided new on-farm water optimization options for cotton farming that will support key actors on interventions which can improve water productivity under increasingly variable water demand and supply conditions due to impacts by climate change.

Optionen zur Verbesserung von Bewässerungseffizienz und -produktivität unter den Rahmenbedingungen einer rotierenden Bewässerungsplanung: ein Bottom-up-Ansatz für ein Kanalbewässerungssystem in Pakistan

ZUSAMMENFASSUNG

Im pakistanischen Punjab wird das Oberflächenwasser nach dem Warabandi-Prinzip über ein Netz von Kanälen verteilt, welche den Landwirten in einem festen 7-Tage-Rhythmus eine begrenzte Wassermenge im Verhältnis zur Farmgröße zur Verfügung stellen. Baumwolle ist die wichtigste Anbaupflanze für die Textilindustrie im Punjab, hat aber einen sehr hohen Wasserbedarf. Zu den derzeitigen Problemen bei der Bewässerung von Baumwolle gehören die starre Rotation und die begrenzte Wasserversorgung durch die jahrhundertalte Infrastruktur nach dem Warabandi-Prinzip, was zu erheblichen Wasserverlusten führt und enorme Entnahmen aus dem Grundwasser als zusätzliches Wasserdargebot für die Landwirte zur Folge hat. Dies führt zu geringer Bewässerungseffizienz und produktivität und gefährdet die Grundwasserressourcen in Bezug auf Menge und Qualität.

In dieser Dissertation wird die Einführung einer flexiblen und Standort-angepassten Bewässerungssteuerung in einem Bottom-up-Ansatz vorgeschlagen, der auf der Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe ansetzt. Dies ergänzt die als Top-down-Ansatz vorgenommene, großräumige Zuteilung des Kanalwassers nach dem Warabandi-Prinzip. Im Rahmen dieser Arbeit werden vier spezifische Ziele erörtert. Das erste Ziel besteht darin, die Durchführung der Kanalbewässerung zu bewerten und die Wasserverfügbarkeit einzuschätzen, während das zweite Ziel darin liegt, die Bewässerungsplanung für Baumwolle im Kontext von Warabandi unter verschiedenen Anbaumethoden zu evaluieren. Die Eignung verschiedener Szenarien für die Bewässerungsplanung von Baumwolle wird im Rahmen des dritten Ziels untersucht, und das vierte Ziel betrifft die Bewertung der Hindernisse bei einer möglichen Umsetzung der vorgeschlagenen innovativen wasserwirtschaftlichen Maßnahmen.

In dieser Arbeit wird ein daten und modellgestützter Ansatz verfolgt. Zwischen Juni 2019 und Oktober 2020 wurde die Wasserabgabe im Kanalnetz überwacht, und sechs Baumwollfelder wurden nach dem Zufallsprinzip im Versorgungsgebiet des Mungi Distributary-Kanals in Punjab zur detaillierten Untersuchung ausgewählt. Die land und wasserwirtschaftlichen Aktivitäten des Baumwollanbaus wurden auf jedem Feld überwacht und gemessen. Das AquaCrop-Modell wurde für jedes Feld separat kalibriert und validiert und dann angewandt, um vier Szenarien für die Bewässerungsplanung für zwei Felder zu erarbeiten. Die Szenarien stehen unter dem wesentlichen Zweck, die Reaktion der landwirtschaftlichen Erträge auf Wasserstress zu untersuchen und die Komponenten des Wasserhaushalts in der Wurzelzone der Pflanzen abzuschätzen, die keinen Beitrag zur Pflanzenwasserversorgung leisten. Diese Szenarien reflektieren kontrollierte Defizitbewässerungsoptionen unter den Rahmenbedingungen des Warabandi-Prinzips. Dabei spiegelt Szenario 1 die derzeitige Bewässerungspraxis der kombinierten Nutzung von Kanal- und Grundwasser, wohingegen für die Szenarien 2, 3 und 4 ausschließlich das nach dem Warabandi-Prinzip zugeteilte Kanalwasser

berücksichtigt und die Bewässerung in einem festen Turnus von 7 Tagen, 14 Tagen bzw. mit flexiblen Intervallen simuliert wurde.

Zur Untersuchung der Fragen, welche Hindernisse einer Einführung der entwickelten technischen Lösungen zur Flexibilisierung der Bewässerung im Weg stehen und wie die Lösungen in den sozioökonomischen und institutionellen Kontext eingebettet werden können, wurden von September bis Dezember 2020 drei Gruppen von relevanten Stakeholdern anhand eines strukturierten Fragebogens einzeln befragt: (a) 72 Landwirte, (b) 15 Vertreter der Bewässerungsverwaltung und (c) 14 Wissenschaftler. Die Untersuchungen im Rahmen des ersten Ziels ergeben einen technischen Wirkungsgrad von ~75% für das Kanalnetz, während die Effizienz der Feldaufleitung auf ~64% geschätzt wird, was zu einem Gesamtwirkungsgrad für das Versorgungsgebietes des Mungi-Kanals von ~48% führt. Die vom Kanalnetz bereitgestellten Wassermengen weisen gegenüber den Bedarfswerten für die sechs Baumwollfelder Defizite zwischen 45% bis 73% auf; die Unterversorgung auf der Ebene des Mungi-Kanals in den Zeiträumen April-September (Kharif) bzw. Oktober-März (Rabi) 2018/2019 liegen bei 68.6% bzw. 19.8%. Im Hinblick auf das zweite Ziel wurde die höchste Brutto-Wasserproduktivität (GWP) mit 1.13 kg Rohbaumwolle/m3 Bruttobewässerungswasser von einem Landwirt erreicht, Tropfbewässerungstechnik einsetzt. Im Gegensatz dazu wurde mit Furchenbewässerung (als raised-bed-Variante) die niedrigste GWP von 0.23 kg/m3 erzielt. Die GWP für die vier übrigen Felder (Beckenbewässerung, konventionelle Furchen (2 Felder) und Furchen mit raised-bed) lagen zwischen 0.25 und 0.39 kg/m3. Die Arbeiten zum dritten Ziel zeigen, dass die Szenarien 2, 3 und 4 (ausschließliche Verwendung von Kanalwasser) eine erhebliche Verringerung der Versickerung unter die Wurzelzone der Pflanzen ermöglichen und zu einer geringeren tatsächlichen Evaporation führen, so dass ähnliche Erträge und eine höhere Bruttowasserproduktivität im Vergleich zu der derzeitigen Praxis in Bezug auf zwei Feldern mit Verwendung von Kanal- und Grundwasser und der Aufleitung mit Furchenbewässerung als raised-bed-Variante erreicht werden. Die Evaluation des vierten Ziels führt zu dem Ergebnis, dass die gravierendsten Hindernisse bei einer Umsetzung innovativer Maßnahmen in der Bewässerung (Wasserspeicher auf der Farm, Sensoren zur Erfassung der Bodenfeuchte, Tropfbewässerung) in einem geringen Kenntnisstand über Innovationen und dem Mangel an Training sowie unzureichenden finanziellen Ressourcen bestehen. Die Einschätzung wurde von allen Gruppen der befragten Stakeholder geteilt. Darüber hinaus sahen die Landwirte die begrenzte Wasserverfügbarkeit im Kanalsystem als Hauptproblem derzeitiger Wasserverteilung nach dem Warabandi-Prinzip an, wohingegen die Wissenschaftler vor allem die mangelnde Flexibilität der Wasserverteilung als problematisch einschätzten und die Vertreter der Bewässerungsverwaltung auf die Diskussionen zwischen den Wassernutzern als Schwierigkeiten hinwiesen.

Unter den Rahmenbedingungen des Warabandi wird in dieser Arbeit der Einstieg in eine flexiblere und bedarfsgerechtere Bewässerung auf der Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe berücksichtigt, und zwar unterstützt durch (i) die Nutzung von AquaCrop zur Simulation von Bewässerungsplänen vor und innerhalb der Saison und (ii) die Verfeinerung von Bewässerungsplänen durch sensorgestützte Bodenfeuchteüberwachung. Diese sich ergänzenden Maßnahmen stellen eine wirksame

Kombination von Interventionen zur Verbesserung des Bewässerungsmanagements im landwirtschaftlichen Betrieb dar, das ihr volles Potenzial entfalten kann, indem (iii) die Möglichkeit der Speicherung von Wasser in Überschusszeiten geschaffen wird (als ‚ermöglichende bzw. unterstützende infrastrukturelle Maßnahme' zur Einführung der bedarfsorientierten Bewässerung). Darüber hinaus kann der Einsatz der Tropfbewässerung die Unterversorgungssituation in Warabandi-gesteuerten Bewässerungssystemen erheblich reduzieren.

Diese Dissertation bildet die Grundlage für einen Bottom-up-Ansatz zur Flexibilisierung der Wasserverteilung innerhalb der Farm-Ebene unter den Bedingungen der großräumigen Wasserzuteilung nach dem Warabandi-Prinzip. Es sind jedoch weitere Forschungen erforderlich, um das Verständnis und die Durchführbarkeit von Optionen für die Defizitbewässerung im Rahmen eines rotierenden Wasserverteilungssystems für Baumwolle auf Betriebsebene zu verbessern, und gleichzeitig die Fähigkeiten der Landwirte bei der Umsetzung dieser Optionen zu fördern. Diese Arbeit liefert innovative Möglichkeiten für die Optimierung der Wassernutzung im Baumwollanbau auf der Farm-Ebene, die die Hauptakteure dabei unterstützen, Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserproduktivität unter den aufgrund des Klimawandels zunehmend variablen Wasserbedarfs- und -dargebotsbedingungen zu konzipieren und umzusetzen.