

JUSTUS-LIEBIG- UNIVERSITÄT GIESSEN

Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement
Professur für Landschafts-, Wasser- und Stoffhaushalt
Fachbereich 09: Agrarwissenschaft, Ökophologie und Umweltmanagement

Bewässerungsfeldbau in Usbekistan unter Klimawandelbedingungen

Eine Fallstudie der Water User Association Akbarabad im Ferghanatal

[24.02.2015]

Eingereicht von: B.Sc. Lisa Nakath

Lisa.Nakath@umwelt.uni-giessen.de

Matrikelnummer: 4002777

Betreuerin: Dipl.-Geogr. Yvonne Dervedde

Erstprüfer: Prof. Dr. Hans-Georg Frede

Zweitprüfer: Prof. Dr. Lutz Breuer

Erklärung selbständiger Verfertigung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen der Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angabe der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Grafiken, Tabellen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet. Ich stimme zu, dass die vorliegende Arbeit mit einer Anti-Plagiatssoftware überprüft werden darf.

Lisa Nakath

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
1.1 Bewässerungsfeldbau in Usbekistan	5
1.2 Water User Associations (WUA).....	6
1.3 Gebietsbeschreibung der WUA Akbarabad	7
1.4 Bewässerungspraxis	9
1.5 Wasserbedarf und Wasserfußabdruck	10
1.6 Aufbau und Ziel der Arbeit	11
2 Material und Methoden	13
2.1 Datengrundlage und Aufbereitung.....	13
2.1.1 SPARE:WATER-Modell	13
2.1.2 Niederschlags- und Temperaturdaten	16
2.1.3 Definition: Trockenjahr, Normaljahr	17
2.1.4 Vergleich Messdaten 2010 mit REMO-Modelldaten 2010	18
2.1.5 Landnutzung aus BAU-, ESA- und FSD-Szenarien	19
2.2 SPARE:WATER-Berechnungen	21
2.2.1 BAU-Szenario	21
2.2.2 FSD- und ESA-Szenario	23
2.2.3 Landnutzungswechsel	25
2.3 Datengenauigkeit	26
3 Ergebnisse	27
3.1 Veränderung des Wasserfußabdrucks unter Klimawandelbedingungen	29
3.2 Veränderung des Wasserfußabdrucks durch verschiedene Bewässerungstechniken	35
3.3 Veränderung des Wasserfußabdrucks mit verschiedenen Anbauszenarien	42
4 Diskussion.....	50
5 Fazit.....	58
Literatur.....	61
Anhang	64

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit den Berechnungen des Wasserbedarfs und des Wasserfußabdrucks mit dem Programm SPARE:WATER für die Water User Association (WUA) Akbarabad im Ferghanatal, Usbekistan. Dabei wird insbesondere die Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf den Baumwoll- sowie den Weizenanbau evaluiert. Für die Klimaperiode von 1961 bis 2080 wurden als Berechnungsgrundlage Trocken- und Feuchtjahre abgeleitet. Für eine flächendeckende Furchenbewässerung ergibt sich ein gesamter Wasserfußabdruck für Baumwolle von etwa 25,1 Millionen m³ unter der Annahme einer gleichbleibenden Anbaufläche. Für Weizen fällt der Wasserfußabdruck mit etwa 9,4 Millionen m³ im Durchschnitt für die gesamte Weizenanbaufläche der WUA geringer aus, da es sich um eine kleinere Fläche handelt und Weizen einen geringeren Wasserbedarf aufweist. Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Niederschlagsmenge auf den Wasserfußabdruck keine starken Auswirkungen hat, sondern dieser sich an der Evapotranspiration in der Vegetationsperiode und damit stark an der Temperatur orientiert. Weiter wird die aktuell angewendete Furchenbewässerung mit der effizienteren Tröpfchenbewässerung für Baumwollanbau und Sprinklerbewässerung für Weizenanbau verglichen. Durch eine Umstellung von 40 % der Anbaufläche des Weizenanbaus auf Sprinklerbewässerung können für die WUA im Durchschnitt 9,4 % des Bewässerungswassers eingespart werden. Dies entspricht etwa 0,9 Millionen m³ pro Jahr. Für die Umstellung von 35 % der Baumwollflächen auf Tröpfchenbewässerung kann eine Wassereinsparung von 13,5 %, etwa 3,4 Millionen m³, erreicht werden. Zur Analyse der Auswirkungen einer Landnutzungsänderung auf den Wasserverbrauch wird auch eine Änderung der Anbaustruktur innerhalb der WUA betrachtet. Basis hierfür sind verschiedene sozioökonomische Ausgangsbedingungen, wie einer Öffnung des Exportmarktes und ein Ende der Quotenregelung für den Weizen- und Baumwollanbau in Usbekistan. Hierzu werden die Wasserfußabdrücke für weitere ausgewählte Kulturen, Mais, Melone, Wassermelone, Sorghum und Trauben, unter Furchen- und Sprinklerbewässerung oder Tröpfchenbewässerung berechnet. Ziel ist es zu zeigen, welche Anbauszenarien für den Wasserbedarf der WUA Akbarabad Vorteile mit sich bringen. So hat sich herausgestellt, dass eine Umstellung auf besagte andere Kulturen in Kombination mit einer effizienten Bewässerungsmethode Wassereinsparungen von über 50 % pro Hektar im Vergleich zu einem reinen Weizen- und Baumwollanbau unter Furchenbewässerung ermöglicht.

1 Einleitung

1.1 Bewässerungsfeldbau in Usbekistan

Durch seine Lage in Zentralasien weist Usbekistan ein arides kontinentales Klima auf. Der Bewässerungsfeldbau spielt daher seit dem 18. Jahrhundert nachgewiesen eine wichtige Rolle. Vorherrschend wurden verschiedene Getreidesorten angebaut. Ende des 19. Jahrhunderts übernahm der russische Zar die Regierung in der Region und förderte den Baumwollanbau. In den 1920er-Jahren strukturierte die Regierung der Sowjet Union die Landwirtschaft in Kollektive (Kolchosen) und Staatsfarmen um. Die 1950er brachten große Investitionen zum Ausbau der Bewässerungssysteme [Bichsel, 2009]. In Usbekistan wurde hauptsächlich Baumwolle zum Export für die Textilindustrie angebaut, die Versorgung der Bevölkerung mit Lebensmitteln und anderen Gütern wurde durch andere Republiken der Sowjet Union übernommen. Im Jahr 1991 folgte die Unabhängigkeit der Republik Usbekistans nach dem Zerfall der Sowjet Union. Das Ackerland wurde in kleine Kollektive zerteilt, die Shirkats, und an einzelne Farmer zur Pacht vergeben. Die vormals durch die weit größeren Kolchosen gesteuerten Bewässerungs- und Anbausysteme wurden nicht auf die neuen und kleineren Farmstrukturen angepasst [Abdullaev et al., 2007]. Der Baumwollanbau nahm ab, da sich die Einwohner Usbekistans nach dem einhergehenden wirtschaftlichen Zusammenbruch zu großen Teilen selbst versorgen mussten. Aus demselben Grund nahm die Weizenproduktion zu. Die Regierung legte für alle Landwirtschaftsprodukte Anbauquoten, bezogen auf Ernte und Flächen, fest. Die Ernte musste vollständig zu festgelegten Preisen an den Staat verkauft werden. Seit 1995 sind nur noch Quoten für Baumwolle und Weizen festgeschrieben. Für Weizen hat sich zusätzlich eine Lockerung der Verkaufsquote an den Staat ergeben und 50 % dürfen von Landwirten selbst vertrieben werden. Durch die Preisbindung der Quotenregelung beim Baumwollanbau besteht bei den Farmern kein Anreiz, eine höhere Produktivität zu erreichen während die Ernteerträge für Weizen pro Hektar in derselben Zeit stark angestiegen sind. Da die Eigentümer der Landwirtschaftsflächen die Regierung Usbekistans ist, können den Farmern Anbaukulturen vorgeschrieben werden. So herrscht eine Anbaupolitik von 80 % Winterweizen und Baumwolle vor. Auf den verbleibenden 20 % der Flächen dürfen weitere Feldfrüchte angebaut werden. Auf letzteren 20 % darf auf einem Anteil kleiner 10 % ein für den Eigenbedarf genutztes Feld angelegt werden (Dehkan Farmen= „Küchengärten“). Hier werden Gemüse und Obst für den Hausbedarf des Pächters angepflanzt.

Seit 2003 werden die Shirkats in Einzelfarmen umgewandelt. Das im gleichen Jahr erlassene „basin water management principle“ leitete einen Wandel des Bewässerungswasser-managements ein [Abdullaev et al., 2007]. Eine nachhaltige und angemessene Wassernutzung soll so

gefördert werden [Yakubov and Hassan, 2007]. Bisher erfolgte die Verteilung des Wassers territorial, seit 2003 soll das Wassermanagement nach den Wassereinzugsgebieten organisiert werden. Noch fehlt ein Wasserrechtssystem.

Die Bewässerungsinfrastruktur in Usbekistan setzt sich aus drei Stufen zusammen: Hauptkanäle, welche das Wasser aus Flüssen zu den zu bewässernden Flächen transportieren, Sekundärkanäle, diese transportieren das Bewässerungswasser innerhalb von Kollektivfarmen und Water User Associations (WUA), und Tertiärkanäle, welche das Wasser zu den einzelnen Farmern und Feldern bringen [Abdullaev et al., 2007].

1.2 Water User Associations (WUA)

Im Jahr 2000 wurden durch den „Agricultural Reform Act“ die Water User Associations ins Leben gerufen. Für jede WUA wird ein Bewässerungsplan am Anfang der Vegetationsperiode erstellt, welcher sich an Fruchtfolge, Klimadaten, Bodenverhältnissen, Grundwasserverhältnissen und an Wasserverfügbarkeit orientiert. Laut Vorgabe erhält eine WUA im 10-tägigen Turnus eine vorgesehene Menge Bewässerungswasser, welches dann von ihr an einzelne Farmer gerecht verteilt werden muss. Oft fehlende Kontrollen gestalten dies schwierig.

Das Bewässerungswasser wird kostenlos an die WUAs vergeben. Die Assoziation verteilt das Wasser hingegen an die Farmer gegen eine Gebühr die sich an der Feldgröße bemisst. Eine von Reddy et al. (2013) durchgeführte Studie hat gezeigt, dass den Bewässerungsrichtlinien oft nicht nachgekommen wird, da Kontrollen und eine kontrollierbare Abflussmessung fehlten.

Von der Rechtsform sind WUAs nicht-kommerzielle, Nicht-Regierungsorganisationen. Sie werden von einem gewählten Gremium geleitet, das zu vorzugsweise gleichen Teilen aus Wassernutzern, Vertretern der Regierung und vorrangigen Stakeholdern bestehen. WUAs unterliegen einer Vielzahl an Gesetzen (Beispiele: Zivilgesetz, Gesetz zur Wassernutzung, Steuerrecht), werden hier jedoch nicht speziell behandelt, da die Gesetze vor der Etablierung der WUA verabschiedet wurden. Die Durchsetzung von getroffenen Vereinbarungen ist deshalb häufig schwierig zu erwirken. Beiträge der Mitglieder werden in den Betrieb und die Instandhaltung des Bewässerungssystems eingebracht. Oft ist die Wasserlieferung durch die übergeordneten Wassermanagementorganisationen (WMO) unzuverlässig und die WUA erhält nicht die vereinbarte Menge Wasser. Auch fehlen die finanziellen Mittel für Kontrollpegel [Ul Hassan, 2004]. Umfragen im Jahr 2004 unter den Farmern der WUA Akbarabad identifizierten die unregelmäßigen Zeiten der Wasserlieferungen als großes Problem, besonders auf die Küchengärten bezogen, trotz einer Verbesserung zu der Zeit vor Einführung der WUA. Die Verteilung des Wassers hingegen wurde als gerecht bewertet [Yakubov and Has-

san, 2007]. Die Grenzen der Water User Associations sollen sich an hydraulischen Grenzen orientieren um eine möglichst effiziente Wasserverteilung zu garantieren. In der Realität spielen Farmgrenzen jedoch ebenfalls eine Rolle und die hydraulischen Grenzen werden mitunter vernachlässigt. Die Bewässerungskanäle und Drainagen der Assoziationen sind oft aus finanziellen Gründen in schlechtem Zustand. Hierdurch ergibt sich eine ineffiziente und teilweise unregelmäßige Wasserverteilung, sowie ökologische Probleme durch hohe Versickerungsraten [Ul Hassan, 2004].

Weitere Probleme entstehen, weil Farmer und WUA-Mitarbeiter in Bereichen der Bewässerung und Instandhaltung nicht ausreichend geschult sind. Landwirte mit geringen Anbauflächen werden bei Entscheidungen übergangen. Es kommt zu Missverständnissen und Unstimmigkeiten in der Kommunikation zwischen den verschiedenen Parteien der WUA und somit ist oft keine optimale Funktionsfähigkeit gegeben.

Die WUA Akbarabad wurde von Beginn an positiv angenommen. Die Funktion und ihre Vorteile für die Bewässerungsverteilung waren vielen Landwirten bekannt und sie erklärten sich daher bereit, für die Instandhaltung und das Management der Bewässerungssysteme aufzukommen [Yakubov and Hassan, 2007].

1.3 Gebietsbeschreibung der WUA Akbarabad

Die Water User Association Akbarabad liegt zwischen dem $40^{\circ}57'37,60$ und $40^{\circ}47'65,87$ Längengrad und $71^{\circ}89'64,18$ und $71^{\circ}95'81,63$ Breitengrad in Zentralasien, in Usbekistan im Ferghanatal. Das Ferghanatal wird im Norden und Westen vom Tian Shan-Gebirge, im Süden vom Alai-Gebirge eingeschlossen. Die WUA liegt im Einzugsgebiet des Flusses Syr Darya [Srivastava et al., 2013], welcher das Ferghanatal von Ost nach West durchfließt. Sie befindet sich nördlich der Provinzhauptstadt Ferghana zwischen 451 m und 543 m über Normal Null [Sachbericht, 2013], im Kuva-Distrikt [Ul Hassan, 2004]. Die Mehrzahl der Landwirtschaftsflächen weist die Bodenart lehmigen Sand [Sachbericht, 2013] mit Kiesanteilen auf [Ul Hassan, 2004]. Die WUA wurde im März 2003 mit einer Gesamtgröße von 2.820 ha gegründet. Anfänglich bestand die WUA aus 33 Farmen in Privatbesitz zu durchschnittlich 13 ha, drei Shirkats und fünf Dörfern. Von den circa 16.000 Einwohnern leben viele unterhalb der Armutsgrenze. Hinzu kamen noch die privaten Küchengärten jedes Hauses. Im Jahr 2004 wurden Teile der Shirkats im Zuge von Reformen umgewandelt in weitere Privatfarmen, sodass eine Anzahl von 45 Farmen erreicht wurde. Hauptanbaukulturen sind Baumwolle und Winterweizen, gefolgt von Obstplantagen und Gemüseanbau in den Küchengärten. Vier Sekundär- sowie 105 Tertiärkanälen liefern das Bewässerungswasser aus dem South Fergana Canal [Yakubov and Hassan, 2007]. Die WUA Akbarabad ist die bisher einzige, die offiziell beim

Justizministerium von Usbekistan registriert wurde.

Befragungen der Farmer von Yakubov und Hassan in den Jahren 2003 und 2004 liefern Einschätzungen bezüglich der Funktionalität der WUA Akbarabad. Die Befragten beobachteten einen steigenden Grundwasserspiegel sowie gelegentliche Wasserknappheit und eine generell schlechte Trinkwasserqualität. Es fehlte an Mitteln für Betrieb und Instandhaltung der Bewässerungssysteme. Besonders die Wasserkanäle, welche direkt auf die Felder führen, waren in einem schlechten Zustand. Auch waren die Landwirte oft nicht sicher, wie viel Wasser ihre Feldfrüchte für ein effizientes Wachstum benötigen. Es herrschte folglich eine große Nachfrage nach Empfehlungen zu effizienten Ackerbaumethoden und Wassereinsparungsmaßnahmen.

Die Farmer in der WUA leben von mindestens zwei Einnahmequellen. Sie verkaufen die Baumwollernte komplett und Weizen zu Teilen an den Staat sowie die Produkte aus den Küchengärten auf regionalen Märkten. Viele Landwirte haben zusätzlich Vieh und Geflügel, mindestens für die Subsistenzwirtschaft. Einige Farmer haben auch einen Nebenerwerb außerhalb des landwirtschaftlichen Sektors [Yakubov and Hassan, 2007].

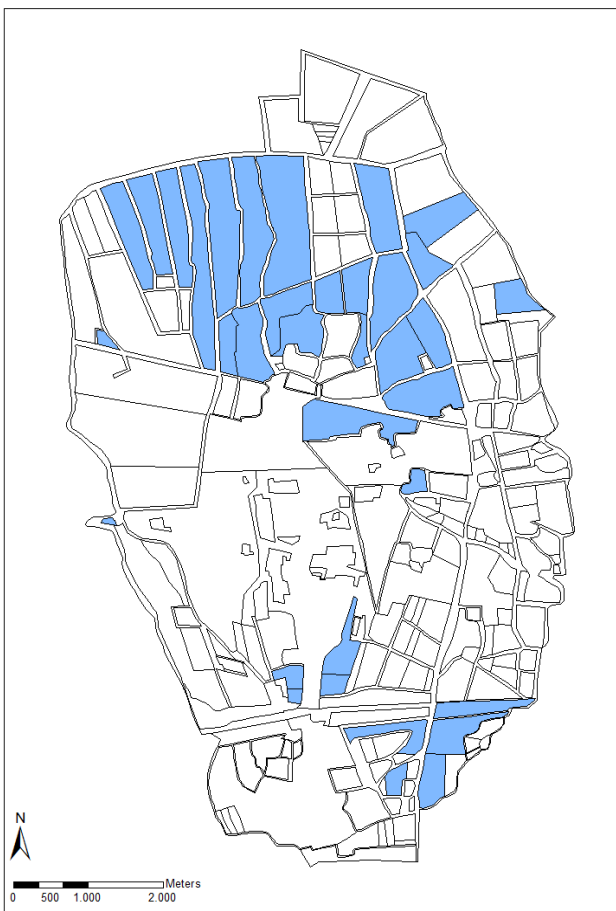


Abbildung 1. Anbauflächen für Baumwolle und Weizen in der WUA Akbarabad, dargestellt in blau. Die Gesamtanbaufläche beträgt 2.749,9 ha, davon Baumwollanbau 1575,3 ha und Weizenanbau 1174,6 ha [eigene Darstellung].

1.4 Bewässerungspraxis

Der Bewässerungsfeldbau wird in großen Teilen Usbekistans mithilfe von Furchenbewässerung durchgeführt [Horst *et al.*, 2005]. Das Arbeitsministerium der Republik Usbekistan führt als innovative Möglichkeit zur effizienteren Wassernutzung für den Weizen- und den Baumwollanbau die Sprinkler- und die Tröpfchenbewässerung an [Sachbericht, 2013].

Die Furchenbewässerung gehört zur Kategorie der Oberflächenbewässerung. Das Bewässerungswasser wird durch die Schwerkraft aus naheliegenden Flüssen oder Reservoirs in Gräben abgeleitet und nebenstehenden Pflanzreihen zugefügt. Dies geschieht allein durch die Schwerkraft entlang der Fließrichtung des Wassers. Diese Bewässerungstechnik ist auf jeder Bodenart einsetzbar und für Baumwoll- sowie Weizenanbau geeignet, allerdings mit Versickerungsverlusten belegt. Mit zunehmender Furchenlänge nehmen die Versickerungsverluste zu, daher sind kurze Gräben wassereffizienter. Die Nutzung flacher breiter Bewässerungsfurchen ist aufgrund einer großen wasserbenetzten Fläche sinnvoll. Das Gefälle sollte 3 % nicht übersteigen [Brouwer *et al.*, 1988]. In der WUA Akbarabad liegt ein leichtes Süd-Nord-Gefälle vor [Sachbericht, 2013]. Durch die starke Evaporation die mit Oberflächenbewässerung einhergeht, weisen bewässerte Gebiete in Usbekistan mehrheitlich saline Böden auf. Um den Salzgehalt in der Wurzelzone der Ackerkulturen wieder zu senken, werden zusätzliche Bewässerungswassermengen auf das Feld aufgebracht. Die Salze aus dem Wurzelbereich werden so ausgewaschen und gelangen ins Grundwasser oder im günstigsten Fall in den Drainageabfluss. Durch die zusätzliche Bewässerung steigt der Grundwasserspiegel temporär an. Durch erneute Evaporation kann es dann zu einer sekundären Versalzung kommen [Abdullaev *et al.*, 2007]. Die WUA Akbarabad verfügt über einen Zufluss mit einer hohen Wasserqualität. Die aktuelle ineffektive Bewässerungspraxis und der relativ gute Zustand der Drainagesysteme gewährleistet zum heutigen Zeitpunkt niedrige Wasser- und Bodensalzgehalte [Sachbericht, 2012].

Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung nutzen Pumpen um Wasser auf die Felder zu befördern. Erstere versprüht das Wasser durch Emitter und ermöglicht eine regenähnliche Verteilung unter- oder oberhalb der Feldfrucht. Eine Einschränkung hinsichtlich des Gefälles der Äcker liegt nicht vor, bei lehmigen Böden muss jedoch auf eine geringere Beregnungsrate als Versickerungsrate geachtet werden, um Run-off zu vermeiden. Hohe Windgeschwindigkeiten können dazu beitragen, dass eine Ungleichverteilung des Beregnungswassers erfolgt. Im Jahr 2010 haben Messungen in 2 m Höhe über dem Boden eine Durchschnittswindgeschwindigkeit von $3,23 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (1 Beaufort) für die WUA Akbarabad ergeben. Die Wahrscheinlichkeit der Ungleichverteilung durch Drift ist gering [Sachbericht, 2013].

Bei Tröpfchenbewässerung gelangen im Verhältnis nur geringe Mengen Wasser auf das Feld und werden durch einen Emitter kontinuierlich ($2-20 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) in Wurzelnähe der Pflanze aufgetragen. Düngemittel können direkt über das Bewässerungssystem zugegeben werden. Tröpfchenbewässerungssysteme sind meist permanent auf einem Feld angebracht und machen eine Automatisierung der Bewässerung möglich. Es besteht eine Eignung der Bewässerung mit salzhaltigem Wasser, da eine hohe Wassernutzungseffizienz vorliegt und daher verhältnismäßig wenig Salz in den Boden eingetragen wird.

Geeignet sind alle landwirtschaftlich bebaubaren Flächen und Böden. Probleme können durch die Verstopfung der Emitter mit Sedimentpartikeln, Algen oder Düngerrückständen entstehen. Im Pumpsystem eingebaute Filter können Abhilfe schaffen, die Instandhaltung ist allerdings aufwändig.

In genannter Reihenfolge nimmt die Wassernutzungseffizienz neben den Investitionskosten für die Bewässerungsmethoden zu [Brouwer *et al.*, 1988]. Zum Vergleich von Tröpfchen- und Furchenbewässerung wurden Studien für die Bewässerung von Baumwolle durchgeführt. Die Verluste aus Versickerung, Oberflächenabfluss und Evaporation waren für Tröpfchenbewässerung deutlich geringer [Ibragimov *et al.*, 2007]. Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung werden für monetär höher bewertete Feldfrüchte verwendet, da die Investitions- und Instandhaltungskosten im Verhältnis zur Oberflächenbewässerung erhöht sind [Brouwer *et al.*, 1988]. Steigende Kosten für Bewässerung oder Wasserknappheit mit einhergehenden Ernteeinbußen können effizientere Bewässerungssysteme jedoch wirtschaftlich machen [Ibragimov *et al.*, 2007]. Die Betrachtung des Themas unter monetärer Wirtschaftlichkeit wird in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

1.5 Wasserbedarf und Wasserfußabdruck

Das Konzept des Wasserfußabdrucks (WF) beruht auf der Idee, den Süßwasserverbrauch eines Produktes entlang der gesamten Produktionskette darstellen zu können [Hoekstra and Hung, 2002]. Der Wasserfußabdruck besteht aus drei Komponenten: dem blauen Wasserfußabdruck, dem grünen Wasserfußabdruck und dem grauen Wasserfußabdruck. Wird eine Feldfrucht betrachtet, so werden die für das Pflanzenwachstum nötigen Wasserflüsse erfasst. Der blaue Wasserfußabdruck gibt die Menge des aus dem Grund- und Oberflächenwassers genutzten Anteils entlang des gesamten Produktionsprozesses an. Im Fall einer bewässerten Feldfrucht handelt es sich um das Bewässerungswasser und das von den Pflanzen durch Evapotranspiration genutzte Grundwasser. Der grüne Wasserfußabdruck bringt die Menge des durch Pflanzenaufwuchs genutzten Niederschlags zum Ausdruck. Niederschlagswasser, welches durch Evaporation und Interzeption sowie Oberflächenabfluss verloren geht, wird hierin nicht

betrachtet. Der graue Wasserfußabdruck spiegelt die Menge des zur Neutralisation von in Wasser gelösten Schadstoffen benötigten Süßwassers wider um eine vorgegebene Wasserqualität zu erhalten.

In Regionen mit Wasserknappheit können durch ein solches Effizienzmaß Möglichkeiten erarbeitet werden Wasser effizienter zu nutzen und durch Anpassungen in der Produktionskette einzusparen [Aldaya *et al.*, 2012]. Bei der Betrachtung der Bewässerungssituation der WUA Akbarabad in dieser Arbeit werden sowohl effizientere Bewässerungstechniken als auch andere Fruchtfolgen in Betracht gezogen.

1.6 Aufbau und Ziel der Arbeit

Die beschriebenen Sachverhalte des Bewässerungsfeldbaus in der Region Ferghana und im Speziellen in der WUA Akbarabad, legen eine Anpassung der landwirtschaftlichen Praxis nah. Vor allem unter dem Gesichtspunkt der zukünftigen regionalen Klimaverhältnisse soll das Potential möglicher Anpassungsstrategien ermittelt werden. Durch abgeleitete Klimatrends aus dem Klimamodell REMO konnten für zukünftige Jahre geringere jährliche Niederschlagsmengen sowie steigende Temperaturen vorhergesagt werden. Daher werden Wasserplaner in Usbekistan in Zukunft mit dem Problem einer geringeren Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung konfrontiert sein.

Es ergibt sich die Frage, wie stark die Klimawandelbedingungen auf den Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Produktion in der WUA Einfluss nehmen. Der Wasserbedarf und die Wassereffizienz (Wasserfußabdruck) soll anhand von Berechnungen mit dem Simulationsmodell SPARE:WATER näher betrachtet werden. Die Berechnung der beiden Größen erfolgt auf Basis erstellter Landnutzungs- und Klimaszenarien die sowohl Klimawandeltrends als auch diverse Anbaumuster einschließen. Die Klimatrends werden in Form von Normal- und Trockenjahren für 4 Klimaperioden zwischen 1961 und 2080 eingearbeitet.

Berechnete Basisszenarien die zunächst nur die Feldfrüchte Baumwolle und Weizen umfassen dienen als Referenz für die aktuelle Situation. Sie unterliegen gesetzlich festgelegten Abnahmemengen und bilden im Untersuchungsgebiet die Hauptkulturen.

Desweiteren werden verschiedene Szenarien betrachtet, welche sich durch eine flächenmäßig unterschiedliche Bewässerungstechnik auszeichnen. Das Ausgangsszenario (Business As Usual) spiegelt eine reine Furchenbewässerung auf der gesamten Fläche der WUA wider. Zwei weitere Szenarien (FSD und ESA) bilden eine Mischung aus Furchen- und Sprinkler-, beziehungsweise Tröpfchenbewässerung. Mit ihrer Hilfe soll beurteilt werden, inwiefern effizientere Bewässerungstechniken den Wasserbedarf der WUA Akbarabad für die Hauptkultu-

ren Weizen und Baumwolle senken können. Die Szenarien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Überblick der Szenarien [*Sachbericht*, 2013]. Bewässerungsanteile und Flächen für Baumwolle und Weizen in der WUA Akbarabad [eigene Darstellung].

Szenarien	BAU	FSD	ESA
Baumwolle Furchen [%]	100	80	65
Baumwolle Tröpfchen [%]	-	20	35
Baumwolle Fläche [ha] 2020/2050	1.575,3/1.575,3	1.612,8/ 1.110,8	1.627,7/ 1.271,9
Weizen Furchen [%]	100	60	80
Weizen Sprinkler [%]	-	40	20
Weizen Fläche [ha] 2020/2050	1.174,6/1.174,6	738,6/ 604,3	671,4/ 335,7

In einem dritten Schritt wird der Wasserbedarf der WUA in einer Kombination aus effizienteren Bewässerungstechniken und einem Landnutzungswechsel untersucht. Die Szenarien des Landnutzungswechsels repräsentieren mögliche politische Richtungswechsel des Agraraußenhandels und werden im folgenden Kapitel näher erläutert (Kap. 2.1.5). Schließlich wird der Wasserbedarf und die Wassernutzungseffizienz unter den gegebenen Szenarien bestimmt und bewertet.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlage und Aufbereitung

Grundlage für die Referenzberechnung des Pflanzenwasserbedarfs und der Wasserfußabdrücke von Baumwolle und Weizen für die WUA Akbarabad bildet das beobachtete Jahr 2010. Die für die Berechnung nötigen landwirtschaftlichen Daten wurden dem Sachbericht (2013) des Projektes Central Asia Water (CAWa) entnommen. Für die Berechnung des Pflanzenwasserbedarfs (ETcrop) wurde das Modell nach Hargreaves und Samani (1982) ausgewählt, dass lediglich Daten zu Temperatur und Niederschlag benötigt. Die Niederschlags- und Temperaturdaten beruhen auf einer Modellierung mit dem Regional climate Model (REMO) für Zentralasien [Sachbericht, 2012]. Die Erntedaten und Prognosen für die WUA und die Provinz Ferghana wurden vom Scientific-Information Center of the Interstate Coordination Water Commission of Central Asia (SIC ICWC) in Taschkent erhoben (reporting period) und berechnet [Sachbericht, 2013].

2.1.1 SPARE:WATER-Modell

Das Modell SPARE:WATER, Site-sPecific Agricultural water Requirement and footprint Estimator, ist ein raumbezogenes Entscheidungsunterstützungssystem. Es ermöglicht eine regionale Analyse des blauen, grünen, grauen und des gesamten Wasserfußabdrucks und kann diese räumlich aufgelöst in einem Koordinatensystem darstellen. So kann der Wasserfußabdruck für einzelne Felder, Flächenverbände oder administrative Einheiten oder für nur eine bestimmte Kultur angegeben werden. Der Wasserbedarf wird dann pro Fläche (ha) oder Produktionseinheit (t) angegeben [Mulsch *et al.*, 2013].

Das Programm setzt sich zusammen aus einer Datenbank, für die Verwaltung der Eingangs- und Ausgangsparameter, Modellen zur Berechnung der relevanten Größen (Meteorologische Parameter, Pflanzenwasserbedarf, Bewässerungsbedarf, Salzauswaschungsbedarf, Wasserfußabdruck) und einer grafischen Benutzeroberfläche. Die grundlegenden Berechnungsansätze orientieren sich an den Bewässerungsrichtlinien der FAO [Allen *et al.*, 1998].

Die für das Programm benötigten Daten zur Berechnung des Wasserbedarfs und des Wasserfußabdrucks setzen sich aus drei Kategorien zusammen:

Forcing Data/ Meteorologische Größen (jeweils monatliche Durchschnittswerte)

- Niederschlag [mm]
- minimale und maximale Temperaturen [°C]
- Windgeschwindigkeiten [$\text{km}\cdot\text{d}^{-1}$]
- relative Feuchte [%]
- Sonnenscheindauer [h]

Input Data/ Physiologische und Bewässerungsparameter

- Karte der Referenzflächen /Landnutzungskarte
- Digitales Höhenmodell [m ü. NN]
- Bewässerungseffizienz [%]
- Bewässerungsmethode [1,2,3]
- Bewässerungswasserqualität [$\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$]
- Bodenkarte

Input Parameter/ Pflanzenspezifische Parameter /Ernteinformation

- Crop Coefficient: $K_{c_{ini}}$ [-], $K_{c_{mid}}$ [-], $K_{c_{end}}$ [-], Länge der Vegetationsperiode [d], Wurzeltiefe [cm], Pflanzhöhe [cm], Grenzwert zulässige Salzkonzentration für die Pflanze im Bodenextrakt $EC_{e0\%}$ und $EC_{e100\%}$ [$\text{cS}\cdot\text{m}^{-1}$], Saatdatum, Erntedatum
- Crop Production: Kulturpflanze, Jahr, Provinz, Ernte [$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$], Erntefläche [ha]

Mithilfe der Eingabe der meteorologischen Eingangsgrößen (Forcing Data) sowie der Referenzfläche und des digitalen Höhenmodells wird die potentielle Evapotranspiration (ET_0) berechnet. Für die Berechnung stehen je nach Datenverfügbarkeit verschiedene Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung. Es stehen die Methoden nach Penman-Monteith, Priesley-Taylor, Turc, und Hargreaves-Samani zur Auswahl. Für die von der FAO empfohlene Berechnungsmethode nach Penman-Monteith stehen im Untersuchungsgebiet nicht alle benötigten meteorologischen Daten zur Verfügung. Für die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration für die WUA Akbarabad wird die Berechnungsmethode nach Hargreaves-Samani (Gl. 1), mit der kleinsten Anzahl an Eingangsgrößen, gewählt. Hier geht, neben monatlichen Niederschlags- und Temperaturwerten, nur die Sonnenscheindauer als weitere Einheit ein [Allen *et al.*, 1998]. Gleichung (1) zeigt die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Hargreaves-Samani.

$$ET_0 = 0,0023 \times (T_{\text{mean}} + 17,8) \times (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \times R_a \quad [\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}] \quad (1)$$

Mit T = Temperatur in $^{\circ}\text{C}$, R_a = extraterrestrische Strahlung [$\text{MJ}\cdot\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$].

Mittels eines pflanzenspezifischen Koeffizienten (Crop Coefficients) wird in Gleichung (2) die kulturspezifische Evapotranspiration berechnet (ET_c). Dieser Koeffizient kann für die gleiche Kultur in verschiedenen Klimaten variieren und es wird häufig ein regionsspezifischer Koeffizient definiert.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad [\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}] \quad (2)$$

Mit K_c = Koeffizient aus kulturartsspezifischen Charakteristika und durchschnittlicher Evapotranspiration [-].

Gleichung (3-5) zeigen die Berechnungsmethoden des blauen, grünen und grauen Wasserfußabdruck. Als Referenz für die Berechnung dient die Referenzkarte.

Die Wasserfußabdrücke pro Vegetationsperiode definieren sich wie folgt:

$$WF_{\text{crop}} = \frac{\max(P_{\text{eff}}, CWR) - P_{\text{eff}}}{Y} \quad [m^3 * t^{-1}] \quad (3)$$

$$WF_{\text{bcrop}} = \frac{IRR}{Y} \quad [m^3 * t^{-1}] \quad (4)$$

$$WF_{\text{gcrop}} = \frac{LR}{Y} \quad [m^3 * t^{-1}] \quad (5)$$

Mit: P_{eff} = effective Rainfall (effektiver Niederschlag) [$m^3 * ha^{-1}$], CWR = Crop Water Requirement (Wasserbedarf der Pflanze) [$m^3 * ha^{-1}$], IRR = Irrigation Requirement (Bewässerungsbedarf) [$m^3 * ha^{-1}$], LR = Leaching Requirement (Auswaschungsbedarf) [$m^3 * ha^{-1}$], Y = Yield (Ertrag) [$t * ha^{-1}$] [Mulsch *et al.*, 2013].

$$LR = \frac{IRR}{1-LF} - IRR \quad [m^3 * ha^{-1}] \quad (6)$$

Mit LF = Leaching Fraction (Auswaschung) [-].

Die LF wird aus der Salzkonzentration des Bewässerungswassers im Verhältnis zur maximal tolerierbaren Salzkonzentration einer Kulturart berechnet. Sie unterscheidet sich für Oberflächenbewässerung und Tröpfchen- beziehungsweise Sprinklerbewässerung.

$$LR = \frac{V_d}{V_f} \quad [-] \quad (7)$$

Mit V_d = Drainagewasservolumen [m^3], V_f = Bewässerungswasservolumen [m^3].

Für die Anwendung von SPARE:WATER für das Ferghanatal wurde die Berechnung des Auswaschungsbedarfs (LR) angepasst. Eine mögliche Salzauswaschung bereits während der Vegetationsphase wurde bisher im Programm nicht berücksichtigt. Die übliche Vorgehensweise wäre die Gabe einer Bewässerung am Ende der Vegetationszeit zur Auswaschung der Salze der gesamten Wachstumsperiode. Es zeigte sich jedoch, dass in der Vegetationsphase ein Bodenwasserüberschuss vorliegt, welcher in der Vegetationszeit zur Salzauswaschung führt und somit für viele Kulturen das LR bereits durch die Perkolationsverluste abgedeckt ist [Sachbericht, 2013]. Durch die Einführung der zusätzlichen Formel (Gl. 7) wird für den Auswaschungsbedarf ein Schwellenwert beachtet. Ist die Bewässerungsmenge im Verhältnis zum

Volumen des Drainagewassers ausreichend groß, entfällt ein Wasseranteil für Leaching [Howell, 2003].

Weitere Informationen zum Programm SPARE:WATER und dessen Anwendung finden sich in der Arbeit von Multsch et al. (2013).

2.1.2 Niederschlags- und Temperaturdaten

Die Niederschlags- und Temperaturdaten wurden für den Zeitraum 1.1.1961- 31.12.2100 mit dem REMO-Modell für die Station Ferghana im Rahmen des Projektes CAWa simuliert. Aus den REMO-Modelldaten wurden die jährlichen Minimum und Maximum Temperatur sowie die jährlichen Niederschlagssummen ausgegeben (Abb.2).

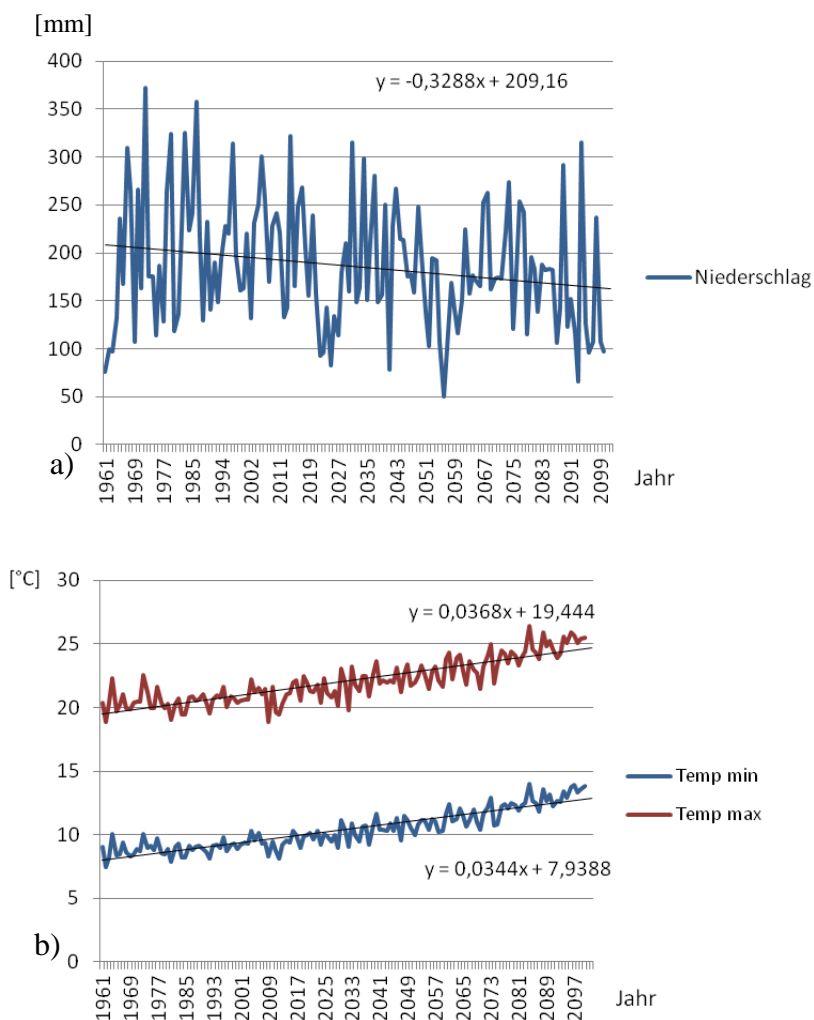


Abbildung 2. jährliche a) Niederschlagssummen und b) Temperaturdaten der REMO-Modellierung für die Station Ferghana für die Klimaperiode von 1961- 2100 [Sachbericht, 2012], eigene Darstellung.

Mithilfe des Statistik-Programms STATISTICA [StatSoft, 2013] werden die Niederschlags- und Temperaturdaten aufbereitet. Ausreißer der jährlichen Niederschlagssummen werden durch die Anwendung eines Boxplotdiagramms identifiziert und entfernt. Die maximale Län-

ge der Whiskers beträgt 1,5*Interquartilsabstände. Für die Wasserfußabdruckberechnungen wird die Klimaperiode von 1961 bis 2080 genutzt um vier klimatologische Referenzperioden einzuschließen. Es können für diese Periode zwei Extremjahre (Ausreißer) festgestellt werden (1990, 2004), die für die weitere Verarbeitung der Daten aus dem Datensatz entfernt werden.

2.1.3 Definition: Trockenjahr, Normaljahr

Es wird in den späteren Berechnungen von Szenarien zwischen Trocken- und Normaljahren unterschieden. Diese Unterscheidung ist für die unterschiedliche Verfügbarkeit von Niederschlag (grüner WF) von Bedeutung. Für die statistischen Vergleiche des Wasserbedarfs in der Klimaperiode von 1961 bis 2080 wurden für jede 30-jährige Periode (1961-1990, 1991-2020, 2021-2050, 2051-2080) ein Trockenjahr sowie ein Normaljahr aus den Daten des RMO-Modells in Bezug auf die Niederschlagsmengen bestimmt.

Ein Normaljahr berechnet sich allgemein nach dem Ausschluss von Ausreißern aus dem Durchschnitt der Jahresniederschläge einer Klimaperiode [WMO, 2014]. Das Jahr, dessen Niederschlagsmenge am nächsten am Durchschnitt liegt, wird als Datensatz für ein Normaljahr festgelegt. Die ausgewählten Datensätze weichen zwischen 1,02 % und 0,97 % vom Klimaperiodendurchschnitt ab.

Zur Festlegung eines Trockenjahres für jede 30-jährige Klimaperiode wird das 95%-Konfidenzintervall genutzt, um extreme Trockenjahre auszusortieren. Der ermittelte Niederschlagswert an der unteren Grenze des Konfidenzintervalls (5%) dient als Grenzwert für ein Trockenjahr. Das erste Jahr, welches über diesem Grenzwert liegt, wird jeweils als Trockenjahr ausgewählt.

Für jede der 4 Klimaperioden stehen nun 2 Datensätze (Normal- und Trockenjahr) zur Verfügung, die verschiedene Klimausprägungen repräsentieren. Die zugehörigen Temperaturdaten der ausgewählten Normal- und Trockenjahre werden jeweils unverändert mit übernommen.

Die ausgewählten Normaljahre der vier Klimaperioden werden im Zeitverlauf relativ zueinander betrachtet um herauszufinden, ob sich der zukünftige Wasserbedarf und Wasserfußabdruck im Vergleich zu ihren historischen Werten verändern. Die Beobachtung der Trockenjahre soll zeigen, ob die Jahre mit besonders geringen Niederschlagswerten zukünftig einen verhältnismäßig höheren Wasserbedarf aufweisen.

Es ergeben sich folgende Datensätze:

Tabelle 2. Ausgewählte Trockenjahre (Ta) und Normaljahre (Na) von 1960-2080 mit zugehörigen jährlichen Temperaturdaten und Niederschlagssummen aus dem REMO-Modell [*Sachbericht, 2012*], eigene Darstellung.

	Jahr	Niederschlag [mm]	Temperatur max. [°C]	Temperatur min. [°C]	Durchschnittstemperatur [°C]
Ta	1962	99,01	18,88	7,43	13,16
Na	1987	215,24	20,86	8,77	14,82
Ta	1991	140,86	20,38	8,66	14,52
Na	2010	241,18	21,63	9,46	15,55
Na	2018	205,11	20,51	8,97	14,74
Na	2020	238,74	21,98	10,00	15,99
Ta	2022	92,91	21,25	9,65	15,45
Na	2028	180,11	21,32	9,96	15,64
Na	2050	197,47	21,73	10,54	16,14
Ta	2055	107,18	21,47	10,36	15,92
Na	2064	177,14	24,14	12,03	18,09

2.1.4 Vergleich Messdaten 2010 mit REMO-Modelldaten 2010

Die Bewertung einer Modellsimulation auf ihre Aussagefähigkeit hin ist häufig sehr schwierig. Die Modelleingangsdaten können aber häufig wesentlich einfacher überprüft werden. Um eine Aussage über Repräsentativität der Eingangsdaten die Wahrscheinlichkeit der Wasserfußabdruckergebnisse für Temperatur-, Niederschlags- und Erntedaten treffen zu können, werden die REMO-Modelldaten für das Jahr 2010 mit den Messwerten von 2010 für die WUA Akbarabad verglichen und die gemessenen Erntedaten der WUA mit den Hochrechnungen für die Provinz Ferghana verglichen.

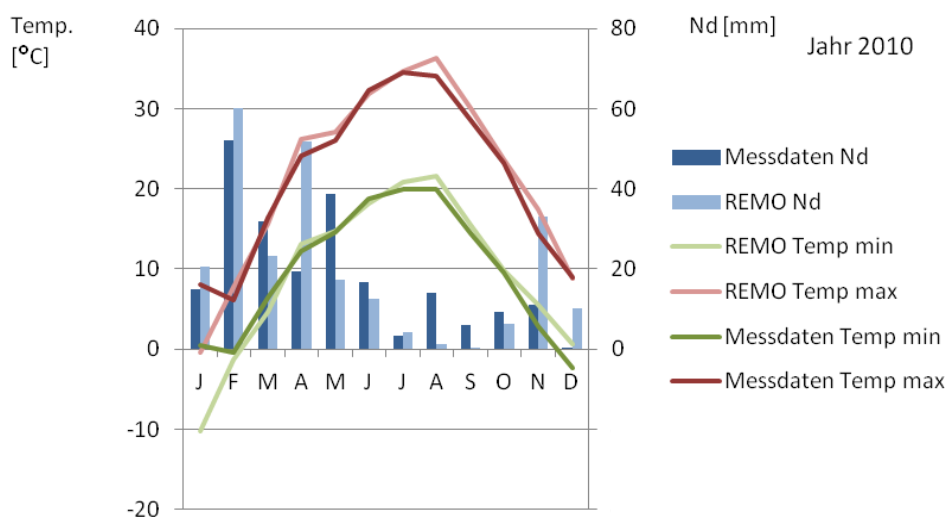


Abbildung 3. Vergleich der Niederschlags- (Nd) und Temperaturwerte (Temp) aus dem REMO-Modell und den Messdaten der WUA für das Jahr 2010 [*Sachbericht, 2012*], eigene Darstellung.

Ein t-Test für zwei unabhängige Stichproben (mit STATISTICA durchgeführt) wird mit den monatlichen Temperaturen für das Jahr 2010 durchgeführt. Für die Modell-Werte und die

Messwerte ergibt sich ein p-Wert von 0,980409. Es besteht kein signifikanter Unterschied in den Temperaturewerten, dass heißt eine Vergleichbarkeit für die Temperaturen ist gegeben.

Der t-Test für unabhängige Stichproben für die Niederschlagsmengen, hat einen p-Wert von 0,789130 ergeben. Die Niederschlagswerte für das REMO-Modell und die Messwerte aus dem Jahr 2010 unterscheiden sich demnach nicht signifikant voneinander.

Auch die gemessenen Erntemengen für die WUA Akbarabad werden mit den Messwerten für die Provinz Ferghana aus der Erhebungsperiode (reporting period) von 2010 ins Verhältnis gesetzt. Es wird für die Provinz Ferghana ein Mittelwert aus den Angaben für die 18 Distrikten gebildet sowie für die WUA ein Mittelwert aus den Angaben der einzelnen Farmer.

Tabelle 3. Durchschnittliche Erträge der Provinz Ferghana und der WUA Akbarabad für das Jahr 2010 (Messdaten) [Sachbericht, 2012], eigene Darstellung.

Erträge [$t \cdot ha^{-1}$]	Baumwolle	Weizen
WUA Akbarabad	2,97	5,19
Provinz Ferghana	2,8	5,7
Verhältnis Provinz/WUA	0,9406	1,0975

Die Messwerte der Ernteerträge für die WUA weichen von den Werten der Provinz für Weizen um 9,75 % und für Baumwolle um 5,94 % ab. Die Weizenerträge fallen für die WUA im Verhältnis zur gesamten Provinz etwas niedriger aus, die Baumwollerträge im Gegensatz etwas höher. Aufgrund fehlender Daten für weitere Jahre zur Vergleichbarkeit kann keine weitere Validierung der Eingangsgrößen vorgenommen werden. Der Unterschied in den Erntemengen sowie den Temperatur- und Niederschlagswerten kann nur als Interpretationsrichtung genutzt werden.

2.1.5 Landnutzung aus BAU-, ESA- und FSD-Szenarien

Die Szenarien, an welchen sich die Fragestellung und die Annahmen dieser Arbeit orientieren, wurden von dem Scientific-Information Center of the Interstate Coordination Water Commission of the Central Asia (SIC ICWC) in Tashkent und dem Arbeitsministeriums der usbekischen Regierung bereitgestellt. Für die 3 usbekischen Provinzen des Ferghanatals (Andijan, Namangan und Fergana) wurden in den Jahren 2000, 2005 und 2010 (reporting period) sozioökonomische und Landnutzungsdaten gesammelt. Des Weiteren wurden Hochrechnungen zu Bevölkerungswachstum, landwirtschaftlicher Produktion, Bewässerungsbedingungen und Verbraucherverhalten in Bezug auf Grundnahrungsmittel für die Jahre 2020 und 2050 erstellt. Die Hochrechnung berücksichtigt drei unterschiedliche Szenarien die jeweils eine mögliche agrarpolitische Richtungsentscheidung repräsentieren: Business As Usual (BAU), Food Security and Diet change (FSD) und Export-oriented Sustainable Adaptation (ESA).

Das BAU-Szenario geht von einer gleichbleibenden Landnutzung aus. Die Fläche unter landwirtschaftlicher Nutzung bleibt konstant, die darin bewässerten Flächenanteile und ihre prozentuale Verteilung der Anbaufrüchte ebenfalls. Die Bewässerung erfolgt weiterhin nach dem Prinzip der Furchenbewässerung. Für die Kultur Baumwolle wird eine leichte Abnahme der Erträge pro Hektar vorhergesagt, der Weizenertrag soll hingegen stark ansteigen. Zusammengefasst werden die aktuell beobachteten Tendenzen fortgeschrieben.

Das FSD-Szenario geht hingegen von einer Veränderung des Lebensstils der Bevölkerung aus und einer damit einhergehenden Änderung der landwirtschaftlichen Nutzung hin zur nationalen Ernährungssicherung. Auch in diesem Szenario bleiben die gesamt-landwirtschaftliche Anbaufläche sowie ihr bewässerter Anteil konstant. Es ändern sich jedoch die prozentuale Verteilung der Anbaufrüchte und die Arten der Bewässerung von reiner Oberflächenbewässerung hin zu einer anteilmäßigen Zusammensetzung aus Furchenbewässerung (Baumwolle 80-95 %, Weizen 60-80 % der Anbaufläche), Sprinklerbewässerung für Weizen (20-40 % der Anbaufläche) und Tröpfchenbewässerung für Baumwolle (5-20 % der Anbaufläche) [*Sachbericht*, 2013]. In dieser Arbeit beschränken sich die Analysen auf die Anbauprodukte Baumwolle und Weizen. Die Gesamtfläche für Weizen wird in diesem Szenario reduziert, um mehr Fläche für Futterpflanzen für die Viehwirtschaft zu schaffen (Erhöhung des Fleischkonsums). Die Flächen mit Baumwollanbau nehmen leicht ab. Die Bewässerungstechnik wird für beiden Kulturen mit Tröpfchen- und Sprinklerbewässerung anteilmäßig auf den Anbauflächen der WUA berücksichtigt. Das Szenario geht von einer Wassereinsparung durch veränderte Bewässerungstechniken von 50 % aus und einer allgemeinen Ertragssteigerung von 65- 95 %, teils zurückzuführen auf die verbesserte Bewässerungstechnik. Die prognostizierten Erträge für die Kulturen Weizen und Baumwolle steigen laut Hochrechnung jedoch nur minimal.

Das ESA-Szenario behält ebenfalls die gesamte Anbaufläche sowie ihre bewässerten Anteile bei. Es geht jedoch von einer Öffnung des Agrarmarktes und einer exportorientierten Landnutzung aus. Die eigene Ernährungssicherung wird durch das Streben nach dem größtmöglichen Gewinn auf dem Weltmarkt abgelöst. Die bereitgestellte Anbaufläche für Baumwolle und Weizen nimmt zu Gunsten von Cash Crops (Exportfrüchten) ab. Auch hier zeigen die Hochrechnungen des Szenarios eine Zunahme der Anbaufläche nur für Weizen, die Fläche des Baumwollanbaus nimmt von 2010 nach 2050 ab. Im Verhältnis zum BAU-Szenario liegt der Baumwollanteil jedoch immer noch höher. Die Erträge verhalten sich für die beiden Anbauprodukte wie im FSD-Szenario. Die anteilmäßige Verteilung der eingesetzten Bewässerungstechnik besteht für Baumwolle zu 15-35 % aus Tröpfchenbewässerung und zu 65-85 % aus Furchenbewässerung. Die Weizenflächen werden zu 15-20 % mit Sprinklerbewässerung

versorgt und zu 80-85 % weiterhin mit Furchenbewässerung. Dieses Szenario prognostiziert ebenfalls eine Verringerung des Wasserbedarfs von 50 % sowie eine durchschnittliche Ertragszunahme von 65-95 % [Sachbericht, 2013].

Aufgrund widersprüchlicher Aussagen zu nur leicht steigenden Erträgen trotz effizienterer Bewässerung in den Szenarien FSD und ESA sowie einer Erntemengenabnahme für Weizen im Verhältnis zur reinen Furchenbewässerung im BAU-Szenario, werden für die Berechnung mit SPARE:WATER die Ertragsangaben des BAU-Szenarios verwendet. Es ist zusätzlich eine bessere Vergleichbarkeit der Berechnungen für verschiedene Bewässerungstechniken gegeben. Die prozentuale Veränderung der Anbaufläche wird aus den beschriebenen Szenarien übernommen und für das FSD- und ESA-Szenario auf die Flächenanteile der WUA angewendet.

2.2 SPARE:WATER-Berechnungen

Die geschilderten Annahmen der Szenarien definieren lediglich die Landnutzungsverteilung und die Ertragswerte. Jedes Szenario wird außerdem in Kombination mit den definierten Normal- und Trockenjahren ausgewertet.

2.2.1 BAU-Szenario

Die Kombination der Ertragsdaten aus Hochrechnungen für Distrikte und gemessenen Angaben für das Gebiet der WUA des Jahres 2010 (Anhang Tab. 19) erfordern eine Interpolation für Jahre die zwischen den Bezugszeiträumen (2000, 2010, 2050) liegen. Die durchschnittlichen Erntemengen der Prognose für die Provinz Ferghana von 2000 bis 2050 (BAU-Szenario) (Anhang Tab. 20) werden zur Erstellung einer Funktion für nicht angegebene Zeitpunkte verwendet (Abb. 4).

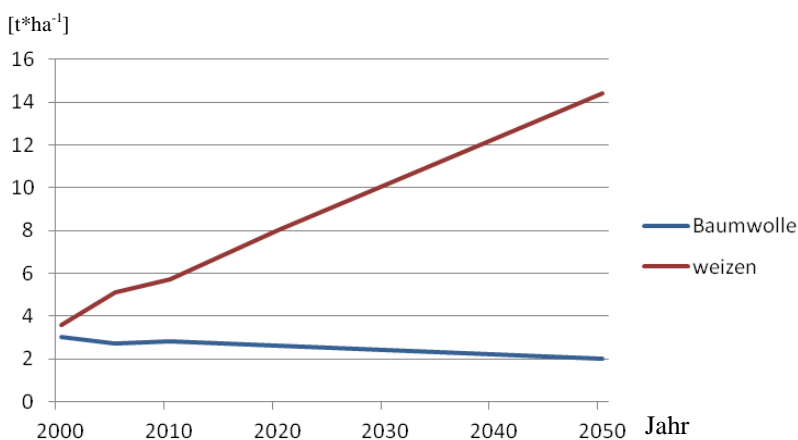


Abbildung 4. Ertragsänderung in $t \cdot ha^{-1}$ unter Verwendung der Prognosewerte für Baumwolle und Weizen in der Provinz Ferghana für das BAU-Szenario [eigene Darstellung].

Durch Einsetzen der Versuchsjahre in die Funktion ergibt sich eine theoretische durchschnittliche Erntemenge in $t \cdot ha^{-1}$ für jedes Versuchsjahr nach dem Jahr 2000.

Tabelle 4. Aus der Funktion abgeleitete Erntemengen in $t \cdot ha^{-1}$ für die Versuchsjahre ab 2000. Erträge für Baumwolle und Weizen vor 2000 erhoben durch die FAO [FAO, 2015]. Gerundet auf eine Nachkommastelle [eigene Darstellung].

Jahr	Baumwolle	Weizen
1962	1,9	0,5
1987	2,3	1,1
1991	2,7	1,3
2018	2,6	7,5
2022	2,5	8,4
2028	2,4	9,6
2055	1,9	15,4
2064	1,7	17,3

Für die Versuchsjahre die in der Vergangenheit liegen (1962, 1987, 1991) ist die Extrapolation der Funktion nicht sinnvoll da keine Referenzgrößen vorliegen. Auch ist aufgrund der Quotenregelung der usbekischen Regierung mit geringen Ertragsänderungen pro Hektar zu rechnen. Um trotzdem Werte für die Versuchsjahre vor 2000 zu erhalten, werden Erntemengen für Weizen und Baumwolle der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) für gesamt Usbekistan herangezogen. Für die Jahre 2055 und 2064 wird eine weiterführende Trend der Erntefunktion angenommen (Tab. 4).

Die Erntemengen für die Versuchsjahre sowie für die Hochrechnungsjahre 2020 und 2050 werden nun ins Verhältnis gesetzt zu den Erntemengen für das Jahr der reporting period 2010 für die gesamte Provinz Ferghana und dann auf die Einzelflächen der WUA anteilig umgerechnet.

Tabelle 5. Durchschnittliche Erträge in $t \cdot ha^{-1}$, berechnet durch die Funktion der Ferghana Provinz-Erntedaten und die Erträge der FAO (Tab. 4) die verhältnismäßig auf die WUA-Einzelflächen in den Versuchsjahren umgerechnet werden [eigene Darstellung].

Jahr	1962	1987	1991	2010	2018	2020	2022	2028	2050	2055	2064	2010 Provinz
Verhältnis Baumwolle	0,5	0,8	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	2,8
Verhältnis Weizen	0,1	0,2	0,2	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	2,5	2,7	3,0	5,7
Ertrag Baumwolle	2,0	2,5	2,9	3,2	2,7	2,8	3,3	2,5	2,1	2,0	1,8	
Ertrag Weizen	0,4	1,0	1,1	4,7	6,8	7,3	7,6	8,8	13,1	14,4	15,8	

Die Erntedaten werden dann in ihren Anteilen mit den Messwerten aus dem Jahr 2010 für die einzelnen Felder der WUA verrechnet. So werden Erntemengen pro Feld erhalten und eine Verallgemeinerung der Erntemenge für die gesamte WUA vermieden. Durch niedrigere Durchschnittserträge für Weizen in der WUA im Verhältnis zur Provinz im Jahr 2010 kommt

es zu geringeren Ernten für die WUA in den Versuchsjahren (Tab.5), als Erntemengen durch die Funktion ermittelt wurden (Tab.4). Durch höhere Baumwollernten in der WUA im Verhältnis zur Provinz im Jahr 2010 kommt es hingegen zu erhöhten Erntemengen für die Versuchsjahre.

Die Hochrechnungen der Erträge für die Versuchsjahre werden ins Verhältnis zu den Provinzdurchschnitten von 2010 gesetzt und nicht ins Verhältnis zu den gemessenen Erntemengen für die WUA von 2010, weil sich Größe und auch Lage der beiden Vergleichsflächen (WUA/Provinz) unterscheiden. Durch eine prozentuale Hochrechnung werden lokale Unterschiede vernachlässigt. In der Crop Production-Datei wird das Jahr und die Erntemenge in $t \cdot ha^{-1}$, wie oben beschrieben, angepasst. Die betrachtete Fläche wird beibehalten, da die gesamt bewässerte Fläche im BAU-Szenario für zukünftige Jahre gleich bleibt.

An den Input-Daten (DEM, Bodenkarte, Bewässerungseffizienz) findet keine Veränderung für die Simulationen mit dem BAU-Szenario statt, da die Referenzflächen sich nicht ändern. Es handelt sich immer um dieselbe zu betrachtende Fläche der WUA Akbarabad. Die gewählte Bewässerungsmethode mit dem Wert 1 simuliert die Oberflächenbewässerung durch Furchenbewässerung, die Bewässerungseffizienz nimmt einen durchschnittlichen Wert von 0,5 (50%) an [Brouwer *et al.*, 1989]. Die Bewässerungsqualität gibt den Salzgehalt des Bewässerungswassers an und wird mit $2,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ angegeben [Sachbericht, 2013]. Der Salzgehalt des Bewässerungswassers ändert sich über die Vegetationszeit nicht nennenswert. Das Wasser wird aus dem South Fergana Canal zur Verfügung gestellt. Die großen Hauptkanäle sind gegen Versickerungen und Wassereintrag gesichert, sodass der Eintrag von belastetem Wasser gering ist [Abdullaev *et al.*, 2007].

2.2.2 FSD- und ESA-Szenario

Als Reaktion auf die klimatischen Veränderungen hin zu weniger Niederschlag und höheren Jahresdurchschnittstemperaturen wird eine effizientere Nutzung des Bewässerungswassers angestrebt. Hierzu wurden im Zuge der Datensammlung des usbekischen Arbeitsministeriums ebenfalls Hochrechnungen angefertigt, welche sich mit der verhältnismäßigen Veränderung der der Bewässerungstechnik befasst. Die Flächenanteile für unterschiedliche Systeme zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen wurden entsprechend der Szenariodefinition für die verschiedenen Anbaukulturen neu berechnet.

Für die Berechnung der Wasserfußabdrücke unter verbesserten Bewässerungsbedingungen wird in den SPARE:WATER-Dateien die Bewässerungseffizienz sowie die Methode verändert. Die Bewässerungseffizienz (50 %) und die Methode (1) Furchenbewässerung wird für

Teilflächen beibehalten. Im FSD und ESA-Szenario werden Anteile jedoch auch durch Sprinkler- (Weizen) und Tröpfchenbewässerung (Baumwolle) bedient. Die SPARE:WATER-Berechnung wird daher mit einer Bewässerungseffizienz von 70 % für die Methode Sprinkler (2) und mit einer Effizienz von 85 % für die Tröpfchenbewässerungsmethode (3) durchgeführt [Brouwer *et al.*, 1989].

Unabhängig von den prozentualen Angaben berechnet SPARE:WATER für jeden Punkt im Koordinatensystem den Wasserfußabdruck für eine hundertprozentige Bewässerung durch eines der Systeme. Um die Summe aus den drei verwendeten Bewässerungssystemen auf die gesamte Fläche der WUA zu erhalten, werden die Wasserfußabdrücke prozentual mit den Flächenanteilen der Kulturen verrechnet. Hierbei wird nicht zwischen den Feldern verschiedener Landwirte unterschieden. Jedes Feld wird in der Theorie mit den gleichen Anteilen Furchen- und Tröpfchenbewässerung beziehungsweise, wenn es sich um Weizen handelt, Sprinklerbewässerung bewirtschaftet. Diese Methode kommt der Realität am nächsten. Wenn neue Bewässerungssysteme eingeführt würden, sollten sich diese nicht auf einige wenige Landwirte der WUA beschränken, sondern anteilig für alle zugänglich gemacht werden [Ul Hassan, 2004]. Desweiteren befinden sich die meisten Baumwoll- und Weizenfelder im Norden der WUA in unmittelbarer Nähe zueinander und weisen daher wenig standortspezifische Unterschiede auf, welche eine unterschiedliche Bewässerung beeinflussen könnten. Die Bodenarten sind in der gesamten WUA sehr ähnlich und die Wetterdaten sind für die gesamte WUA einheitlich, da sie durch eine einzige Wetterstation repräsentiert werden (Fergana City). Eine detaillierte Unterscheidung für die Bewässerung der Felder zu treffen ist aufgrund der grobskaligen Prognosen in den Szenarien nicht haltbar. In der folgenden Tabelle sind die Bewässerungsanteile dargestellt.

Tabelle 6. Prozentuale Verteilung der Bewässerungsmethoden auf den Anbauflächen für das FSD- und das ESA-Szenario [Sachbericht, 2013].

Bewässerungstechnik	FSD [%]	ESA [%]
Baumwolle Furchen	80-95	65-85
Baumwolle Tröpfchen	5-20	15-35
Weizen Furchen	60-80	80-85
Weizen Sprinkler	20-40	15-20

Berechnet werden die Wasserfußabdrücke für die minimal und die maximal angegebenen Anteile der effizienteren Bewässerungssysteme. Zum Beispiel: für Baumwolle im FSD-Szenario wird der Wasserfußabdruck für eine Bewässerung der gesamten Anbaufläche

mit 5 % Tröpfchenbewässerung und 95 % Furchenbewässerung sowie für eine Bewässerung mit 20 % Tröpfchenbewässerung und 80 % Furchenbewässerung durchgeführt (vgl. Tab. 6). Um den absoluten Wasserbedarf für eine geänderte Anbaufläche der WUA angeben zu können, muss die gewählte Mischbewässerung auf die neue Größe umgerechnet werden. Fällt Ackerfläche weg, wird sie zum besseren Vergleich nicht durch andere Kulturen ersetzt, sondern entfällt aus der Betrachtung. Die Ackerfläche der Provinz Ferghana des BAU-Szenarios im Jahr 2020 und 2050 wird ins Verhältnis gesetzt zu den Flächen der Provinz für das FSD- und ESA-Szenario in den Jahren 2020 und 2050 (Tab. 7). Die prozentualen Flächenänderungen werden dann auf die WUA-Flächen aus dem Jahr 2010 umgerechnet. Die für das Jahr 2050 veränderte Anbaufläche (Anhang Tab. 20) aus der Prognose wird für die Berechnung nicht berücksichtigt, da im BAU-Szenario von einer gleichbleibenden gesamten bewässerten Anbaufläche ausgegangen wird.

Tabelle 7. Bewässerte Anbaufläche in Tausend ha für die verschiedenen Szenarien für die Provinz Ferghana [Sachbericht, 2013] sowie Verhältnisse des FSD- und ESA-Szenarios zum BAU-Szenario.

		BAU	FSD	FSD/BAU [%]	ESA	ESA/BAU [%]
Baumwolle	2020	84,1	86,1	102,38	86,9	103,33
	2050	84,1	59,3	70,51	67,9	80,74
Weizen	2020	138,2	86,9	62,88	79,0	57,16
	2050	138,2	71,1	51,45	39,5	28,58

Für die Versuchsjahre zwischen den Hochrechnungsjahren 2020 und 2050, werden alle Jahre mit dem Verhältnis von 2020 berechnet, ab 2050 mit der Relation für 2050 verrechnet. Dies beruht auf dem Mangel an Hochrechnungsjahren, die durch Einpflegen in eine Funktion genauere Veränderungsverhältnisse für die Versuchsjahre angeben könnten. Die Aufteilung bei 2050 erfolgt durch die relative Nähe der Versuchsjahre bis 2028 zum Hochrechnungsjahr 2020.

Zur Veranschaulichung der Effizienz welche nur der Bewässerungstechnik zugeschrieben werden kann, wird zusätzlich der Wasserbedarf für das BAU-Szenario mit den beschriebenen 3 Bewässerungstechniken angegeben. Diese Variante zeigt, was unter aktuellen Anbaubedingungen mit verbesserten Bewässerungssystemen erreicht werden kann.

2.2.3 Landnutzungswechsel

Die Berechnung des Wasserfußabdrucks für den Anbau von anderen Kulturen als Baumwolle und Weizen soll zeigen, wie sich der Wasserbedarf verändert, wenn eine Änderung in der Fruchtfolge erfolgt. Das ESA-Szenario sagt eine Änderung hinsichtlich eines vermehrten Anbaus von Cash Crops voraus, eine Produktion von exportierbarem Obst und Gemüse ist nahe-

liegend. Um zu zeigen inwiefern sich der Wasserbedarf für die WUA ändert, werden die Weizen- und Baumwollflächen in SPARE:WATER mit den Feldfrüchten Wassermelone, Melone, Sorghum, Mais und Trauben bepflanzt. Es lässt sich eine Aussage zum jeweiligen Wasserbedarf einzelner Feldfrüchte sowie zu einem durchschnittlichen Verbrauch bei einem Mischanbau treffen. Mit diesem Landnutzungsszenario wird ein Durchlauf mit Furchenbewässerung und ein Durchlauf mit Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung gemacht.

2.3 Datengenauigkeit

Die Ergebnisse der SPARE:WATER-Berechnungen sind unter dem Gesichtspunkt der hohen Ungenauigkeit der Klimamodellierung des REMO-Modells zu betrachten (Temperatur- und Niederschlagsdaten). Klimamodelle scheitern für Zentralasien häufig bei der Reproduktion der lokal typischen Wetterphänomene [*Mannig et al.*, 2013]. Deshalb stellen die ausgewählten Jahre nur eine von zahlreichen Möglichkeiten der saisonalen Verteilung von Temperatur und Niederschlag dar. Desweiteren muss beachtet werden, dass als Datengrundlage für die Erträge nur Messwerte für das Jahr 2010 genutzt werden. Da einige der Eingangsdaten Schätzungen aus Durchschnittswerten und Verallgemeinerungen darstellen, können die Ergebnisse dieser Arbeit als Analyse einer potentiellen Entwicklung gesehen werden und zeigen Trends für bestimmte Ausgangsbedingungen auf. Die Bewässerungseffizienz beispielsweise, wird in der Realität von Fläche zu Fläche und je nach Management stark variieren. Die Szenarien können nur relativ zueinander betrachtet werden, während die absoluten Zahlen zu Wasserfußabdruck und Wasserbedarf nicht durch Messergebnisse validiert werden können.

3 Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt die SPARE:WATER-Berechnungen des Wasserfußabdrucks für die einzelnen Felder der WUA für das Referenzjahr 2010 (Messwerte). Die Wasserfußabdrücke für Baumwolle reichen auf den Flächen von $3.958 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ bis $7.491 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. In Anbetracht der Standardabweichung zeigt sich, dass für den Baumwollanbau 7 der 35 Felder nicht innerhalb des Bereichs Mittelwert \pm Standardabweichung liegen (4.753 ± 855). Die Wasserfußabdrücke variieren stark.



Abbildung 5. WF_{crop} für Baumwolle (links) und Weizen (rechts) für das Referenzjahr 2010, Klasseneinteilung „Natural Breaks“ in ArcGis, fünf Klassen [eigene Darstellung].

Für Weizen reichen die Wasserfußabdrücke von 1.483 m^3 bis 1.860 m^3 . Die Spannweite der berechneten Werte ist wesentlich geringer als für Baumwolle. Bei Betrachtung der Standardabweichung zeigt sich jedoch, dass die Wasserfußabdrücke für Weizen stärker vom Mittelwert abweichen als die für Baumwolle, ein höhere Streuung aufweisen. Sieben Felder weisen Wasserfußabdrücke unterhalb, sieben weitere oberhalb des Mittelwert \pm Standardabweichung-Bereichs auf (1.582 ± 83). Absolut betrachtet, ist die Abweichung jedoch wesentlich geringer als für Baumwolle. Es fällt auf, dass die meisten Flächen mit einer hohen Wassereffizienz für Baumwolle auch eine hohe Wassereffizienz für Weizen aufweisen. Dies spricht für Unterschiede in der Bewirtschaftung und der Bewässerung.

Wird die Erntemenge pro Hektar betrachtet, zeigt sich, dass mit zunehmendem Ertrag die Wassereffizienz (WF_{crop} [m³·t⁻¹]) steigt (Abb. 6).



Abbildung 6. Erträge in $t*ha^{-1}$ für Baumwolle (links) und Weizen (rechts) für das Referenzjahr 2010, Klasseneinteilung „Natural Breaks“ in ArcGis , fünf Klassen [eigene Darstellung].

Abbildung 7 zeigt durch Einbeziehung der Flächengröße auf den WF_{crop} die Projektion der blauen, grünen und gesamten Wasserfußabdrücke in Kubikmeter für die betrachteten Einzelflächen der WUA Akbarabad. Alle Flächen weisen Baumwoll- und Weizenanbau auf (Anhang Tab. 19).

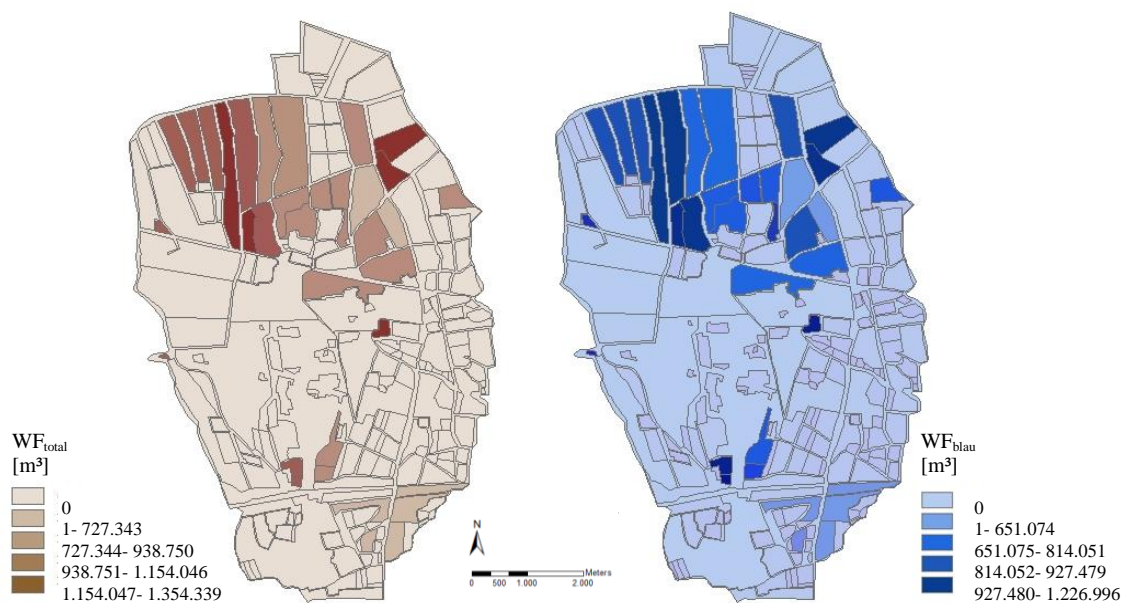


Abbildung 7. Abbildungsunterschrift auf der folgenden Seite.

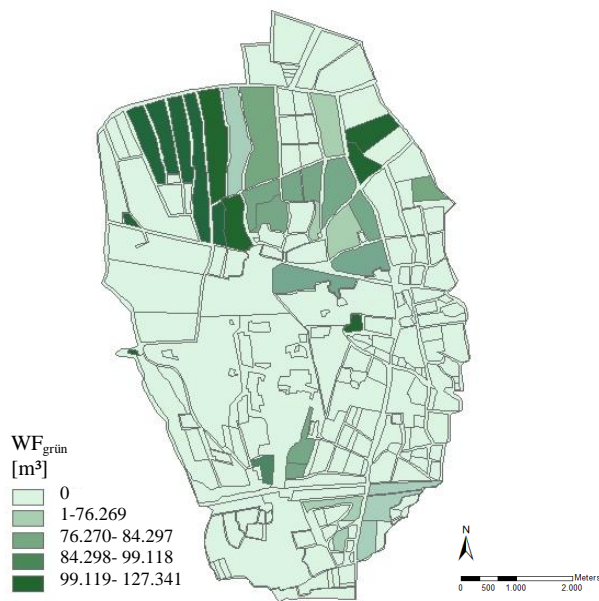


Abbildung 7. WF in m³ für die Einzelflächen der WUA unter Weizen- und Baumwollanbau für die Messwerte aus dem Jahr 2010. Klasseneinteilung in ArcGIS (2013) über „Natural Breaks“, fünf Klassen [eigene Darstellung].

Es zeigt sich, dass die Flächen im Nord-Westen, mit Ausnahme der nordöstlich gelegenen L-förmigen Anbaufläche, den größten Wasserverbrauch aufweisen. Auch wird deutlich, dass Flächen mit geringen Baumwoll- und Weizenerträgen sowie einhergehenden hohen WF_{crop} auf die Fläche bezogen einen höheren Wasserbedarf aufweisen als wassereffiziente Flächen. Die Standorteigenschaften innerhalb der WUA sind für alle Felder sehr ähnlich (vgl. Kap. 1.3) Da die Wasserfußabdrücke in m³ pro Tonne angegeben werden und alle Ernteprosenosen auf Hochrechnungen der Erträge aus dem Jahr 2010 beruhen (Abb. 6), ändert sich die verhältnismäßige Verteilung der Wasserfußabdrücke der einzelnen Felder zueinander über die Jahre nicht. Die Karten zeigen daher das Jahr 2010 als beispielhafte Darstellungen für alle Versuchsjahre. Die WUA wird fortan im Ganzen betrachtet.

3.1 Veränderung des Wasserfußabdrucks unter Klimawandelbedingungen

Um die Änderung des Wasserfußabdrucks in Bezug auf Klimawandelbedingungen zu untersuchen, wurde ein SPARE:WATER-Durchlauf mit allen ausgewählten Versuchsjahren sowie den Prognosejahren (2020, 2050) durchgeführt. Den Hochrechnungsdaten für Niederschlag und Temperatur ist zu entnehmen, dass die maximalen sowie minimalen Temperaturen zunehmen (im Durchschnitt um $0,037 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ und $0,034 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$) und die Niederschlagssummen pro Jahr weniger ($-0,33 \text{ mm}$) werden (Abb. 2). Dies lässt einen Anstieg der Evapotranspiration, und einen damit einhergehenden Anstieg des Bewässerungsbedarfs erwarten. Eine effizientere Wassernutzung wird auch in Zukunft von Bedeutung sein. Um einen Vergleich für Normal- und Trockenjahre zu erhalten, wurden diese gesondert berechnet.

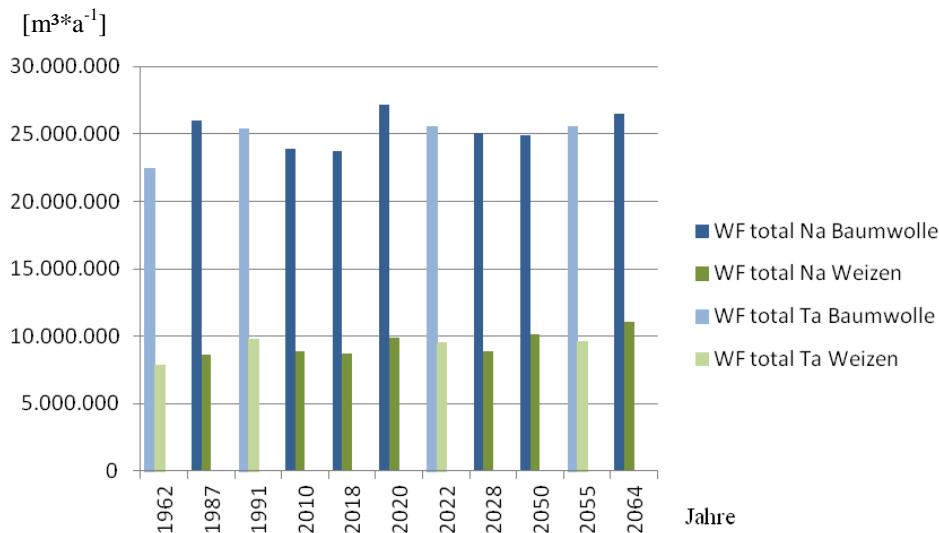


Abbildung 8. Gesamt-Wasserfußabdruck der Normal- und Trockenjahre der WUA-Anbaufläche in $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ für Baumwolle (blau) und Weizen (grün) für die Versuchsjahre. Die Trockenjahre sind für Baumwolle in hellblau, für Weizen in hellgrün dargestellt [eigene Darstellung].

Abbildung 8 zeigt den gesamten Wasserfußabdruck der WUA für Weizen und Baumwolle in Kubikmetern pro Jahr. Über den Betrachtungszeitraum steigt der Wasserfußabdruck bei gleichbleibender Anbaufläche für Trocken- und Normaljahre an. Für Baumwolle beträgt er zwischen 22,5 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (1962) und 27,2 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (2020). Die Normaljahre (aufsteigend) 1987 (26,0 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$), 2064 und 2022 weisen größere Wasserfußabdrücke auf als alle Trockenjahre. Die Normaljahre 2018, 2010, 2050 und 2028 (25,1 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$) hingegen einen geringeren Wasserfußabdruck als die Mehrheit der Trockenjahre. Das Trockenjahr 1962 fällt mit dem kleinsten Wasserfußabdruck auf.

Für den gesamten Wasserfußabdruck für Weizen schwanken die Werte zwischen 7,8 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (1962) und 11,1 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (2064). Es zeigt sich für die Trocken- und Normaljahre ein ähnliches Bild wie für Baumwolle. Die Normaljahre 2050 (9,6 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$), 2020 und 2064 weisen einen größeren Wasserfußabdruck auf als alle Trockenjahre. Die restlichen Normaljahre haben hingegen geringere Wasserfußabdrücke als die Trockenjahre 2022 (9,6 Mio. $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$), 2055 und 1991. Auch für Weizen hat das Trockenjahr 1962 den geringsten Wasserfußabdruck.

Auffällig ist, dass die Trockenjahre weder für Baumwolle noch für Weizen, die Jahre mit dem größten Wasserfußabdruck sind. Ein allgemein steigender Trend ist zu erkennen, für Baumwolle um durchschnittlich $190.258 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ und für Weizen um durchschnittlich $202.344 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$. Dies entspricht einem jährlichen Anstieg um 0,79 % für Baumwolle und einem Anstieg von 2,49 % für Weizen. Die Evapotranspiration steigt in Allgemeinen mit zunehmender Temperatur [Allen et al., 1998], daher kommt es zukünftig zu einem höheren

Pflanzenwasserbedarf und zu steigenden Wasserfußabdrücken. Insgesamt wird deutlich, dass Unterschiede zwischen einem Trocken und einem Feuchtjahr nicht zu erkennen sind.

Tabelle 8. Aktuelle Evapotranspiration (ET_a) und reale Bewässerung (IRR_a) in mm pro Vegetationsperiode sowie der gesamte Wasserfußabdruck (WF_{total}) in m^3 für die Versuchsjahre. Normaljahre (Na) und Trockenjahre (Ta) sind gekennzeichnet. In blau sind die Prognosejahre der Szenarien dargestellt, die durch ihre Niederschlagsmenge als Normaljahr gewertet werden. Sortiert nach aufsteigender ET_a [eigene Darstellung].

Baumwolle	ET_a	IRR_a	WF_{total}	Weizen	ET_a	IRR_a	WF_{total}		
Ta	1962	734	1.424	22.490.074	Ta	1962	351	583	7.840.589
Na	2010	788	1.493	23.879.687	Na	1987	387	533	8.607.130
Na	2018	788	1.475	23.714.506	Na	2018	400	569	8.695.203
Na	2050	819	1.559	24.870.524	Na	2028	400	611	8.856.285
Ta	2022	820	1.604	25.566.449	Na	2010	401	533	8.851.644
Na	2028	823	1.578	25.077.169	Ta	1991	422	733	9.780.903
Ta	1991	837	1.595	25.429.259	Ta	2022	426	733	9.576.000
Ta	2055	837	1.611	25.557.483	Na	2050	428	705	10.130.888
Na	1987	855	1.628	25.986.716	Ta	2055	436	733	9.671.626
Na	2064	870	1.670	26.505.002	Na	2020	437	629	9.850.139
Na	2020	893	1.707	27.158.724	Na	2064	494	785	11.052.553
Ø Ta	807	1.541	24.760.816	Ø Ta	409	696	9.217.279		
Ø Na	834	1.604	25.320.848	Ø Na	421	625	9.302.793		
Ø Na u. Ta	824	1.597	25.131.190	Ø Na u. Ta	417	624	9.434.835		

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der berechneten aktuellen Evapotranspiration, des Bewässerungsbedarfs und des Wasserfußabdruck für die Trocken- und Normaljahre und beide Kulturen. Durch die SPARE:WATER-Simulationen wird deutlich, dass in Trockenjahren die Evapotranspiration im Durchschnitt etwas geringer ist als in Normaljahren. Für Baumwolle fallen die Bewässerungsmenge und der Wasserfußabdruck für die Trockenjahre erwartungsgemäß im Verhältnis zu den Normaljahren geringer aus. Der Wasserfußabdruck des Baumwollanbaus ist positiv durch die steigende Evapotranspiration bedingt. Es fällt auf, dass die Bewässerung mit steigender Evapotranspiration zunimmt, jedoch ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen, sondern ein Trend. Der durchschnittliche Wasserfußabdruck für die Normaljahre liegt bei Weizen ebenfalls höher als der Wasserfußabdruck für Trockenjahre. Allerdings muss Weizen in den Trockenjahren im Durchschnitt mehr bewässert werden als in den Normaljahren (+70 mm) (Abb. 10). Sind die Niederschläge geringer, wird durch Bewässerung ausgeglichen.

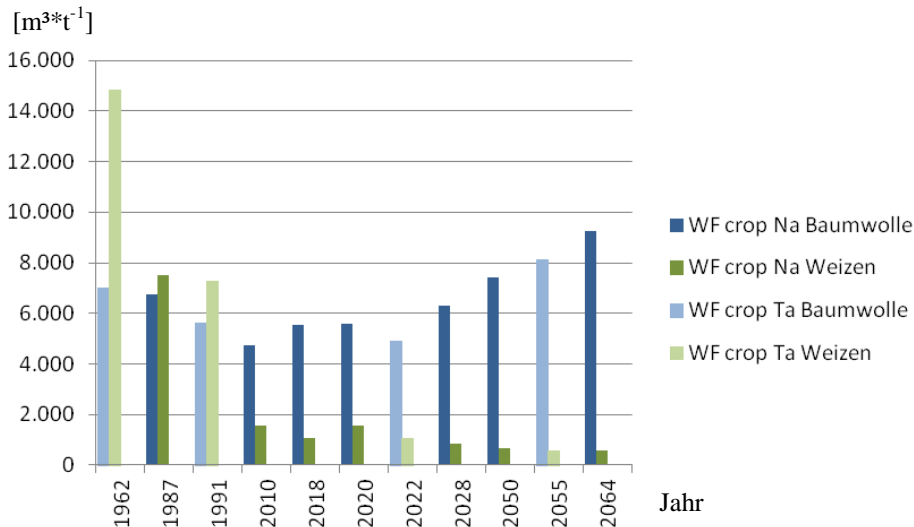


Abbildung 9. Durchschnittlicher Wasserfußabdruck (WFcrop) für Baumwolle in blau und Weizen in grün für die Versuchsjahre im BAU-Szenario in $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Die Trockenjahre sind für Baumwolle in hellblau, für Weizen in hellgrün dargestellt [eigene Darstellung].

Abbildung 9 zeigt eine Übersicht des berechneten durchschnittlichen WF_{crop} der Flächen für die Einzelkultur und jedes berechnete Jahr. Die Betrachtung des WF_{crop} zeigt die Effizienz des eingesetzten Bewässerungswassers. Für Weizen sinkt der Wasserbedarf von $14.851 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ im Jahr 1962 auf $593 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ in 2064. Da der Gesamtwasserfußabdruck in dieser Zeitspanne ansteigt, ist die verbesserte Effizienz allein auf die prognostizierten steigenden Erträge zurückzuführen.

Die Wassereffizienz für Baumwolle schwank von 1962 zwischen $7.010 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und $4.905 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ im Jahr 2022. Bis 2064 ($9.261 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$) ist dann ein Anstieg im Wasserfußabdrucktrend zu erkennen. Es kommt zu einer Abnahme der Wassereffizienz in der Zukunft aufgrund eines steigenden Pflanzenwasserbedarfs in Kombination mit sinkenden Erntemengen.

Abbildung 10 zeigt den gesamten grünen Wasserfußabdruck von Baumwolle und Weizen zusammen mit dem verfügbaren Niederschlag des jeweiligen Jahres. Der grüne Wasserfußabdruck für Weizen bildet die Verfügbarkeit an Niederschlägen ab. Fällt mehr Niederschlag in einem Jahr, erhöht sich der grüne Wasserfußabdruck.

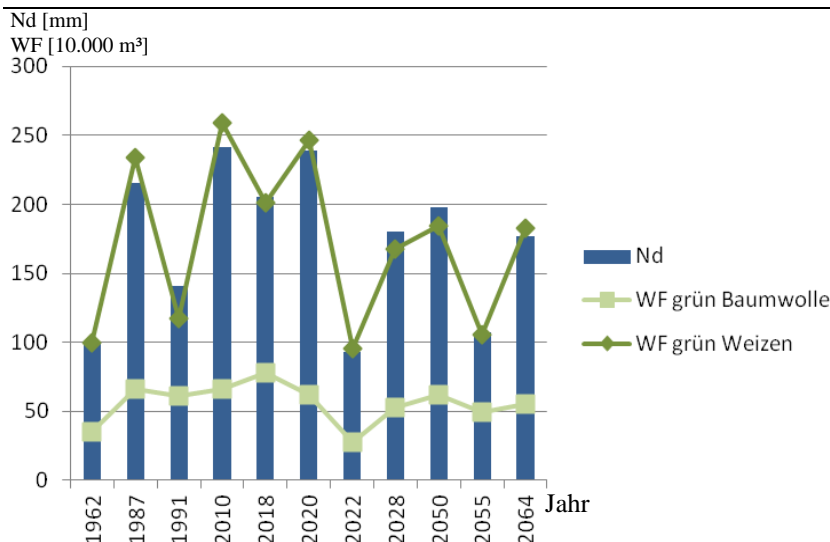


Abbildung 10. Verhältnis grüner WF_{total} in 10.000 m³ zu Niederschlag (Nd) [mm] für die gesamte Weizen- und Baumwollanbaufläche der WUA im jeweiligen Versuchsjahr [eigene Darstellung].

Der grüne Wasserfußabdruck für Baumwolle orientiert sich ebenfalls an den Niederschlagsmengen in dem jeweiligen Jahr (Abb. 10) Das einzige Jahr, das ein anderes Bild zeigt, ist 2018. Obwohl die Niederschlagsmenge mit 205 mm im Betrachtungszeitraum nicht die größte innerhalb der Versuchsjahre ist, erreicht der grüne Wasserfußabdruck für Baumwolle in diesem Jahr seinen höchsten Stand von 779.912 m³.

Tabelle 9 zeigt die Verfügbarkeit von Niederschlag für Baumwolle und Weizen speziell in der Vegetationsphase. Eine nähere Betrachtung der jährlichen Verteilung der Niederschläge zeigt, dass die Niederschlagsmenge in der Vegetationsperiode für Baumwolle vom 26.04 bis zum 27.10 im Jahr 2018, mit 49 mm im Verhältnis zu den anderen Versuchsjahren am höchsten ist. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge für die Vegetationsperiode liegt bei 33 mm.

Tabelle 9. Niederschlag (Nd) pro Vegetationsperiode (Veg) der Versuchsjahre und Nd hochgerechnet auf die Anbaufläche für Baumwolle (BW) von 1.575,3 ha und Weizen (WZ) von 1.174,6 ha, grüne Wasserfußabdrücke werden im Verhältnis zu absoluten Niederschlagsmengen [%] angegeben [eigene Darstellung].

Jahr	Baumwolle (BW)				Weizen (WZ)			
	Nd Veg [mm]	Nd BW-Anbaufläche [mm*a ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *a ⁻¹]	%	Nd Veg [mm]	Nd WZ-Anbaufläche [mm*a ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *a ⁻¹]	%
1962	21,7	341.319	352.386	103	84,7	995.328	998.457	100
1987	35,1	552.789	658.696	119	199,0	2.337.389	2.340.441	100
1991	40,1	631.774	614.905	97	98,8	1.160.957	1.171.435	101
2010	35,5	559.232	659.314	118	219,8	2.581.771	2.589.521	100
2018	48,7	766.615	779.912	102	170,5	2.002.321	2.010.979	100
2020	34,7	547.343	621.671	114	208,6	2.450.342	2.462.438	100
2022	15,8	248.992	280.134	113	80,8	949.128	957.008	101
2028	33,1	520.676	532.196	102	141,7	1.664.881	1.676.174	101
2050	37,3	587.702	617.257	105	155,9	1.831.292	1.845.062	101
2055	29,7	467.607	490.975	105	89,4	1.050.010	1.053.232	100
2064	34,0	535.893	550.421	103	154,8	1.818.781	1.826.832	100
Mittelwerte	33,2	523.631	559.806	107	145,8	1.712.927	1.721.053	100

Weizen weist im Vergleich zu Baumwolle (180 Tage, April bis Oktober) die längere Wachstumsphase auf. Es wird in den Berechnungen mit SPARE:WATER am 15.10 gesät und am 01.06 geerntet von einer Vegetationsperiode von 260 Tagen ausgegangen. Den Pflanzen steht daher eine größere Menge Niederschlag zur Verfügung, weshalb der grüne Wasserfußabdruck für Weizen höher ausfällt. Außerdem fällt in Zentralasien der Hauptteil des Niederschlages im Winter.

Beide Kulturarten nutzen den in ihrer Vegetationsperiode fallenden Niederschlag komplett. Eine Ausschöpfung von über 100 % ist auf Rundungen der Temperatur- und Wasserfußabdruckdaten zurückzuführen.

Die kulturfruchtspezifische Evapotranspiration (Gl. 2) ist für Weizen (417 mm) im Durchschnitt geringer als für Baumwolle (824 mm). Baumwolle wird öfter bewässert, je nach Typ drei bis neun Mal innerhalb der Vegetationsperiode. Im Verhältnis kommt Weizen mit ein bis drei Bewässerungsereignissen aus [Sachbericht, 2013]. Dies führt zu einem höheren Wasserbedarf bei Baumwolle als bei Weizen.

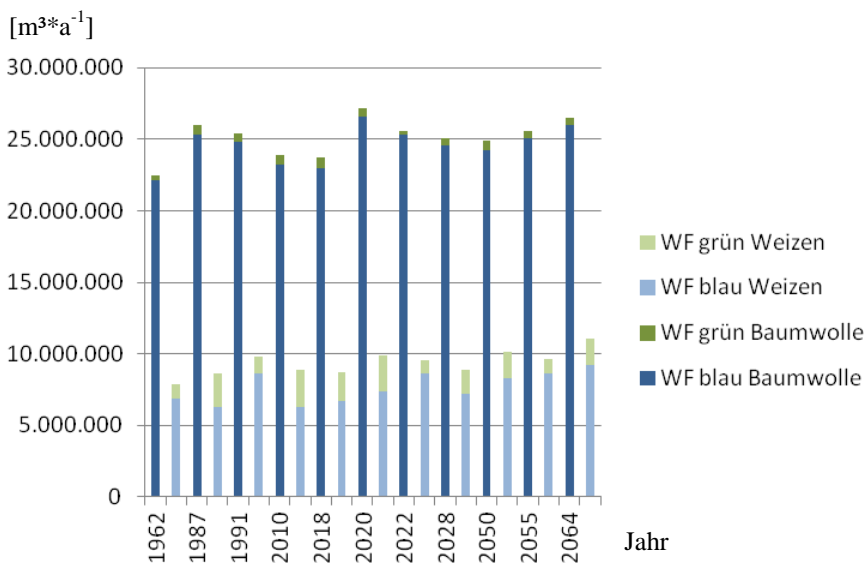


Abbildung 11. WF_{total} für die gesamte Anbaufläche der WUA Akbarabad, anteilig durch den grünen und den blauen Wasserfußabdruck für jedes Versuchsjahr in m^3 dargestellt. In dunkel die Wasserfußabdrücke für Baumwolle, in hell die Wasserfußabdrücke für Weizen [eigene Darstellung].

Abbildung 11 zeigt den gesamten blauen und grünen Wasserfußabdruck für die WUA Akbarabad für Weizen und Baumwolle. Für Weizen ist zu erkennen, dass der blaue Wasserfußabdruck sich im Verhältnis am grünen Wasserfußabdruck orientiert. Fällt weniger Niederschlag in einem Jahr, steigt der blaue Wasserfußabdruck relativ an. 2050 ist mit 314 mm Niederschlag ein relativ feuchtes Jahr, hier wird weniger Bewässerung benötigt, der blaue Wasserfußabdruck fällt folglich geringer aus. Das Jahr 2020 bildet eine Ausnahme, da

in diesem Jahr die Evapotranspiration sehr hoch ist (Tab. 8) und neben einer relativ hohen Niederschlagssumme der blaue Wasserfußabdruck relativ steigt.

Für den Baumwollanbau ist der Einfluss des grünen Wasserfußabdrucks wesentlich geringer als für Weizen. Er schwankt zwischen $779.912 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (2018) und $280.133 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (2022). Für Weizen liegt der Wert des grünen Wasserfußabdrucks zwischen $2.589.520 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (2010) und $957.007 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (2022). Die Geringere Niederschläge machen sich für Weizen absolut stärker bemerkbar.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass der gesamte Wasserfußabdruck für die WUA für das BAU-Szenario und die Niederschlags- und Temperaturprognosen einen zunehmenden Trend zeigt. Für Baumwolle mit einem Anstieg von 0,8 %, 190.258 m^3 pro Jahr, für Weizen mit 2,5 %, 202.344 m^3 pro Jahr. Aufgrund des durchschnittlich abnehmenden Niederschlags pro Jahr und dem dadurch geringeren Anteil des grünen Wasserfußabdrucks wird der blaue Wasserfußabdruck zum Ausgleich ansteigen. Für Weizen ergibt sich eine jährliche Steigung des blauen Wasserfußabdrucks von 219.320 m^3 , für Baumwolle ein Anstieg von 194.140 m^3 . Der blaue Wasserfußabdruck steigt stärker an als der gesamte Wasserfußabdruck und repräsentiert hiermit den sinkenden Anteil des grünen Wasserfußabdrucks. Für die WUA Akbarabad bedeutet dies, dass zukünftig bei gleichbleibenden Anbauverhältnissen eine größere Menge Bewässerungswasser für den Baumwoll- und Weizenanbau von Nöten ist.

Die angenommene starke Erhöhung der Erträge für den Weizenanbau könnte bei reduzierter Anbaufläche aufgrund von frühzeitiger Erntequotenausschöpfung der Wasserbedarf gesenkt werden. Für Baumwolle ist dies durch einen ansteigenden Wasserbedarf pro Tonne nicht möglich. Für diese Kultur kann eine Minderung des Wasserbedarfs nur über eine Reduzierung in der Anbaufläche mit einhergehendem absoluten Ernteverlust erreicht werden.

3.2 Veränderung des Wasserfußabdrucks durch verschiedene Bewässerungstechniken

Die Verwendung effizienterer Bewässerungstechniken, Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung im Vergleich zur aktuell angewandten Furchenbewässerung sorgt für eine Verringerung des Wasserbedarfs für den Ackerbau. Unter der Betrachtung von Baumwolle und Weizen unterscheiden sich das FSD- und das ESA-Szenario in der prozentualen Bewässerungsfläche der Äcker mit neuen Bewässerungstechniken sowie der gesamten Anbaufläche der beiden Kulturen. Beide Szenarien werden mithilfe von SPARE:WATER für zwei verschiedene Anteile der effizienteren Bewässerungstechniken durchgeführt. Der maximale Flächenanteil unter effizienter Bewässerungstechnik der Prognose wird zur Darstellung gewählt (Tab. 6). Die Berechnungen des Wasserfußabdrucks werden für beide Szenarien zuerst für die

Gesamtanbaufläche der WUA im BAU-Szenario des jeweiligen Jahres durchgeführt und in $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ als Referenzberechnung angegeben. Zur Vergleichbarkeit der Bewässerungsmethoden wird von den Erntemengen des BAU-Szenarios ausgegangen. Hieraus ergibt sich der Wasserbedarf für Baumwolle und Weizen unter Mischbewässerung, bei gleichbleibender Anbaufläche. Ein direkter Vergleich der Effizienz durch eine Innovation der Bewässerungssysteme ist möglich.

Die Furchenbewässerung geht in SPARE:WATER mit einer Effizienz von 50 % ein, Sprinklerbewässerung mit 70 % und Tröpfchenbewässerung mit 85 % des Pflanzenwasserbedarfs [Brouwer *et al.*, 1989]. Das Jahr 2018 wird als Ausgangsjahr gewählt. Für Baumwolle wird die Tröpfchenbewässerung für das FSD-Szenario auf 20 % der Flächen angenommen, das ESA-Szenario wird mit 35 % Tröpfchenbewässerung definiert. Auf den restlichen Flächenanteilen findet weiterhin Furchenbewässerung statt.

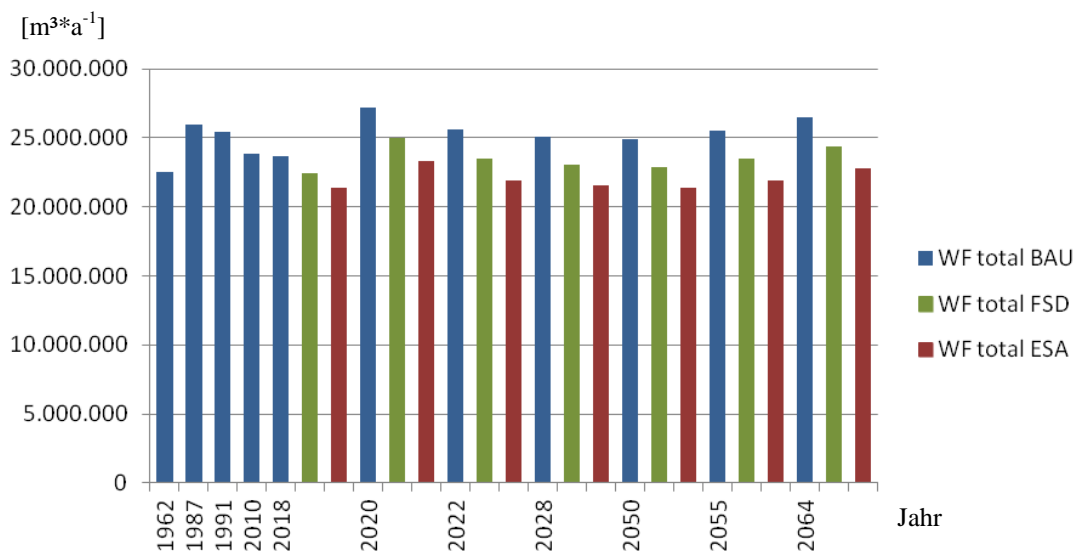


Abbildung 12. Entwicklung des gesamten Wasserfußabdrucks für Baumwolle in $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ für die Versuchsjahre. In blau unter Furchenbewässerung (BAU), in grün unter FSD-Bewässerungsverhältnissen, in rot unter ESA-Bewässerungsverhältnissen bei gleichbleibender Anbaufläche [eigene Darstellung].

Abbildung 12 zeigt den berechneten Wasserfußabdruck unter Furchenbewässerung und Tröpfchenbewässerung definiert nach den Szenarien ESA und FSD im Vergleich. Bei gleichbleibender Anbaufläche nimmt der Wasserbedarf für Baumwolle mit zunehmendem Anteil an Tröpfchenbewässerung ab. Der gesamte Wasserfußabdruck sinkt von durchschnittlichen $25.492.837 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ unter reiner Furchenbewässerung (ab 2018) auf $23.521.583 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ im FSD-Szenario und $22.043.143 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ im ESA-Szenario ab. Die Verringerung des Wasserfußabdruck verläuft für alle Jahre in Verhältnis gleich, und scheint den Flächenanteil der Bewässerungstechnik wenig verändert wiederzugeben.

Tabelle 10 zeigt die Wasserfußabdrücke für die Bewässerungsszenarien bezogen auf die Kultur (WF_{crop}) Baumwolle für den gesamt, grünen und blauen Wasserfußabdruck und für die Fläche der WUA.

Tabelle 10. Durchschnittliche Wasserfußabdrücke für den Baumwollanbau für die verschiedenen Bewässerungsszenarien pro Tonne sowie für die gesamte Anbaufläche der WUA Akbarabad [eigene Darstellung].

Baumwolle-Szenario	WF_{total} [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	WF_{blau} [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	$WF_{\text{grün}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	WF_{total} [$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$]	WF_{blau} [$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$]	$WF_{\text{grün}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$]
BAU	6.739	6.591	147	25.492.837	24.939.580	553.259
FSD	6.215	6.068	147	23.521.583	22.968.326	553.259
ESA	5.823	5.675	147	22.043.143	21.489.886	553.259

Die Wasserfußabdrücke werden ab dem Jahr 2018 berechnet, da der Einsatz von innovativen Techniken ausschließlich für den Einsatz in der Zukunft von Belang ist. Der geringere durchschnittliche Wasserbedarf der Szenarien FSD und ESA ist auf gleichbleibende Ernteannahmen und konstante Anbaufläche bei effizienterer Wassernutzung zurückzuführen. Der grüne Wasserfußabdruck bleibt hierbei bei allen drei Szenarien konstant, da die Niederschlagsnutzung durch Pflanzen von der Bewässerung unbeeinflusst bleibt. Die Einsparungen im Bewässerungswasser schlagen sich ausschließlich im blauen Wasserfußabdruck nieder. Hier kommt es zwischen dem BAU- und dem FSD-Szenario zu einer Einsparung von fast 7,9 %. Im Vergleich des BAU- zum ESA-Szenario kommt es zu einer Senkung des Wasserbedarfs von 13,8 %.

Tabelle 11. Durchschnittliche Wasserfußabdrücke für den Weizenanbau für die verschiedenen Bewässerungsszenarien pro Tonne sowie für die gesamte Anbaufläche der WUA Akbarabad [eigene Darstellung].

Weizen-Szenario	WF_{total} [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	WF_{blau} [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	$WF_{\text{grün}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	WF_{total} [$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$]	WF_{blau} [$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$]	$WF_{\text{grün}}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$]
BAU	914	744	170	9.690.385	8.000.164	1.690.222
FSD	829	659	170	8.776.080	7.085.858	1.690.222
ESA	872	702	170	9.233.232	7.543.011	1.690.222

Tabelle 11 zeigt den durchschnittlichen Wasserfußabdruck für Weizen und die drei Bewässerungsszenarien. In Abbildung 13 ist der Wasserfußabdruck für die Gesamtfläche und die Kultur Weizen grafisch dargestellt. Für den Weizenanbau nimmt der gesamte Wasserfußabdruck für die WUA des BAU-Szenarios von $9.690.385 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ auf $8.776.080 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ im FSD-Szenario, mit 40 % Sprinklerbewässerung, ab. Die Einsparungen liegen gesamt bei 9,4 %, für den blauen Wasserfußabdruck bei 11,5 %. Im Unterschied zur Baumwollproduktion wird für den Weizenanbau die Fläche unter effizienterer Bewässerung im ESA-Szenario wieder zurückgefahren. Die Sprinklerbewässerung sinkt auf 20 %. Dies geht mit einer Abnahme der

Wassereinsparung einher. Der gesamte Wasserfußabdruck steigt für die WUA auf $9.233.232 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, liegt hiermit jedoch immer noch 4,7 % unterhalb des Wasserbedarfs des Referenzszenario (BAU) mit ausschließlich Furchenbewässerung. Für den blauen Wasserfußabdruck ergeben sich Einsparungen von 5,7 %. Das Verhältnis ändert sich im Vergleich zum Baumwollanbau zwischen dem blauen und totalen Wasserfußabdruck, da der grüne Wasserfußabdruck einen größeren Anteil am gesamten Wasserfußabdruck ausmacht, wenn der blaue Wasserfußabdruck durch höhere Bewässerungseffizienz geringer ausfällt.

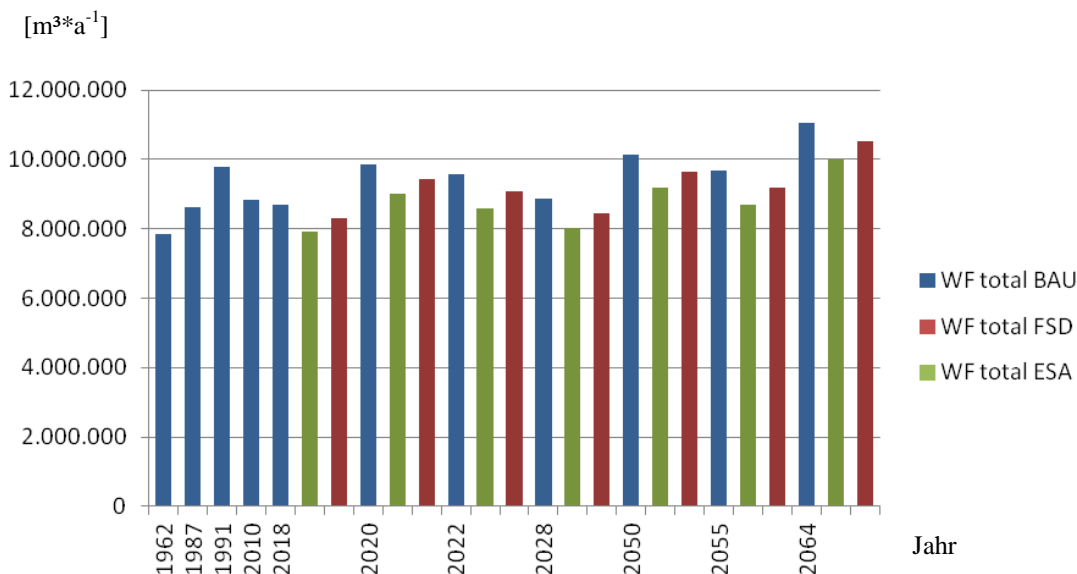


Abbildung 13. Entwicklung des gesamten Wasserfußabdrucks für Weizen in $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ für die Versuchsjahre. In blau unter Furchenbewässerung (BAU), in grün unter FSD-Bewässerungsverhältnissen, in rot unter ESA-Bewässerungsverhältnissen bei gleichbleibender Anbaufläche [eigene Darstellung].

Für Weizen gilt, dass im Vergleich zu Baumwolle größere Flächenanteile auf eine effizientere Bewässerung umgestellt werden müssen, um dieselbe Menge an Wassereinsparungen zu erreichen. Da Weizen eine verhältnismäßig größere Niederschlagsmenge nutzt, ist auch das Einsparpotential durch die Bewässerungseffizienz geringer. Die gezeigten Berechnungen enthalten noch nicht die Änderungen der Gesamtanbauflächen für Baumwolle und Weizen die in den Szenarien enthalten sind (vgl. Kapitel 2.2.2). Im Folgenden werden nun auch diese Prognosen einbezogen.

Durch die Umrechnung der Wasserfußabdrücke auf die im FSD- und ESA-Szenario angegebenen Veränderungen der Flächengrößen (Tab. 7), ändern sich die Wasserfußabdrücke für die gesamte WUA-Fläche. Tabelle 12 zeigt die Anpassungen die Vorgenommen wurden um die Änderungen der Anbauflächen einzubeziehen.

Tabelle 12. Anbauflächenveränderung für die Anbauszenarien FSD und ESA im Vergleich zu BAU für die WUA Akbarabad in ha [eigene Darstellung].

Anbauprodukt	Jahr	BAU	FSD	ESA
Baumwolle	2020	1.575,3	1.612,8	1.627,7
	2050	1.575,3	1.110,8	1.271,9
Weizen	2020	1.174,6	738,6	671,4
	2050	1.174,6	604,3	335,7

Der Anteil der Baumwollflächen steigt bis 2020 leicht an und sinkt dann wieder bis 2050. Die Gesamtanbaufläche für Weizen in der WUA sinkt kontinuierlich. Da sich die Flächenänderungen und daher auch die Ergebnisse für das FSD- und das ESA-Szenario für Baumwolle und Weizen nur relativ unterscheiden, wird der Wasserbedarf für beide Kulturen für das FSD-Szenario dargestellt. Die Tabellen zu den berechneten Wasserfußabdrücken aller Szenarien finden sich im Anhang (Tab. 21). Abbildung 14 a und b zeigt den berechneten Wasserfußabdruck des FSD- Szenario für Weizen und Baumwolle für die Flächenänderung aus Tabelle 12.

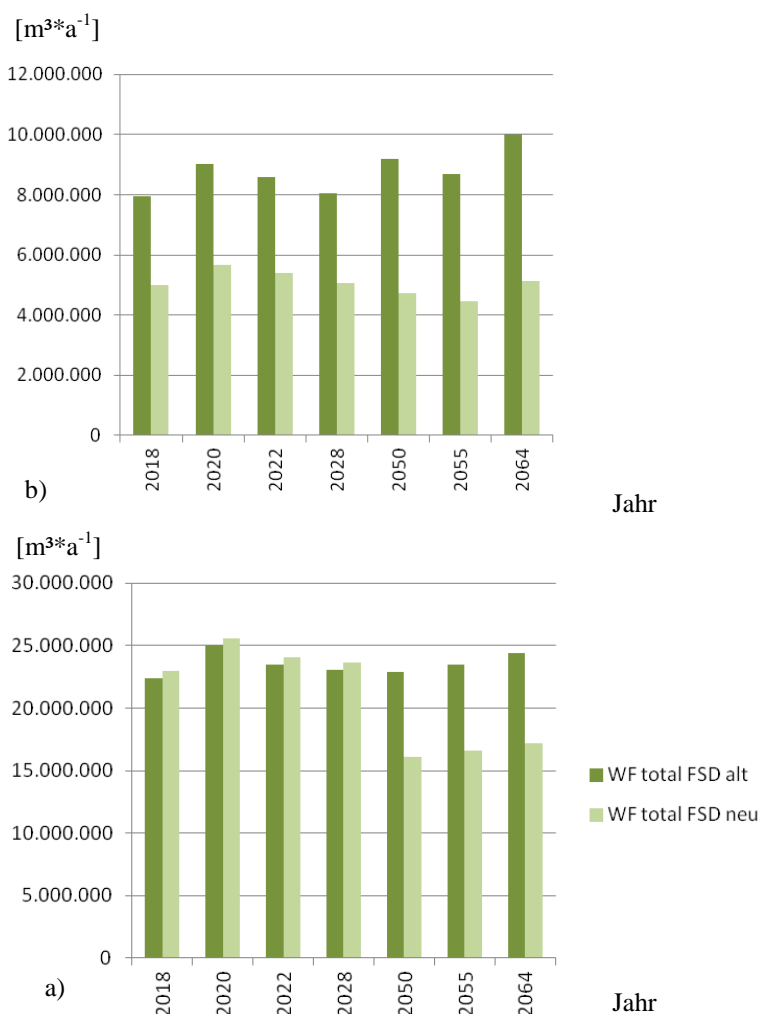


Abbildung 14. Vergleich des gesamten Wasserfußabdrucks für a) Baumwolle und b) Weizen für die Anbaufläche der WUA Akbarabad für die Versuchsjahre FSD-Szenario mit der unveränderten Anbaufläche des BAU-Szenarios in dunkel grün (alt) zu FSD-Szenario mit angepasster Anbaufläche in hell grün (neu) [eigene Darstellung].

Werden die veränderten Anbauflächen wie in Tabelle 12 in die Betrachtung der Szenarien einbezogen, kommt es zu einem Anstieg des Wasserbedarfs für Baumwolle für das FSD-Szenario bis zum Versuchsjahr 2028, da die Anbaufläche im Verhältnis zum BAU-Szenario von 1.575,3 ha auf 1.612,8 ha zunimmt und der Wasserfußabdruck mit zunehmenden Jahren ansteigt (Abb. 14). Für das Jahr 2050 nimmt die Anbaufläche für Baumwolle im FSD-Szenario hingegen ab auf 1.110,8 ha. Ab 2050 sinkt der jährliche Wasserfußabdruck daher. Durch die gleichmäßige Änderung der Anbauflächen können keine detaillierten Aussagen über die Veränderungen des Wasserbedarfs für Einzelflächen getätigt werden. Der Trend zeigt, dass der Wasserbedarf für die Baumwollflächen der WUA unter FSD-Bedingungen bis 2020 im Schnitt 2,4 % über den Berechnungen für gleichbleibende Anbauflächen liegt und ab 2050 bis 29 % darunter, sodass ein Wasserfußabdruck von $17.250.755 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ statt $21.366.547 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ anfällt.

Tabelle 13. Mittlere Wasserfußabdrücke für Baumwoll- und Weizenflächen der WUA Akbarabad unter FSD- und ESA-Szenario mit angepassten Anbauverhältnissen nach Tabelle 12 [eigene Darstellung].

Mittelwerte ab 2018	WF _{total} [$\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$]	WF _{blau} [$\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$]	WF _{grün} [$\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$]
FSD Baumwolle	20.859.929	20.369.060	490.871
ESA Baumwolle	20.643.195	20.125.086	518.110
FSD Weizen	5.063.286	4.077.634	985.652
ESA Weizen	4.079.199	3.305.927	773.272

Tabelle 13 zeigt die mittleren berechneten Wasserfußabdrücke der Szenarien FSD und ESA für Baumwolle und Weizen. Für Baumwolle unterscheiden sich die durchschnittlichen Wasserfußabdrücke für die Versuchsjahre von 2018 bis 2064 für das FSD- und das ESA-Szenario kaum. Die durch die 15 % mehr Tröpfchenbewässerung entstehende Wasserersparnis, fällt insgesamt kaum ins Gewicht, da die Anbaufläche für Baumwolle im ESA-Szenario im Schnitt um 176 ha zunimmt (Tab. 12). Für Weizen ist das FSD-Szenario mit 40 % Sprinklerbewässerung im Verhältnis zum ESA-Szenario mit 20 % Sprinklerbewässerung das Szenario mit dem größeren Wassersparpotential. Dies trifft jedoch nicht mehr zu, wenn die Anbauflächenänderung in die Berechnung einbezogen wird. Da das FSD-Szenario eine 335,8 ha größere Anbaufläche für Weizen aufweist, kommt es zu einer durchschnittlichen Wasserersparnis für die WUA für das ESA-Szenario von 984.087 m^3 pro Jahr im Vergleich zum FSD-Szenario.

Für die Kultur Weizen kann eine starke Verringerung des Wasserbedarfs gezeigt werden. Die Weizenflächen nehmen im FSD-Szenario von 2020 bis 2050 um 37 % bis 49 % ab, im ESA-Szenario sogar um 43 % bis 61 % (Tab. 7). Der gesamte Wasserfußabdruck sinkt im FSD-Szenario von durchschnittlich $8.776.199 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ auf $5.063.286 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ um 58 %. Für das ESA-Szenario ergibt sich eine gesamte Wassereinsparung von 44 % von $9.233.232 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ auf

4.079.199 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (Tab. 13). Die Flächenreduktion um 61 % im ESA-Szenario im Jahr 2050 zeigt einen Wasserbedarf von 2.760.507 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ statt 9.658.281 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$. Von Seiten des Wassermanagements macht eine Reduktion der bewässerten Fläche immer dann Sinn, wenn die Ackerflächen mit Regenfeldbau, oder wassereffizienteren Kulturarten ersetzt werden. Die Tröpfchenbewässerung ist durch ihre effiziente Wassernutzung das sparsamste System. Da unter Tröpfchenbewässerung jedoch Baumwolle angebaut wird, welche den höheren Wasserbedarf hat, ist keine absolute flächenbezogene Wasserersparnis gegeben.

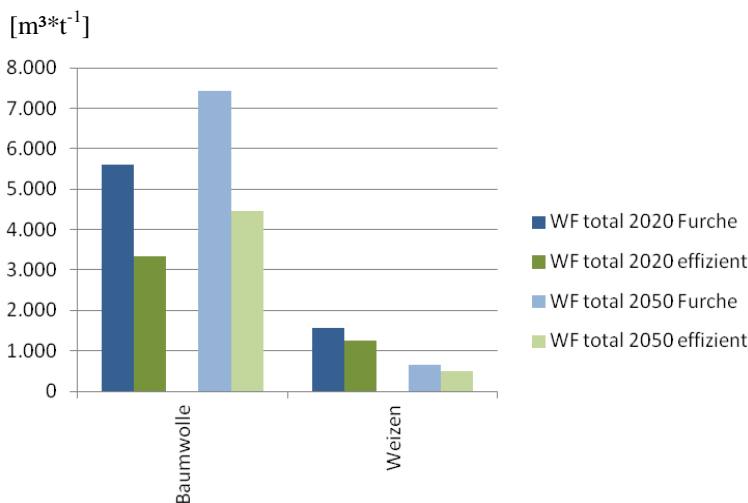


Abbildung 15. Wfcrop in $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ für Furchenbewässerung in dunkelblau für das Jahr 2020, in hellblau für das Jahr 2050. In dunkelgrün der Wfcrop in $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ für das effizientere Bewässerungsszenario für das Jahr 2020, in hellgrün für das Jahr 2050 (Ernteerträge aus 2020 und 2050 des BAU-Szenarios). Weizen mit Sprinklerbewässerung, Baumwolle mit Tröpfchenbewässerung [eigene Darstellung].

Abbildung 15 zeigt die Effizienzunterschiede der Bewässerungsszenarien für Baumwolle und Weizen. Für die Tröpfchenbewässerung des Wfcrop für das Jahr 2020 entsteht ein gesamter Wasserbedarf von 3.346 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$, im Verhältnis zu 5.598 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ unter Furchenbewässerung (F) und im Jahr 2050 ein Bedarf von 4.448 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ (7.433 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ mit F). Für den Anbau von Weizen unter Sprinklerbewässerung wird ein gesamter Wasserfußabdruck von 1.240 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ für 2020 (1.578 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ mit F) und 501 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ für 2050 (654 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ mit F) berechnet. Der zu erwartende Wasserfußabdruck durch Bewässerungsinnovation liegt demnach im Durchschnitt für Baumwolle bei 3.897 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ und für Weizen bei 871 $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$. Setzt man die Wassernutzungseffizienz der beiden Kulturen ins Verhältnis macht das 4,47 für Weizen im Verhältnis zu Baumwolle. Der Wassereinsatz der Weizenproduktion ist 4-5-mal effektiver als der von Baumwolle.

Tabelle 14 zeigt den Wasserfußabdruck pro Hektar für die Versuchsjahre um den Effekt der Bewässerungsmethode auf die Einzelkultur zu bewerten. Mit den aus der Hochrechnung steigenden Erträgen für Weizen und den abnehmenden Erträgen für Baumwolle gehen die Flä-

chenverhältnisse der beiden Kulturen zunehmend auseinander. Der Baumwoll-Wasserbedarf sinkt, der Wasserbedarf pro ha Weizenfläche steigt.

Tabelle 14. Effizienz-Vergleich Baumwolle-Weizen-Bewässerung. Bewässerungsbedarf in $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ für Baumwolle und Weizen in den Jahren ab 2018 unter Annahme einer vollständigen Bewässerung von Weizen mit Sprinklertechnik und Baumwolle mit Tröpfchenbewässerung, für einen durchschnittlichen Wasserbedarf für Baumwolle von $3.897 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$, für Weizen von $871 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$. Zugehörige Erträge in $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ in Klammern (Tab.5) [eigene Darstellung].

	2010	2018	2020	2022	2028	2050	2055	2064
Baumwolle WF [$\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$]	11.601 (3,2)	9.988 (2,7)	10.132 (2,8)	9.700 (3,3)	9.267 (2,5)	8.573 (2,1)	7.321 (2,0)	6.672 (1,8)
Weizen WF [$\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$]	4.524 (4,7)	6.548 (6,8)	6.968 (7,3)	7.291 (7,6)	8.405 (8,8)	12.542 (13,1)	13.419 (14,4)	15.090 (15,8)
Verhältnis Weizen: Baumwolle	0,3899	0,6556	0,6877	0,7516	0,9070	1,4629	1,8330	2,2618

Durch eine Bewässerung von Weizen über Tröpfchenbewässerung könnte der Wasserbedarf weiter gesenkt werden. Durch die räumliche Nähe zu den Baumwollfeldern sind die standort-spezifischen Bedingungen ähnlich [Brouwer *et al.*, 1988]. Aus wirtschaftlicher Sicht lohnt sich dies jedoch wahrscheinlich nicht, da die Etablierungsinvestitionskosten des Systems sowie die Fixkosten zur Unterhaltung die der Sprinklerbewässerung weit übersteigen [Amosson *et al.*, 2011].

3.3 Veränderung des Wasserfußabdrucks mit verschiedenen Anbauszenarien

Nach der Betrachtung der Klimaszenarien und der Bewässerungstechniken für die Kulturen Baumwolle und Weizen wird nun die Variation von Kulturarten betrachtet um den Wasserverbrauch in der WUA zu senken.

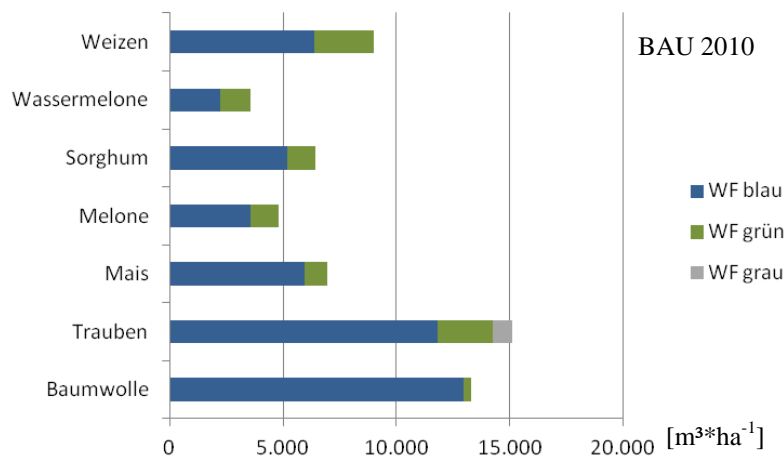
Die Auswahl möglicher Anbaukulturen wird der Erhebung durch das usbekische Arbeitsministerium [Sachbericht, 2013] entnommen. Die gleichzeitige Verfügbarkeit von Crop Coefficients für Zentral Asien (FAO Datenbank) limitieren die Auswahl auf die Ackerkulturen Wassermelone, Melone, Trauben, Sorghum und Mais. Diese Kulturarten werden zunächst auf das BAU-Szenario (Referenzszenario) für die Jahre 2010, 2020 und 2050 auf den Weizen- und Baumwollflächen angewendet. Die Berechnung beschränkt sich auf die Darstellung des WF_{crop} der Prognosejahre in $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ sowie des Bewässerungsbedarfs $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$. Die verwendeten Erträge für die Berechnung des Wasserfußabdrucks der neu angeführten Kulturen sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15. Erntemengen aus der reporting period und dem BAU-Szenario in $t \cdot ha^{-1}$ [*Sachbericht*, 2013].

	2010	2020	2050
Trauben	13,0	24,7	54,0
Mais	6,2	8,2	15,5
Melone	15,5	16,1	19,9
Sorghum	21,9	20,8	16,3
Wassermelone	15,5	16,1	19,9

Desweiteren werden ebenfalls SPARE:WATER-Analysen für effizientere Bewässerungstechniken durchgeführt. Es erfolgt ein Vergleich der Auswirkungen von Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung im Verhältnis zu Furchenbewässerung auf den Wasserfußabdruck der Kultur (WF_{crop}). Weizen und Sorghum werden mit Sprinklerbewässerung, Wassermelone, Melone, Mais, Trauben und Baumwolle mit Tröpfchenbewässerung versehen [*Sachbericht*, 2013]. Für das FSD- und das ESA-Szenario werden nur die Jahre 2020 und 2050 betrachtet. Im BAU-Szenario werden die Wasserfußabdrücke für 2010 ebenfalls berechnet, da ein Anbau dieser Kulturarten in den jeweiligen Küchengärten bereits heute stattfindet.

Abbildung 16 zeigt den blauen, grünen und grauen Wasserfußabdruck für die betrachteten Kulturarten unter Furchenbewässerung. Der Wasserfußabdruck (WF_{crop}) wird für die gegebenen Erträge (Tab. 15) auf die Fläche verrechnet und ergibt den Wasserfußabdruck pro Hektar Anbaufläche.

**Abbildung 16.** Abbildungsunterschrift auf der folgenden Seite.

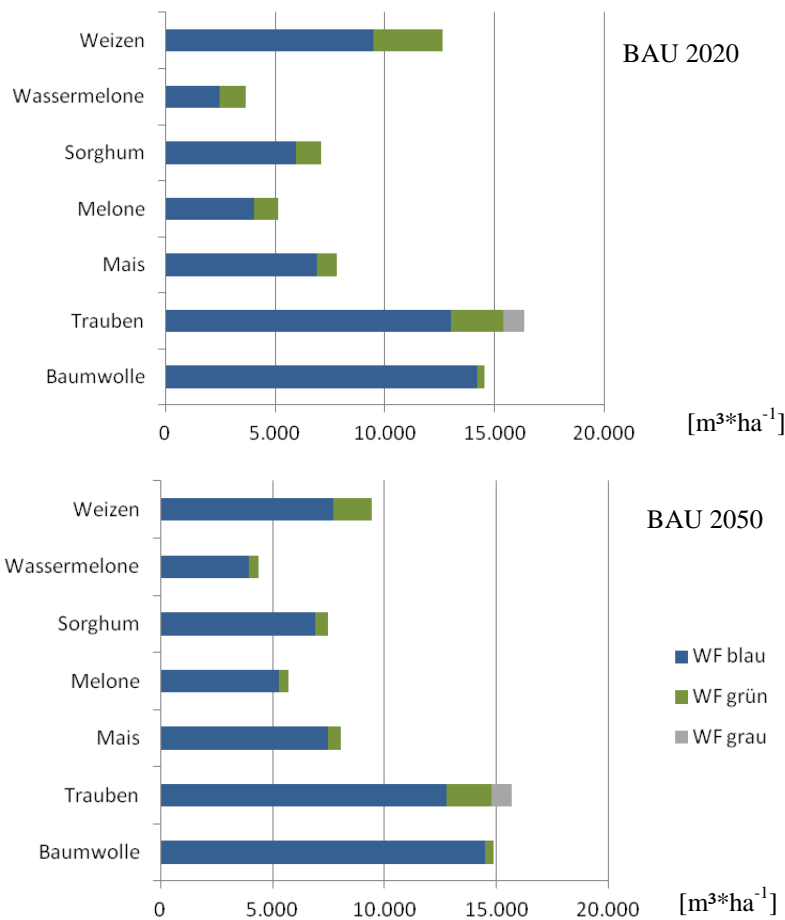


Abbildung 16. Wasserfußabdrücke für alternative Kulturen für 2010, 2020, und 2050. Angabe des gesamten Wasserfußabdrucks zusammengesetzt aus grünem, blauem und grauem Wasserfußabdruck. Angabe in $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ [eigene Darstellung].

Wie in den Grafiken zu sehen ist, haben alle Kulturen unter den gegebenen Ertragszahlen, mit Ausnahme der Trauben, einen geringeren Wasserbedarf pro Hektar als Weizen und Baumwolle. Die Wasserfußabdrücke steigen insgesamt vom Jahr 2010 auf das Jahr 2050. Trauben sind die einzige Kulturart, welche einen grauen Wasserfußabdruck aufweist.

Für Trauben und Weizen sinken die flächenbezogenen Wasserfußabdrücke von 2020 auf 2050, da die WF_{crop} stärker sinken als die Erträge pro Hektar zunehmen. Für alle weiteren Anbauprodukte steigen die Wasserfußabdrücke im BAU-Szenario pro Hektar an.

Tabelle 16 fasst die Wasserfußabdrücke pro Tonne der jeweiligen Kultur und für die Flächen für das Jahr 2020 zusammen. Für das Hochrechnungsjahr 2020 und Ertragsdaten des BAU-Szenario wird deutlich, dass Baumwolle mit $5.599 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ mit Abstand den größten Wasserfußabdruck aufweist, gefolgt von Weizen mit $1.579 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$.

Tabelle 16. Wasserfußabdruck für ausgewählte Kulturen unter BAU-Anbau-Annahme in $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ sowie $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ und ihre jeweiligen Wasserfußabdrücke im Verhältnis zu Weizen [eigene Darstellung].

Kulturart	2020 WF regionaler Durchschnitt	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$]	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$] Verhältnis zu Weizen	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$] Verhältnis zu Weizen
Baumwolle	total	5.599	14.557	3,55	1,15
	blau	5.471	14.224	4,62	1,50
	grün	128	333	0,32	0,11
Trauben	total	662	16.343	0,61	1,29
	blau	527	13.025	0,76	1,38
	grün	97	2.387	0,24	0,76
Mais	total	954	7.824	0,87	0,62
	blau	840	6.887	1,21	0,73
	grün	114	937	0,29	0,30
Melone	total	318	5.117	0,29	0,41
	blau	251	4.039	0,36	0,43
	grün	67	1.078	0,17	0,34
Sorghum	total	341	7.103	0,22	0,56
	blau	287	5.962	0,24	0,63
	grün	55	1.140	0,14	0,36
Wassermelone	total	228	3.664	0,21	0,29
	blau	153	2.456	0,22	0,26
	grün	75	1.208	0,19	0,38
Weizen	total	1.579	12.628	1,00	1,00
	blau	1.184	9.471	1,00	1,00
	grün	395	3.157	1,00	1,00

Zusätzlich nutzt Baumwolle den geringsten Anteil an Niederschlag. Der grüne Wasserfußabdruck macht hier nur 3 % des gesamten Wasserbedarfs aus. Die beste Nutzung des Niederschlags weist Wassermelone mit 32 % auf sowie den geringsten Gesamtwasserfußabdruck mit $228 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Diese Kulturart bedarf mit $153 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ebenfalls am wenigsten Bewässerungswasser (WF_{blau}). Werden die Wasserfußabdrücke ins Verhältnis zum Wasserbedarf von Weizen gesetzt, ist zu erkennen, dass der Wasserbedarf für 1 t Baumwolle fast 4 t Weizen entspricht. Andererseits können für 1 t Weizen 5 t Wassermelonen mit Wasser versorgt werden, oder 20 t Wassermelonen anstelle 1 t Baumwolle. Wiegt man diese einfachen und anschaulichen Verhältnisse gegeneinander auf, wird klar wie stark die Lannutzung den Wasserbedarf regeln kann.

Unter Berücksichtigung der Erntemengen und Hochrechnung des Wasserfußabdrucks auf einen Hektar Anbaufläche ändert sich dies. Baumwolle (14.557 m^3) ist nicht länger die Kulturart mit dem größten Wasserbedarf, Weintrauben benötigen auf die Fläche bezogen mit 16.343 m^3 mehr Wasser. Wassermelonen haben weiterhin den kleinsten Wasserbedarf mit 3.466 m^3 . Mit dem Wasserbedarf 1 Hektars Weizen können mehr als 3 Hektar Wassermelone oder fast 2 Hektar Sorghum angebaut werden. Für den Anbau von einem Hektar Baumwolle

kann hingegen aus Wasserbedarfssicht 1,2 ha Weizen angebaut werden. Für einen Hektar Trauben sogar 1,3 ha Weizen.

Tabelle 17. Wasserfußabdruck für ausgewählte Kulturen unter BAU-Anbau-Annahme in $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ sowie $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ und ihre jeweiligen Wasserfußabdrücke im Verhältnis zu Weizen [eigene Darstellung].

Kulturart	2050 WF regionaler Durchschnitt	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$]	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$]	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$] Verhältnis zu Weizen	WF [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$] Verhältnis zu Weizen
Baumwolle	total	7.433	14.865	11,36	1,58
	blau	7.248	14.496	13,55	1,88
	grün	185	369	1,55	0,22
Trauben	total	290	15.674	0,29	1,66
	blau	237	12.786	0,32	1,66
	grün	37	1.975	0,13	1,15
Mais	total	519	8.038	0,51	0,85
	blau	483	7.481	0,66	0,97
	grün	36	556	0,13	0,32
Melone	total	287	5.712	0,28	0,61
	blau	266	5.286	0,36	0,69
	grün	21	426	0,08	0,25
Sorghum	total	459	7.480	0,70	0,79
	blau	425	6.920	0,79	0,90
	grün	34	560	0,29	0,33
Wassermelone	total	219	4.368	0,22	0,46
	blau	199	3.961	0,27	0,51
	grün	20	407	0,07	0,24
Weizen	total	654	9.418	1,00	1,00
	blau	535	7.703	1,00	1,00
	grün	119	1.715	1,00	1,00

Tabelle 17 zeigt die Wasserfußabdrücke und Verhältnisse für die alternativen Kulturen für das Jahr 2050. Bezogen auf eine Tonne Ertrag der Kultur, nehmen die Wasserfußabdrücke (WF_{crop}) für beinahe alle Kulturarten von 2020 nach 2050 ab, Ausnahme bilden Sorghum und Baumwolle. Für Sorghum nimmt der gesamte Wasserfußabdruck von $341 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ im Jahr 2020 auf $459 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ zu, für Baumwolle von $5.599 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ auf $7.433 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Grund hierfür sind sinkende Erträge (Sorghum 2020 bis 2050 von $20,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ auf $16,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Die hier weiteren behandelten Kulturarten weisen durch steigende Erträge (Tab. 15) in Zukunft einen sinkenden WF_{crop} auf. Dies ist besonders für Mais, Trauben und Weizen zu erkennen, deren Erträge sich von 2020 auf 2050 jeweils fast verdoppeln.

Weizen ist im Jahr 2050 die Kulturart mit dem größten grünen Wasserfußabdruckanteil (18 %), Baumwolle mit dem geringsten (2 %). Der Wasserfußabdruck pro Tonne hat sich für Trauben von $662 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ auf $290 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ (um 56 %) und Weizen von $1.579 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ auf $654 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ (um 49 %) am stärksten verringert.

Betrachtet man den Wasserverbrauch pro Hektar sind die größten Änderungen im Verhältnis zu 2020 (Tab. 16) bei Weizen, sowie den blauen Wasserfußabdrücken für Melone und Wassermelone zu erkennen. Der Wasserfußabdruck für Melone nimmt um $595 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ zu. Weiterhin nimmt der Wasserfußabdruck pro Hektar für Trauben um 668 m^3 ab, alle weiteren Kulturarten weisen steigende Gesamtwasserfußabdrücke auf. Die abnehmenden Erträge für Sorghum führen zu einem steigenden Wasserbedarf pro Tonne, der Wasserfußabdruck pro Hektar ist dennoch steigend. Im Vergleich zu 1 ha Weizen können 2050 1,3 ha Sorghum, 2 ha Wassermelonen oder 1,2 ha Mais mit der gleichen Wassermenge angebaut werden. Durch die starke Zunahme der Weizenerträge und der folgenden Abnahme des Wasserfußabdrucks pro Tonne, verändert sich das Anbauverhältnis für die anderen Kulturarten negativ. Es kann 2050 weniger Fläche mit dem Bewässerungswasser-Äquivalent für den Anbau eines Hektars Weizen bedient werden als 2020.

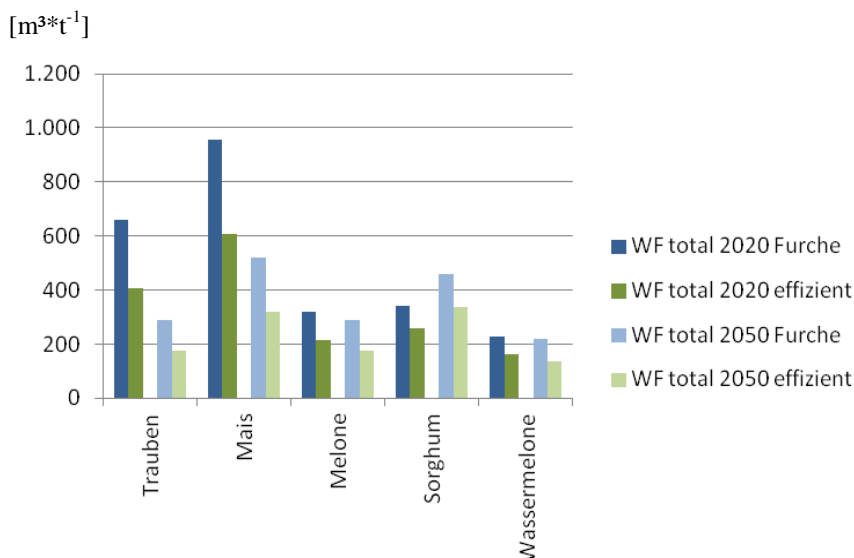


Abbildung 17. WF_{crop} in $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für Furchenbewässerung in dunkelblau für das Jahr 2020, in hellblau für das Jahr 2050. In dunkelgrün der WF_{crop} in $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für das effizientere Bewässerungsszenario für das Jahr 2020, in hellgrün für das Jahr 2050 (Ernteerträge aus 2020 und 2050 des BAU-Szenarios). Sorghum mit Sprinklerbewässerung, Trauben, Mais, Melone und Wassermelone mit Tröpfchenbewässerung [eigene Darstellung].

Abbildung 17 zeigt eine Übersicht der berechneten Wasserfußabdrücke für die unterschiedlichen Bewässerungstechniken. Deutlich zu sehen ist, dass Mais mit $954 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für das Jahr 2020 unter Furchenbewässerung weit mehr Wasser pro Tonne Ernte benötigt als alle weiteren Kulturen. Für Melone, Sorghum und Wassermelone kann durch effiziente Bewässerungstechnik verhältnismäßig absolut betrachtet wenig Wasser pro Tonne eingespart werden. Für Wassermelone liegt die Einsparung zwischen Furchenbewässerung und Tröpfchenbewässerung bei $63 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ im Jahr 2020 und im Jahr 2050 bei $121 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Für Melone beträgt die Einsparung $103 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für das Jahr 2020. Prozentual gesehen sind dies aber 32,5 % Abnahme des Bewässerungswassers. Für Mais und Trauben sind die

Wassersparnisse für das Jahr 2020 zwischen Furchen- und Tröpfchenbewässerung mit $346 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und $255 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ höher, liegen prozentual betrachtet mit 38,6 % Wassersparnis für Trauben und für Mais 36,2 % jedoch nur knapp über der Ersparnis für Melone.

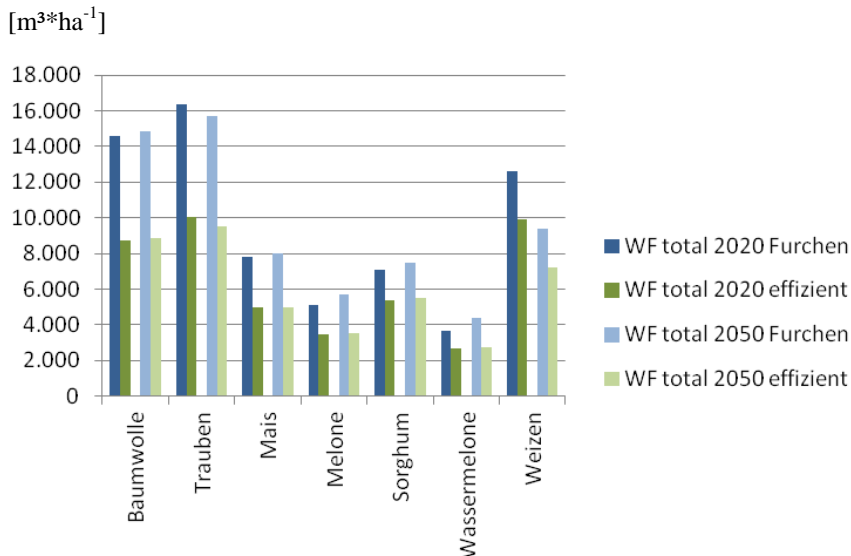


Abbildung 18. Wasserfußabdruck [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$] in dunkelblau für Furchenbewässerung und das Jahr 2020, in hellblau für das Jahr 2050. In dunkelgrün der Wasserfußabdruck in m^3 pro ha für das effiziente Bewässerungsszenario für das Jahr 2020, in hellgrün für das Jahr 2050 (Erträge von 2020 und 2050 des BAU-Szenarios) Sorghum und Weizen mit Sprinklerbewässerung, Baumwolle, Trauben, Mais, Melone und Wassermelone mit Tröpfchenbewässerung [eigene Darstellung].

Abbildung 18 zeigt den Wasserfußabdruck pro Hektar für die Kulturen unter Furchen- und effizienterer Bewässerung. Die Einsparungen beziehungsweise Zunahmen zwischen dem Jahr 2020 auf 2050 fallen für die effizienteren Bewässerungstechniken verhältnismäßig geringer aus als für die Furchenbewässerung und werden daher näher betrachtet. Die Einsparungen für Weizen sind am größten und der Wasserfußabdruck pro Hektar sinkt von $9.922 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ im Jahr 2020 auf $7.217 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ in 2050. Weiterhin nimmt der Wasserbedarf für Trauben um $553 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ und für Mais um $31 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ab. Baumwolle verzeichnet mit $196 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ die größte Zunahme, gefolgt von Sorghum mit $104 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Die Tabellen mit den ausführlichen Berechnungen zu den effizienteren Bewässerungsszenarien sowie den Verhältnisangaben zu Wasserfußabdruck in $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ finden sich im Anhang (Tab. 22). Abschließend wird die Wassereffizienz in Bezug auf die Nutzung von Niederschlag sowie der individuelle Pflanzenwasserbedarf der Kultur bewertet. Tabelle 18 zeigt den Bewässerungsbedarf, den Pflanzenwasserbedarf und die Verfügbarkeit an Niederschlag für die Kulturen.

Tabelle 18. Niederschlagsmenge (Nd), reale Bewässerung (aIRR) und reale Evapotranspiration (aET) in mm pro Vegetationsperiode für die Jahre 2020 und 2050 [eigene Darstellung].

Vegetationsphase	Nd [mm]		aIRR [mm]		aET [mm]	
	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Melone	100,7	42,2	238	311	289	307
Mais	91,9	53,9	405	440	438	430
Trauben	230,5	197,5	766	752	805	776
Sorghum	117,8	56,3	426	494	397	402
Wassermelone	120,2	38,6	144	233	212	239

Für alle Kulturen außer Mais gilt: bei steigender Evapotranspiration steigt auch der Bewässerungsbedarf. Steht weniger Niederschlag zur Verfügung muss ein höherer Anteil durch Bewässerung kompensiert werden. Dies trifft nur für die Kulturart Trauben nicht zu, da der Jahresniederschlag in den betrachteten Jahren abnimmt, die Bewässerungsmenge jedoch nicht. Wird allerdings die wichtigste Zeit der Wachstumsperiode für Trauben (Mitte Juli bis Mitte November) betrachtet [Allen et al., 1998], ändert sich dies, da in dieser Periode in 2050 mehr Niederschlag fällt. Der Bewässerungsbedarf hängt also nicht nur vom Pflanzenwasserbedarf und dem Niederschlag ab sondern auch davon wie sich der Niederschlag in der Wachstumsperiode verteilt. Die Länge der Vegetationsperiode bestimmt ebenfalls den Pflanzenwasserbedarf und bewirkt, dass schnellwachsende Gemüse einen verhältnismäßig niedrigen Wasserfußabdruck ausweisen können.

4 Diskussion

Für den berechneten Wasserfußabdruck mit SPARE:WATER für das BAU-Szenario (Referenzszenario) unter Furchenbewässerung konnte ein Anstieg des Wasserverbrauchs für die Zukunft ermittelt werden. Unterschiede zwischen Trockenjahren und Normaljahren in der Höhe des Wasserfußabdrucks konnten nicht festgestellt werden. Die Niederschlagsverteilung in der Vegetationsperiode zeigte vor allem für Baumwolle keine deutlichen Unterschiede zwischen einem Trocken- und einem Normaljahr. Für Weizen fällt für alle berechneten Jahre ein durchschnittlicher Pflanzenwasserbedarf (ET_{crop}) von 416 mm an, mit einer Variationsbreite von 351 mm bis 494 mm. Die ET-Werte für Baumwolle reichen in den betrachteten Jahren von 734 mm bis 893 mm. In einer Untersuchung mit Furchenbewässerung im Ferghanatal nach Reddy (2012) wurden für Felder unter Baumwollanbau für die Jahre 2009 bis 2011 ET-Werte von 450 mm bis 800 mm berechnet. Die große Spannweite wird auf eine unzureichende Bewässerung zurückgeführt. Die Höhe der Evapotranspiration richtete sich nach der Niederschlagshöhe pro Jahr und der Bewässerungsmenge, weshalb die ET in trockeneren Jahren geringer ausfiel. Für die Berechnung mit SPARE:WATER ist dies nicht zuerkennen, da das Programm keine Wasserknappheit berücksichtigt sondern die anfallende potentielle Evapotranspiration unter optimaler Wasserversorgung simuliert. Der Grund für eine geringe Spannweite der ET für die hier gezeigten Berechnungen liegt also in der geringen Variation der Klimabedingungen. Die Gleichung nach Hargreaves-Samani neigt bei hohen Windgeschwindigkeiten (über $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) zu Unterschätzungen der Evapotranspiration, bei einer hohen relativen Luftfeuchte (über 70 %) zu Überschätzungen [Allen *et al.*, 1998]. Für das Jahr 2010 konnten Messdaten zu Windgeschwindigkeits- und Luftfeuchte für die WUA eingesehen werden. Die gemessene Windgeschwindigkeit erreicht im Jahr einen Höchstwert von $1,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Eine Unterschätzung der Evapotranspiration ist damit eher unwahrscheinlich. Die Luftfeuchte liegt im Durchschnitt bei knapp 69 % und übersteigt in den Wintermonaten Januar und Februar 80 %. Sie befindet sich hiermit im mittleren bis hohen Bereich und eine Überschätzung der Evapotranspiration ist durchaus möglich. Eine andere Berechnungsmethode kann ebenfalls ein Grund für die niedrigere Evapotranspiration in der Studie von Reddy (2012) sein. Berechnungen im Water footprint Report 41 für die Periode von 1997-2007 für Baumwolle in Usbekistan ergaben 1.047 mm ET, sowie für Weizen 583 mm [Aldaya *et al.*, 2010]. Für beide Kulturen fallen die Werte höher aus, als hier berechnet.

Der Gesamt-Wasserfußabdruck für Weizen verringert sich für die Berechnungen 1962 bis 2064 drastisch von $14.851 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ auf $593 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$. Die Datensammlung der FAOSTAT von 1996 bis 2005 [Mekonnen and Hoekstra, 2010b] führt für die usbekische Provinz Ferghana

einen durchschnittlichen grünen Wasserfußabdruck von $825 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ sowie einen blauen Wasserfußabdruck von $90 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ an. Dies entspricht einem gesamten Wasserfußabdruck von $915 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$. Ein grauer Wasserfußabdruck fiel nicht an. Für die Versuchsjahre 1991 und 2010 (zeitlich nächste Versuchsjahre zur FAOSTAT-Periode) liegt der gesamte Wasserfußabdruck bei $7.271 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ und $1.582 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$. Er fällt damit weitaus höher aus. Weiterhin fällt auf, dass das Verhältnis des grünen und blauen Wasserfußabdruck sich zu den hier gezeigten Ergebnissen entgegengesetzt verhält. In den SPARE:WATER-Berechnungen macht der blaue Wasserfußabdruck den Hauptanteil der Wasserfußabdrücke aus (1991 mit $870 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ grüner WF und $6.400 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ blauer WF, 2010 mit $462 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ grüner WF und $1.119 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ blauer WF). Der durchschnittliche grüne Wasserfußabdruck für die gesamte Beobachtungsperiode liegt bei $602 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$, variiert innerhalb der Jahre allerdings sehr stark. Es fällt auf, dass der grüne Wasserfußabdruck den FAOSTAT-Ergebnissen nahekommt, wohingegen der blaue mit $3.422 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ sehr weit abweicht. Für die Periode von 1992-2007 wurden von der FAO ebenfalls Wasserfußabdrücke für das Land Usbekistan ermittelt. Der blaue Wasserfußabdruck lag bei $1.382 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$, der grüne Wasserfußabdruck bei $686 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ [Aldaya et al., 2010]. Diese Werte liegen im Bereich der in dieser Studie ermittelten. Vergleicht man die Wasserfußabdrücke für Weizen für die Periode von 1996-2005 weltweit, liegt der Wasserfußabdruck im Durchschnitt bei $1.830 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$, im Vergleich zu über $14.000 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ die WUA für das Jahr 1962. Für Usbekistan ist für den Zeitraum von 1996-2005 nur ein Wasserfußabdruck von $1.039 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ angegeben. Es gab jedoch auch Länder, die einen weitaus höheren Wasserfußabdruck für Weizen aufwiesen. Somalia und Eritrea beispielsweise benötigten zur Produktion einer Tonne Weizen etwa 18.700 m^3 und 16.700 m^3 Wasser [Mekonnen and Hoekstra, 2010a]. Ein Wasserfußabdruck von $14.000 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ ist daher theoretisch möglich. In Kombination mit sehr geringen Erträgen von knapp $0,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sorgt der hohe WF_{crop} trotzdem für den geringsten gesamt Wasserfußabdruck der betrachteten Jahre für die WUA-Fläche (für 1962). Inwiefern die Ertragsangaben aus der Literatur realistisch sind kann für das Untersuchungsgebiet nicht überprüft werden. Es kann lediglich festgehalten werden, dass der sehr hohe Wasserverbrauch pro Produktionseinheit auf die extrem niedrigen Ertragsangaben zurückgeführt werden kann und deshalb kritisch betrachtet werden muss. Da vor allem die Prognosen für zukünftige Planungsschritte von Interesse sind, sollte die Ergebnisse der Jahre vor 1991 eventuell verworfen werden.

Für Baumwolle reichen die berechneten Wasserfußabdrücke von $4.757 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ im Jahr 2010 bis $9.261 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ im Jahr 2064. Für das Jahr 1991 fallen $5.630 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ gesamt an, davon $5.494 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ blau und $136 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ grün. Auch für Baumwolle zeigt sich, dass der grüne Wasser-

fußabdruck besser mit den Daten von Mekonnen und Hoekstra (2010b) vergleichbar ist, als der blaue. Hier werden ebenfalls $136 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für den grünen und $988 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für den blauen Wasserfußabdruck für die Provinz Ferghana errechnet. In Analysen von Aldaya et al. (2010) von 1992-2007 ergaben sich Durchschnittswerte von $4.171 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für den blauen und $265 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ für den grünen Wasserfußabdruck. Diese Werte liegen innerhalb der in dieser Arbeit gezeigten Spanne und belegen, dass die Berechnungen dieser Arbeit durchaus geeignet sind allgemeine Trends im Wasserbedarf für die Zukunft aufzuzeigen.

Für Wassermelone, Melone und Sorghum sind keine FAOSTAT-Werte für die Provinz Ferghana vorhanden die zur kritischen Prüfung der berechneten Werte herangezogen werden können. Es werden für Sorghum die durchschnittlichen Werte für Usbekistan für die Periode 1996-2005 nach Mekonnen und Hoekstra (2011b) für einen Vergleich gewählt. Der grüne WF_{crop} fällt mit $913 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ größer aus als der blaue WF_{crop} mit $797 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Ein grauer Wasserfußabdruck fällt nicht an. Mit SPARE:WATER wird für Sorghum für das Jahr 2010 unter Furchenbewässerung ein grüner von $\text{WF}_{\text{crop}} 57 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und ein blauer WF_{crop} von $237 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ berechnet. Die Werte sind hiermit wesentlich geringer als für das gesamte Land. Für Wassermelone sind keine Daten für das Land Usbekistan vorhanden, es werden globale durchschnittliche Wasserfußabdrücke für die Periode von 1996-2005 nach Mekonnen und Hoekstra (2011a) herangezogen. Der grüne WF_{crop} beträgt weltweit $147 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und der blaue WF_{crop} $25 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Für Wassermelone fällt auch ein grauer WF_{crop} von $63 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ an. In den Berechnungen mit SPARE:WATER für 2010 fällt hingegen kein grauer WF_{crop} an. Der grüne WF_{crop} beträgt $88 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, der blaue WF_{crop} $142 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Wie für Weizen ist das Verhältnis des grünen und blauen WF_{crop} umgekehrt zur Berechnung von Mekonnen und Hoekstra (2011a). Der grüne Wasserfußabdruck fällt für die WUA wesentlich geringer aus als der weltweite Durchschnitt. Der blaue Wasserfußabdruck hingegen deutlich höher. Dies kann für den globalen Wert an einer Einbeziehung des Regenfeldbaus für den Wassermelonenanbau liegen. Für die Kulturen Mais und Trauben werden die Ergebnisse der Berechnung des BAU-Szenarios des Jahres 2010 zum Vergleich herangezogen. Für die Kultur Mais wird von der FAOSTAT ein grüner Wasserfußabdruck von $483 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und ein blauer Wasserfußabdruck von $1.041 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ angegeben. Im Unterschied zu den SPARE:WATER-Berechnungen war auch ein geringer grauer Wasserfußabdruck von $3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ vorhanden. Der hier berechnete blaue Wasserfußabdruck für das Versuchsjahr 2010 liegt bei $956 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, der grüne Wasserfußabdruck bei $160 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und somit kleiner als die Berechnung der FAOSTAT. Allerdings liegen beide Schätzungen im vergleichbaren Bereich. Trauben werden mit $2.338 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ grünem, $4.136 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ blauem und $2 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ grauem Wasserfußabdruck angegeben. Auch bei den

SPARE:WATER-Berechnungen ist der blaue Wasserfußabdruck ($911 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$) höher als der grüne ($185 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$), jedoch fällt der gesamte Wasserverbrauch deutlich geringer aus. Der FAOSTAT Wert ist 6-fach höher. Für die teilweise recht großen Unterschiede der herangezogenen Vergleichsdaten zum Wasserfußabdruck von Kulturen lassen sich mehrere Gründe anführen. Die Berechnung der Evapotranspiration, welche in SPARE:WATER die Berechnungsbasis der Bewässerungsmenge und des Wasserfußabdrucks bildet, wird mit der Gleichung nach Hargreaves-Samani berechnet. Hier fließen die REMO-Modelldaten ein, welche sich von den Prognosedaten andere Versuche unterscheiden können. Die FAOSTAT-Daten wurden mit der Penman-Monteith Methode zur Berechnung der ET angegeben [Mekonnen and Hoekstra, 2010b]. In die Gleichung nach Penman-Monteith gehen mehr meteorologische Parameter ein, was die Berechnung möglicherweise genauer macht, sicher aber unterschiedliche Ergebnisse liefert. Weiterhin muss beachtet werden, dass SPARE:WATER stets von optimalen Bedingungen für das Pflanzenwachstum ausgeht. Wassermangel, der zu einer niedrigeren Evapotranspiration führen kann, wird nicht berücksichtigt. Auch wird angenommen, dass die vom Programm berechnete benötigte Bewässerungswassermenge vorhanden ist. Ein weiterer Faktor, welcher zu höheren Wasserfußabdrücken führen kann. Auch die Ertragsdaten können zu Abweichungen im WF_{crop} führen. Die Datengrundlage beruht nur auf einem einzigen Jahr (Referenzjahr 2010) und die Prognosedaten bis 2050 sind für die Provinz Ferghana angegeben, nicht für die WUA, sowie durch ihre Zukunftsprojektion eine wahrscheinliche Fehlerquelle.

Die Unterschiede in den Ergebnissen verschiedener Studien zur Berechnung des Wasserfußabdrucks sind laut Mekonnen und Hoekstra (2011a) zurückzuführen auf „a variety of causes, including: type of model, spatial resolution, period considered and data regarding cultivated and irrigated areas, growing periods, crop parameters, soil and climate.“ Ein Vergleich der Daten verschiedener Studien ist generell schwierig, da viele Annahmen getroffen werden müssen und verschiedene Parameter in die Modelle zur Berechnung des Wasserfußabdrucks eingehen, die selten mit den Ergebnissen ausgewiesen werden. Die Qualität der Daten unterscheidet sich darüber hinaus und es sind nicht immer vergleichbare Daten zur Modellierung verfügbar [Mekonnen and Hoekstra, 2011a]. Eine optimale Möglichkeit zur Validierung der Berechnungen kann eine Feldmessung der potentiellen Evapotranspiration bieten. Alle Berechnungen basieren auf dieser Größe und auch die Berechnungsmethode selbst kann geprüft werden. Um für zukünftige Studien eine Referenz zu bieten sollten ET-Messungen erhoben oder bereitgestellt werden.

Die Bewässerung in der WUA Akbarabad wird aus dem Einzugsgebiet des Syr Darya gespeist. Eine Studie im Auftrag der Asian Development Bank sagt für die zukünftige Periode von 2041 bis 2050 einen Anstieg des Wasserbedarfs für das Einzugsgebiet von 3,7 % voraus. Zurückzuführen ist der Anstieg im Bereich der Bewässerung auf steigende Jahresdurchschnittstemperaturen, in den Zukunftsprojektionen von circa 2 °C, und einem damit einhergehenden Anstieg der Evapotranspiration sowie auf verringerte Niederschläge besonders in den Bergregionen, welche dann im Tal fehlen [Lutz *et al.*, 2012]. Eine steigende Evapotranspiration zeigt sich auch in den SPARE:WATER-Berechnungen. Weiter zeigt sich bis 2064 eine leichte Abnahme des grünen Wasserfußabdrucks für Weizen von durchschnittlich 16.975 m³ (0,93 %) pro Jahr, und für Baumwolle durchschnittlich 3.881 m³ (0,67 %) pro Jahr für die Anbaufläche der gesamten WUA unter Furchenbewässerung.

Im “Second National Communication report of the Republic of Uzbekistan under the UN Framework Convention on Climate Change”, federführend ausgeführt durch das “Centre of Hydrometeorological Service under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan” wurden anhand aufgezeichneter Wetterdaten seit 1951 durchschnittliche Temperaturanstiege für eine Zehnjahresperiode zwischen 0,22 °C für maximale Temperaturen und 0,36 °C für minimale Temperaturen genannt. In dieser Periode mehrten sich auch Tage mit extremen Temperaturen, wobei Zentralusbekistan stärker betroffen war als das Ferghanatal. Hier nahmen die Tage mit extremen Temperaturen bis 2005 von 6 % auf 15 % bei den maximalen und von 5 % auf circa 17 % bei den minimalen Temperaturen zu. Auf Grundlage der Szenarien des IPCC-Berichts von 2001 ergeben sich Temperaturanstiege für das Ferghanatal von 3,4 °C für das Szenario B2 und 4,2 °C für das Szenario A2 bis zum Jahr 2095. Die Niederschläge könnten um 11 % beziehungsweise 14 % ansteigen. Die Evapotranspiration von Baumwolle soll für die Provinz Ferghana bis 2080 um 6 % ansteigen für das A2 Szenario, für Weizen um 7,8 bis 9,9 %. Durch demografische Veränderungen einhergehend mit einem erhöhten Wasserbedarf könnte dies trotzdem zu Ernteeinbußen bei Baumwolle von 10 % und Weizen von 4 % für Prognosen für das Jahr 2050 führen [Uzbekistan, 2009].

Die hier verwendeten REMO-Temperaturdaten steigen jährlich bis 2100 um durchschnittlich 0,0368 °C für maximale Temperaturen und um 0,0344 °C für minimale Temperaturen an. Der Temperaturanstieg der monatlichen Maxima ist damit auf hundert Jahre gerechnet um 1,28 °C höher als die oben beschriebenen Hochrechnungen des Climate Change Assessment, für Uzbekistan (2009). Die durchschnittlichen Jahrestemperaturen erhöhen sich bis 2100 um 3,56 °C. Diese Einschätzung geht mit den IPCC-Szenarien konform. Der Anstieg der Evapot-

ranspiration für Baumwolle in dieser Arbeit liegt jährlich bei 0,69 mm und für Weizen bei 0,96 mm (für eine hundertjährige Periode 1964 bis 2064 für Baumwolle +8,78 % und für Weizen +26,36 %). Die aktuelle Evapotranspiration im IPCC-Report wird mit komplexen Wettermodellen berechnet, die tatsächliche Wettersituation und Pflanzen- und Bodenkoppungen enthalten. Hargreaves-Samani dagegen berechnet die potentielle Evapotranspiration mit nur wenigen meteorologischen Parametern. Der Anstieg der Evapotranspiration für Baumwolle kommt den Berechnungen für das A2 Szenario (6 %) sehr nahe. Der Wert für Weizen (etwa 8 %) fällt hingegen in den SPARE:WATER-Berechnungen deutlich höher aus.

Die Weizenernte wird für die WUA Akbarabad für das Jahr 2050 im BAU-Szenario auf 13,1 Tonnen pro Hektar geschätzt. Mithilfe der FAOSTAT-Datensätze zum Weizenertrag (2005- 2050) kann ein jährliches Wachstum von weltweit 0,9 % für Entwicklungsländer und 0,8 % für alle Länder abgeleitet werden. Usbekistan liegt als Transformationsland zwischen den beiden Zahlen. Der weltweite Durchschnitt der Weizenernte wird laut Bruinsma (2009) für 2050 auf knapp über $3,6 \text{ t*ha}^{-1}$ geschätzt, kann in manchen Entwicklungsländern jedoch bis auf $9,02 \text{ t*ha}^{-1}$ ansteigen. Generell ist die Weizenernte stark von standortspezifischen Eigenschaften abhängig und regional stark unterschiedlich. Auf subtropischen Versuchsfeldern wurden Erträge von 17 t*ha^{-1} nachgewiesen [Bruinsma, 2009], es ist jedoch fraglich, ob dies auch unter alltäglichen Anbaubedingungen in Usbekistan möglich wäre. Für das Vereinigte Königreich sind laut einer Studie theoretisch 19 t*ha^{-1} Ernte möglich [Sylvester-Bradley et al., 2005]. Bis 2050 geht eine Studie nach Fischer et al. (2009) von einer durchschnittlichen jährlichen Erhöhung der weltweiten Weizenernte von 1% bis höchstens 1,5 % aus. Die Entwicklung besser angepasster Weizensorten an die zukünftigen Klimabedingungen sowie Sorten mit höherer Produktivität sind von Nöten.

Die Erntemenge liegt im Referenzjahr 2010 bei durchschnittlich $5,19 \text{ t*ha}^{-1}$ für die WUA. Wird die jährliche Erhöhung der Weizenernte von 0,9 % angenommen, wird 2050 eine Ernte von $7,42 \text{ t*ha}^{-1}$ erreicht. Bei einer Erhöhung um durchschnittlich 1,5 % jährlich wird 2050 eine Ernte von $7,47 \text{ t*ha}^{-1}$ erreicht. Wenn die hohen Ernterwartungen von $13,1 \text{ t*ha}^{-1}$ nicht erreicht werden sollten, würde sich dies abschwächend auf den Wasserfußabdruck pro Fläche auswirken. Es wird eine Berechnung in SPARE:WATER für die Klimaverhältnisse im Jahr 2050 mit den Ernten von 2010 durchgeführt um mögliche Fehleinschätzungen der Erträge und ihre Auswirkung auf den Wasserfußabdruck einzugrenzen. Bei einem durchschnittlichen Weizenertrag von $5,19 \text{ t*ha}^{-1}$ kommt es zu einer Verkleinerung des gesamten Wasserfußabdrucks von $10.130.888 \text{ m}^3$ für die gesamte Weizenanbaufläche der WUA für einen Ertrag von

durchschnittlich $13,1 \text{ t*ha}^{-1}$ auf $10.131.271 \text{ m}^3$. Es kommt zu einer Einsparung von $383 \text{ m}^3\text{*a}^{-1}$. Der WF_{crop} steigt von 654 m^3 für $13,1 \text{ t*ha}^{-1}$ auf 1.811 m^3 bei Erträgen von $5,19 \text{ t*ha}^{-1}$. Die Ertragsentwicklung hat demnach bei gleichbleibender Anbaufläche keine großen Auswirkungen auf den zukünftigen Wasserbedarf der gesamten WUA-Fläche. Eine Wasserersparnis durch geringere Erträge ist demnach unwahrscheinlich. Auf den WF_{crop} wirkt sich ein verringerter Ertrag jedoch sehr stark aus. Mit zunehmender Ernte steigt die Wassereffizienz. Zuverlässige und realistische Ertragshochrechnungen sind für das Wassermanagement für eine angestrebte Ertragsquote von entscheidender Bedeutung. Wird jedoch eine festgelegte landwirtschaftliche Fläche betrachtet, sind die Auswirkungen vernachlässigbar.

Eine Tröpfchenbewässerung von Baumwolle im Vergleich zur Furchenbewässerung führte bei einem Versuch in der Provinz Tashkent in den Jahren 2000 bis 2002 zu einer im Schnitt erhöhten Bewässerungswassernutzungseffizienz von 86 % [Ibragimov et al., 2003]. Bei Versuchen von 2003 bis 2005 kam es zu einer um 71 % erhöhten Wassernutzungseffizienz im Verhältnis von Furchen- zu Tröpfchenbewässerung. Die Erntemenge stieg um 14 % an und es ergaben sich Wassereinsparungen von 32 %. Die Evapotranspiration in der Vegetationsperiode reichte für verschiedene Versuchsfelder in den drei betrachteten Jahren von 432 mm bis 729 mm, wobei die höheren ET-Werte in den Feldern mit Furchenbewässerung vorkamen [Ibragimov et al., 2007].

Eine Umstellung der Furchenbewässerung für die Baumwollfelder der WUA auf 35% Tröpfchenbewässerung im ESA-Szenario brachte eine Einsparung von $788 \text{ m}^3\text{*t}^{-1}$ für das Jahr 2020. Bei einer kompletten Umstellung aller WUA-Baumwollflächen auf Tröpfchenbewässerung würde eine Einsparung von $2.253 \text{ m}^3\text{*t}^{-1}$ erreicht werden. Das entspricht einer Einsparung von 14 % im Verhältnis zur Furchenbewässerung für eine Umstellung von 35 % der Flächen und einer Einsparung von 40 % Bewässerungswasser für eine komplette Umstellung bei gleichbleibenden Erträgen. Für das Jahr 2050 würden durch eine ESA-Szenario-Umstellung $1.045 \text{ m}^3\text{*t}^{-1}$ eingespart, für eine komplette Umstellung auf Tröpfchenbewässerung $2.984 \text{ m}^3\text{*t}^{-1}$. Aufgrund des allgemein gesunkenen Wasserbedarfs wird weiterhin eine Einsparung von 14 % für die ESA-Umstellung erreicht. Die komplette Umstellung auf Tröpfchenbewässerung weist einen Wasservorteil von 40 % auf. Die Wassereinsparungen sind vergleichbar mit der Ersparnis in den Versuchen von Ibragimov et al. (2007). Die Evapotranspirationswerte fallen mit 734 mm bis 893 mm in den SPARE:WATER-Berechnungen etwas höher aus. Eine Unterscheidung für die Bewässerungsart ist nicht möglich, da die Evapotranspiration nur durch Pflanzenkoeffizienten und Klimadaten berechnet wird [Multsch et al., 2013].

Sollte es zu einem Beitritt Usbekistans zur World Trade Organisation und eine einhergehende Öffnung des Exportmarktes kommen, wird sich dies unter anderem auf den Wassergebrauch im Land auswirken. Die Nachfrage nach Wasser, Wassereffizienz und einer Wassermanagementreform wird durch neuen Wettbewerb ansteigen. Der Anstieg momentan künstlich niedrig gehaltener Preise für Baumwolle und Weizen wird wahrscheinlich eine Ausweitung der Ackerfläche für beide Produkte erwirken. Je nach Preisverhältnis von Baumwolle zu Weizen wird sich die Anbaufläche des preiseffizienteren Produktes zu Gunsten der Konkurrenzfähigkeit verschieben. Aufgrund vorteilhafter Standortfaktoren und Weltmarktberühmtheit wird vermutlich der Baumwollanbau einen Teil des Weizenanbaus ersetzen. Für die Modellierung eines Baseline-Szenarios, keine Veränderungen in Baumwoll- oder Weizenanbauflächen sowie eine Weiterführung einer bisherigen Wasser- und Handelspolitik, kommt es für die Periode von 2005 bis 2020 zu einem Anstieg der Weizenernte und einer Abnahme im Baumwollertrag. Die Bewässerungsmenge nimmt für gesamt Usbekistan um 18 % zu [Abdullaev et al., 2009]. Für die WUA Akbarabad würde dies vermutlich ebenfalls zu einem Anstieg der Baumwollflächen führen und damit, im Verhältnis zu Weizenflächen, zu einem erhöhten Wasserbedarf. Allerdings würde durch wegfallende Baumwollquoten auch ein Anreiz entstehen, die Produktivität der Baumwollernte zu erhöhen und so Wasser einzusparen.

Sollte es durch die klimatischen Veränderungen zu einem erhöhten Bedarf an Bewässerungswasser kommen und eine sichere Verteilung des Wassers nicht gewährleistet werden, oder die Erhebung von Wasserpreisen startet [Ibragimov et al., 2007], wird eine möglichst effiziente Wassernutzung für die Landwirte interessant.

Die monetäre Betrachtung der Wassernutzung zeigt, dass Baumwolle auf den Verbrauch eines Kubikmeters Wasser bezogen im Vergleich zu Weizen mehr wert ist. In der Periode von 1997- 2007 erwirtschaftete Baumwolle circa 0,5 US\$ pro Kubikmeter Wasser, der Wert für Weizen lag unter 0,1 US\$ [Aldaya et al., 2010]. Das Verhältnis des Gewinns pro genutzte Einheit Wasser könnte demnach den Anstieg der Baumwollfläche zusätzlich fördern.

5 Fazit

Zusammenfassend kann für die WUA Akbarabad ausgehend von den Analysen festgestellt werden, dass es unter den vorausgesagten Klimawandelbedingungen für den Weizen- wie auch den Baumwollanbau zu einem leichten Anstieg des Wasserfußabdrucks kommen wird. Aufgrund steigender jährlicher minimaler und maximaler Temperaturen erhöhen sich Evapotranspiration und Bewässerungswasserbedarf der Kulturen. Da die Höhe der Evapotranspiration stark von der Höhe der Temperaturen in der Vegetationsperiode der jeweiligen Anbaufrucht abhängig ist und der jährliche Niederschlag nicht positiv korreliert, unterscheiden sich Nass- und Trockenjahre in ihrem Wasserfußabdruck nicht unweigerlich. Die Unterscheidung in der Höhe des Wasserfußabdrucks niederschlagsarmer und -reicher Jahre hängt von den Temperaturen in der Vegetationsperiode ab. Der grüne Wasserfußabdruck geht zu geringeren Anteilen in den totalen Wasserfußabdruck ein als der blaue, daher ist der Einfluss des Niederschlags für den Wasserbedarf geringer als der Einfluss der Bewässerungsmenge.

Durch eine Veränderung in der Bewässerungstechnik kann für die WUA effektiv Wasser eingespart werden. Bei Anbaubedingungen für das Jahr 2050 wie im BAU-Szenario durchgeführt würde die Wassereinsparnis für eine vollständige Bewässerung der Baumwollfläche mit Tröpfchenbewässerung im Verhältnis zur momentan verwendeten Furchenbewässerung und ohne Ertragsverlust 40,15 % betragen. Durch eine Umstellung auf 35 % Tröpfchenbewässerung, wie im ESA-Szenario angedacht, kann eine Einsparung von 14,05 % erreicht werden.

Für Weizen lägen die Wassereinsparungen für die Verwendung von Sprinklerbewässerung im Verhältnis zur Furchenbewässerung ohne Ertragsverlust bei gleichbleibender Anbaufläche bei 23,37 %. Bei einer Umstellung auf 40 % Sprinklerbewässerung, wie es das FSD-Szenario vorhersagt, käme es zu einer Wassereinsparung von 9,35 %. Eine Umstellung der Baumwollflächen der WUA auf Tröpfchenbewässerung ist in Bezug auf die Wassereinsparnis lohnenswerter als eine Umstellung aller Weizenflächen auf Sprinklerbewässerung.

Wird die Gesamt-Ersparnis der WUA betrachtet, kommt es bei einer Umstellung aller Baumwoll- und Weizenflächen auf die effizientere Bewässerungstechnik zu einer Wassereinsparnis von 35,30 %.

Durch eine Umstrukturierung der Landwirtschaft kann Bewässerungswasser eingespart werden. Es hat sich in den SPARE:WATER-Berechnungen gezeigt, dass alle betrachteten alternativen Kulturen einen geringeren WF_{crop} aufweisen als Baumwolle oder Weizen und durch ihren vermehrten Anbau den Wasserfußabdruck der WUA senken könnten. Hierzu muss es jedoch zu einer Öffnung des Exportmarktes mit einer Abschaffung der Quoten für Baumwolle und Weizen kommen. Aufgrund fehlender Anbauflächen für die WUA kann keine absolute

Wasserersparnis festgestellt werden. Bei einem Vergleich des durchschnittlichen gesamten Wasserfußabdrucks pro Hektar für einen Anbau mit Baumwolle und Weizen sowie einen Misanbau aus gleichen Teilen Baumwolle, Weizen, Sorghum, Melone, Wassermelone, Trauben und Mais, käme es zu einer Ersparnis im Jahr 2020 von 30 % unter Furchenbewässerung und 31 % unter vollständiger Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung. Im Jahr 2050 käme es zu einer Wasserersparnis von knapp 24 % für den Anbau mit Furchenbewässerung und 25 % für den Anbau mit effizienterer Bewässerung. Bei einer kompletten Umstellung von einem reinen Baumwoll- und Weizenanbau unter Furchenbewässerung auf einen gleichanteiligen Misanbau unter Sprinkler- sowie Tröpfchenbewässerung sind Einsparungen von 53 % für das Jahr 2020 und von 50 % für 2050 pro Hektar möglich. Wird der WF_{crop} [$m^3 \cdot t^{-1}$] betrachtet können für einen Misanbau durch die Umstellung von Furchenbewässerung auf effizientere Bewässerungstechniken im Jahr 2020 36 % und im Jahr 2050 38 % Wasserersparnis ohne Ertragsverlust erzielt werden. Es zeigt sich, dass alternative Kulturen aufgrund ihrer höheren Wassereffizienz ein guter Ersatz für den Baumwoll- und den Weizenanbau wären. Eine Umstellung der Bewässerungstechnik führt ebenfalls zu einer merklichen Wasserersparnis.

Unter einer ökonomischen Betrachtung würden regionale und globale Preise in die Anbauplanung hereinspielen. Aus allein wassereffizienter Sicht sollte der Anbau von Baumwolle und auch der Anbau von Weizen zurückgeschraubt und ein Misanbau von weniger wasserintensiven Kulturen gefördert werden. Einen weiteren Vorteil haben Kulturen mit einer Hauptwachstumsphase in der niederschlagsreichen Zeit sowie einer kurzen Vegetationsphase aufgrund eines geringeren Bewässerungsbedarfs. Dies trifft auf die Gemüsekulturen zu.

Unter Berücksichtigung aller Szenarien wird daher für die WUA Akbarabad ein vermehrter Gemüseanbau und eine Umstellung der Baumwollflächen auf Tröpfchenbewässerung empfohlen. Die Gemüsekulturen weisen unter Furchenbewässerung im Verhältnis zu Baumwolle schon eine relative Wassereffizienz auf. Die Wasserersparnis ist für die Umstellung der Baumwollflächen wesentlich größer. Die Provinz Ferghana hat in vergangener Zeit eine gute Anpassungsfähigkeit an Klimaänderungen bewiesen. Eine Studie durchgeführt an der Uni Bonn für die Periode von 1990 bis 2010 hat ergeben, dass trotz der klimatischen Veränderungen der Einfluss auf die durch die Landwirte erwirtschafteten Einkommen für die Provinz auf 0,25 bis 0,5 % beschränkt war. Die Studie führt dies auf ein gutes Anpassungsverhalten der Landwirte an Veränderungen aufgrund des gewohnten kontinentalen Klimas mit starken Temperaturdifferenzen und ungleichmäßigen teilweise heftigen Regenfällen zurück sowie eine Umstellung von Baumwollflächen auf Weizenanbau mit verbesserten Weizensorten [Mirzabaev, 2013]. Ob dies auch für zukünftige Perioden zutrifft kann nur vermutet werden.

Durch Verbesserungen im Wassermanagement, einer Substitution wasserintensiver Kulturen hin zu wassereffizienteren Anbauprodukten und dem Einsatz möglichst großflächiger effizienterer Bewässerungstechniken können klimatische Veränderungen und ein einhergehender Ertragsverlust jedoch zumindest abgeschwächt und eine Wasserersparnis erzielt werden.

Literatur

- Abdullaev, I., M. Giordano, and A. Rasulov (2007), Cotton in Uzbekistan: water and welfare, *Cotton Sect. Cent. Asia SOAS*, 112–128.
- Abdullaev, I., C. De Fraiture, M. Giordano, M. Yakubov, and A. Rasulov (2009), Agricultural water use and trade in Uzbekistan: situation and potential impacts of market liberalization, *Water Resour. Dev.*, 25(1), 47–63.
- Aldaya, M. M., G. Muñoz, and A. Y. Hoekstra (2010), Water footprint of cotton, wheat and rice production in Central Asia,
- Aldaya, M. M., A. K. Chapagain, A. Y. Hoekstra, and M. M. Mekonnen (2012), *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*, Routledge.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith, and others (1998), Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, *FAO Rome*, 300, 6541.
- Amosson, S., L. Almas, J. R. Girase, N. Kenny, B. Guerrero, K. Vimlesh, T. Marek (2011), Economics of irrigation systems, *Texas A&M AgriLife*, Amarillo.
- ArcGIS, Version 10.2 (2013), ESRI Inc., 1999.
- Bichsel, C. (2009), *Conflict Transformation in Central Asia: Irrigation Disputes in the Ferghana Valley*, Routledge.
- Brouwer, C., K. Prins, M. Kay, and M. Heibloem (1988), Irrigation water management: irrigation methods, *Train. Man.*, (5).
- Brouwer, C., K. Prins, and M. Heibloem (1989), Irrigation water management: Irrigation scheduling, *Train. Man.*, (4).
- Bruinsma, J. (2009), The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?, in *Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*, FAO, Rome, Italy.
- FAO (2015): FAOstat online database. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. <http://faostat.fao.org/> [14.02.2015].
- Fischer, R. A., Byerlee, D., and Edmeades, G. O. (2009), Can technology deliver on the yield challenge to 2050?, in *Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*, FAO, Rome, Italy.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani (1982), Estimating potential Evapotranspiration, in *J. Irrig. and Drain Engr.*, ASCE, 108(IR3):223-230.
- Hoekstra, A. Y., and P. Q. Hung (2002), Virtual water trade, *Quantif. Virtual Water Flows Nations Relat. Int. Crop Trade Value Water Res. Rep. Ser.*, 11, 166.
- Horst, M. G., S. S. Shamutalov, L. S. Pereira, and J. M. Gonçalves (2005), Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin, *Agric. Water Manag.*, 77(1), 210–231.
- Howell, T. A. (2003), Irrigation efficiency, *Encycl. Water Sci. Marcel Dekker N. Y.*, 467–472.

- Ibragimov, N., S. Evett, Y. Esanbekov, B. Kamilov, and L. Heng (2003), Cotton and Winter Wheat Irrigation Scheduling Improvements in Uzbekistan, in *International Irrigation Show*, pp. 26–34.
- Ibragimov, N., S. R. Evett, Y. Esanbekov, B. S. Kamilov, L. Mirzaev, and J. P. A. Lamers (2007), Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation, *Agric. Water Manag.*, 90(1–2), 112–120, doi:10.1016/j.agwat.2007.01.016.
- Lutz, A., P. Droogers, and W. W. Immerzeel (2012), Climate change impact and adaptation on the water resources in the Amu Darya and Syr Darya River basins, *Rep. Futur.*, 110.
- Mannig, B., M. Müller, E. Starke, C. Merckenschlager, W. Mao, X. Zhi, R. Podzun, D. Jacob, and H. Paeth (2013), Dynamical downscaling of climate change in Central Asia, *Glob. Planet. Change*, 110, 26–39.
- Mekonnen, M. M., and A. Y. Hoekstra (2010a), A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat, Value of Water Research Report Series No. 42, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Mekonnen, M. M., and A. Y. Hoekstra (2010b), The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>.
- Mekonnen, M. M., and A. Y. Hoekstra (2011a), The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8(1), 763–809.
- Mekonnen, M. M., and A. Y. Hoekstra (2011b) National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Mirzabaev, A. (2013), Impact of weather variability and climate change on agricultural revenues in Central Asia, *Quart J Int Agric*, 3, 179–194.
- Multsch, S., Y. A. Al-Rumaikhani, H.-G. Frede, and L. Breuer (2013), A Site-sPecific Agricultural water Requirement and footprint Estimator (SPARE:WATER 1.0), *Geosci Model Dev*, 6(4), 1043–1059, doi:10.5194/gmd-6-1043-2013.
- Reddy, J. M., S. Muhammedjanov, K. Jumaboev, D. Eshmuratov, and others (2012), Analysis of cotton water productivity in Fergana Valley of Central Asia, *Agric. Sci.*, 3(06), 822.
- Reddy, J. M., K. Jumaboev, B. Matyakubov, and D. Eshmuratov (2013), Evaluation of furrow irrigation practices in Fergana Valley of Uzbekistan, *Agric. Water Manag.*, 117, 133–144, doi:10.1016/j.agwat.2012.11.004.
- Regionales Forschungsnetzwerk "Wasser in Zentralasien" (2012), Sachbericht. Förderkennzeichen AA7090002. GeoForschungszentrum, Potsdam.
- Regionales Forschungsnetzwerk "Wasser in Zentralasien" (2013), Sachbericht. Förderkennzeichen AA7090002. GeoForschungszentrum, Potsdam.
- StatSoft (2013), *STATISTICA*, StatSoft (Europe) GmbH, 1984-2013.
- Sylvester-Bradley, R., Foulkes, J., Reynolds, M. (2005), Future wheat yield: evidence, theory and conjecture, in *Proceedings of the 61st Easter School in Agricultural Sciences*, pp. 233–260, Nottingham, UK, Nottingham University.Press.

- Ul Hassan, M. (2004), Constraints to integrated water resources management in Uzbekistan with special reference to water users associations, in *Scientific meeting on Deepening reforms in and perfecting of legal base of water management in Uzbekistan*, Tashkent.
- Uzbekistan, N. C. (2009), *Second National Communication of the Republic of Uzbekistan under the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Tashkent.
- World Meteorological Organization (WMO), 2015.
http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_data_and_products.php [29.01.15].
- Yakubov, M., and M. U. Hassan (2007), Mainstreaming rural poor in water resources management: preliminary lessons of a bottom-up WUA development approach in Central Asia, *Irrig. Drain.*, 56(2-3), 261–276.

Anhang

Tabelle 19. Crop Production-Datei aus der Messwerte-Datei 2010 für die WUA Akbarabad [*Sachbericht*, 2012].

Anbaukultur	Jahr	Flächen	Ernte [$t \cdot ha^{-1}$]	Erntefläche [ha]
Weizen	2010	16_40	5,57	42,1
Weizen	2010	50_40	5,57	42,1
Weizen	2010	17_41	5,56	48,9
Weizen	2010	18_41	5,56	48,9
Weizen	2010	19_41	5,56	48,9
Weizen	2010	31_31	5,52	32,7
Weizen	2010	42_31	5,52	32,7
Weizen	2010	15_30	5,47	16,1
Weizen	2010	46_30	5,47	16,1
Weizen	2010	48_30	5,47	16,1
Weizen	2010	53_21	5,38	49,7
Weizen	2010	112_21	5,38	49,7
Weizen	2010	20_28	5,27	46,1
Weizen	2010	28_28	5,27	46,1
Weizen	2010	85_28	5,27	46,1
Weizen	2010	10_38	5,24	31,0
Weizen	2010	32_12	5,21	27,5
Weizen	2010	35_12	5,21	27,5
Weizen	2010	39_12	5,21	27,5
Weizen	2010	45_12	5,21	27,5
Weizen	2010	138_12	5,21	27,5
Weizen	2010	175_12	5,21	27,5
Weizen	2010	12_37	5,05	19,0
Weizen	2010	180_45	5,00	30,4
Weizen	2010	182_45	5,00	30,4
Weizen	2010	196_45	5,00	30,4
Weizen	2010	13_39	4,99	41,9
Weizen	2010	43_39	4,99	41,9
Weizen	2010	62_29	4,94	27,8
Weizen	2010	73_29	4,94	27,8
Weizen	2010	172_14	4,89	30,6
Weizen	2010	179_14	4,89	30,6
Weizen	2010	36_44	4,87	28,7
Weizen	2010	185_56	4,44	28,4
Weizen	2010	202_56	4,44	28,4
Baumwolle	2010	31_31	3,62	31,1
Baumwolle	2010	42_31	3,62	31,1
Baumwolle	2010	36_44	3,57	41,4
Baumwolle	2010	10_38	3,56	36,1
Baumwolle	2010	17_41	3,50	44,3
Baumwolle	2010	18_41	3,50	44,3

Fortführung von Tabelle 19.

Baumwolle	2010	19_41	3,50	44,3
Baumwolle	2010	20_28	3,29	55,8
Baumwolle	2010	28_28	3,29	55,8
Baumwolle	2010	85_28	3,29	55,8
Baumwolle	2010	13_39	3,19	54,3
Baumwolle	2010	32_12	3,19	43,1
Baumwolle	2010	35_12	3,19	43,1
Baumwolle	2010	39_12	3,19	43,1
Baumwolle	2010	43_39	3,19	54,3
Baumwolle	2010	45_12	3,19	43,1
Baumwolle	2010	138_12	3,19	43,1
Baumwolle	2010	175_12	3,19	43,1
Baumwolle	2010	15_30	2,95	52,5
Baumwolle	2010	46_30	2,95	52,5
Baumwolle	2010	48_30	2,95	52,5
Baumwolle	2010	62_29	2,94	44,5
Baumwolle	2010	73_29	2,94	44,5
Baumwolle	2010	16_40	2,78	67,0
Baumwolle	2010	50_40	2,78	67,0
Baumwolle	2010	180_45	2,75	25,9
Baumwolle	2010	182_45	2,75	25,9
Baumwolle	2010	196_45	2,75	25,9
Baumwolle	2010	185_56	2,39	33,3
Baumwolle	2010	202_56	2,39	33,3
Baumwolle	2010	172_14	2,34	56,8
Baumwolle	2010	179_14	2,34	56,8
Baumwolle	2010	53_21	2,01	42,5
Baumwolle	2010	112_21	2,01	42,5
Baumwolle	2010	12_37	1,91	44,7

Tabelle 20. a) Flächen- und b) Erntedaten der Prognose für die Provinz Ferghana [*Sachbericht*, 2013], leicht abgewandelt.

a)

Bewässerte Anbaufläche	Reporting period			BAU		FSD		ESA	
	2000	2005	2010	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Bewässerte Fläche in tausend ha	382,5	387,5	395,3	395,0	395,0	395,0	395,0	395,0	395,0
Davon: Baumwolle	121,2	118,2	103,7	84,1	35,4	86,1	59,3	86,9	67,9
Getreide	116,8	124,1	129,3	138,2	158,9	86,9	71,1	79,0	39,5

b)

Ernten auf bewässerten Anbauflächen in t*ha ⁻¹									
	Reporting period			BAU		FSD		ESA	
	2000	2005	2010	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Baumwolle	3,0	2,7	2,8	2,6	2,0	2,8	3,0	2,9	3,1
Getreide	3,6	5,1	5,7	8,0	14,4	5,8	6,4	5,8	6,2

Tabelle 21. Wasserfußabdrücke und Erntemengen für die verschiedenen Szenarien und Versuchsjahre unter Annahme gleichbleibender Anbauflächen aus dem BAU-Szenario. Die Wasserfußabdrücke aus dem FSD- und ESA-Szenario beziehen sich jeweils auf die „Obergrenze“ des Anteils eines effizienteren Bewässerungssystems.

BAU-Baumwolle

Jahr	Produktion [t]	WF _{total} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{blau} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{total} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{blau} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{grün} WUA [m ³ *a ⁻¹]
1962	3.208	7.010	6.901	110	22.490.074	22.137.694	352.386
1987	3.856	6.739	6.568	171	25.986.716	25.328.009	658.696
1991	4.516	5.631	5.494	136	25.429.259	24.814.338	614.905
2010	5.019	4.758	4.626	131	23.879.687	23.220.369	659.314
2018	4.285	5.535	5.353	182	23.714.506	22.934.594	779.912
2020	4.851	5.599	5.471	128	27.158.724	26.537.040	621.671
2022	5.211	4.906	4.852	54	25.566.449	25.286.365	280.134
2028	3.977	6.305	6.171	134	25.077.169	24.544.971	532.196
2050	3.346	7.433	7.248	185	24.870.524	24.253.014	617.505
2055	3.142	8.133	7.977	156	25.557.483	25.066.504	490.975
2064	2.862	9.261	9.069	192	26.505.002	25.954.572	550.421

BAU-Weizen

Jahr	Produktion [t]	WF _{total} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{blau} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{total} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{blau} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{grün} WUA [m ³ *a ⁻¹]
1962	528	14.851	12.960	1.891	7.840.589	6.842.130	998.457
1987	1.143	7.531	5.483	2.048	8.607.130	6.266.693	2.340.441
1991	1.345	7.271	6.400	871	9.780.903	8.609.464	1.171.435
2010	5.593	1.583	1.120	463	8.851.644	6.262.124	2.589.521
2018	8.087	1.075	827	249	8.695.203	6.684.225	2.010.979
2020	6.240	1.579	1.184	395	9.850.139	7.387.698	2.462.438
2022	9.003	1.064	957	106	9.576.000	8.618.992	957.008
2028	10.379	853	692	161	8.856.285	7.180.105	1.676.174
2050	15.490	654	535	119	10.130.888	8.285.987	1.844.894
2055	16.571	584	520	64	9.671.626	8.618.383	1.053.232
2064	18.638	593	495	98	11.052.553	9.225.755	1.826.832

FSD-Baumwolle

Jahr	Produktion [t]	WF _{total} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{blau} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{total} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{blau} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{grün} WUA [m ³ *a ⁻¹]
2018	4.285	5.229	5.047	182	22.403.958	21.624.046	779.912
2020	4.851	5.148	5.020	128	24.973.298	24.351.617	621.671
2022	5.211	4.506	4.453	54	23.484.064	23.203.970	280.134
2028	3.977	5.797	5.663	134	23.055.834	22.523.637	532.196
2050	3.346	6.836	6.651	185	22.873.195	22.255.685	617.505
2055	3.142	7.476	7.320	156	23.493.163	23.002.185	490.975
2064	2.862	8.514	8.322	192	24.367.571	23.817.143	550.421

FSD-Weizen

Jahr	Produktion [t]	WF _{total} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{blau} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{total} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{blau} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{grün} WUA [m ³ *a ⁻¹]
2018	8.087	981	732	249	7.931.317	5.920.333	2.010.979
2020	6.240	1.443	1.049	395	9.005.843	6.543.400	2.462.438
2022	9.003	954	848	106	8.590.960	7.633.963	957.008
2028	10.379	774	613	161	8.035.707	6.359.535	1.676.174
2050	15.490	593	474	119	9.183.923	7.339.030	1.844.894
2055	16.571	524	461	64	8.686.643	7.633.403	1.053.232
2064	18.638	536	438	98	9.998.164	8.171.342	1.826.832

ESA-Baumwolle

Jahr	Produktion [t]	WF _{total} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{blau} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{total} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{blau} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{grün} WUA [m ³ *a ⁻¹]
2018	4.285	4.999	4.817	182	21.421.047	20.641.134	779.912
2020	4.851	4.810	4.682	128	23.334.228	22.712.549	621.671
2022	5.211	4.207	4.153	54	21.922.275	21.642.174	280.134
2028	3.977	5.416	5.282	134	21.539.833	21.007.636	532.196
2050	3.346	6.388	6.203	185	21.375.198	20.757.689	617.505
2055	3.142	6.983	6.827	156	21.944.924	21.453.946	490.975
2064	2.862	7.954	7.762	192	22.764.499	22.214.071	550.421

ESA-Weizen

Jahr	Produktion [t]	WF _{total} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{blau} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{grün} [m ³ *t ⁻¹]	WF _{total} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{blau} WUA [m ³ *a ⁻¹]	WF _{grün} WUA [m ³ *a ⁻¹]
2018	8.087	1.028	779	249	8.313.260	6.302.279	2.010.979
2020	6.240	1.511	1.116	395	9.427.991	6.965.549	2.462.438
2022	9.003	1.009	903	106	9.083.480	8.126.477	957.008
2028	10.379	814	652	161	8.445.996	6.769.820	1.676.174
2050	15.490	623	504	119	9.657.406	7.812.508	1.844.894
2055	16.571	554	490	64	9.179.135	8.125.893	1.053.232
2064	18.638	565	467	98	10.525.358	8.698.548	1.826.832

Tabelle 22. Wasserfußabdruck für ausgewählte Kulturen unter Sprinkler- und Tröpfchenbewässerung in $\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ sowie $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ und ihre jeweiligen Wasserfußabdrücke im Verhältnis zu Weizen a) für das Jahr 2020 b) für das Jahr 2050.

a)

Anbaukultur	2020 WF Regionaler Durchschnitt	WF [$\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$]	WF [$\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$]	WF [$\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$] Verhältnis zu Weizen	WF [$\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$] Verhältnis zu Weizen
Baumwolle	total	3.346	8.700	2,70	0,88
	blau	3.218	8.367	3,81	1,24
	grün	128	333	0,32	0,11
Trauben	total	407	10.049	0,33	1,01
	blau	310	7.662	0,37	1,13
	grün	97	2.387	0,24	0,76
Mais	total	608	4.988	0,49	0,50
	blau	494	4.051	0,58	0,60
	grün	114	937	0,29	0,30
Melone	total	215	3.454	0,17	0,35
	blau	148	2.376	0,17	0,35
	grün	67	1.078	0,17	0,34
Sorghum	total	260	5.399	0,21	0,54
	blau	205	4.259	0,24	0,63
	grün	55	1.140	0,14	0,36
Wassermelone	total	165	2.652	0,13	0,27
	blau	90	1.445	0,11	0,21
	grün	75	1.208	0,19	0,38
Weizen	total	1.240	9.922	1,00	1,00
	blau	846	6.765	1,00	1,00
	grün	395	3.157	1,00	1,00

b)

Anbaukultur	2050 WF Regionaler Durchschnitt	WF [m ³ *t ⁻¹]	WF [m ³ *ha ⁻¹]	WF [m ³ *t ⁻¹] Verhältnis zu Weizen	WF [m ³ *ha ⁻¹] Verhältnis zu Weizen
Baumwolle	total	4.448	8.896	8,87	1,23
	blau	4.263	8.527	11,16	1,55
	grün	185	369	1,55	0,22
Trauben	total	176	9.496	0,35	1,32
	blau	139	7.521	0,36	1,37
	grün	37	1.975	0,31	1,15
Mais	total	320	4.957	0,64	0,69
	blau	284	4.401	0,74	0,80
	grün	36	556	0,30	0,32
Melone	total	178	3.536	0,35	0,49
	blau	156	3.110	0,41	0,57
	grün	21	426	0,18	0,25
Sorghum	total	338	5.503	0,67	0,76
	blau	303	4.943	0,79	0,90
	grün	34	560	0,29	0,33
Wassermelone	total	138	2.737	0,27	0,38
	blau	117	2.330	0,31	0,42
	grün	20	407	0,17	0,24
Weizen	total	501	7.217	1,00	1,00
	blau	382	5.502	1,00	1,00
	grün	119	1.715	1,00	1,00